وزارت مسکن و شهرسازی
معاونت امور مسکن و ساختمان

راهنمای جوش و اتصالات جوشی

در ساختمانهای فولادی

۱۳۹۰

دفتر مقررات ملّی ساختمان

وزارت مسکن و شهرسازی
معاونت امور مسکن و ساختمان

راهنمای جوش و اتصالات جوشی
در
ساختمان‌های فولادی

دفتر مقررات ملّی ساختمان
بهار ۱۳۹۰

عنوان و نام پدیدآور:	راهنمای جوش و اتصالات جوشی در ساختمانهای فولادی / تهیه کننده دفتر مقررات ملّی ساختمان، وزارت راه و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان
وضعیت ویراست:	ویراست ۳.
مشخصات نشر:	تهران، توسعه ایران، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری:	مصور، جدول، ۲۲×۲۹ س.م
شابک:	۹۷۸-۹۶۴-۷۵۸۸-۸۸-۱
وضعیت فهرست نویسی:	فیپا
موضوع:	اتصال های جوش شده
موضوع:	جوشکاری
موضوع:	سازه های فولادی جوش شده
شناسه افزوده:	ایران. وزارت مسکن و شهرسازی. دفتر مقررات ملّی ساختمان
رده بندی کنگره:	TA۴۹۲/الف۲ط۲ ۱۳۹۰
رده بندی دیویی:	۶۷۱/۵۲۰۴۲
شماره کتابشناسی ملی:	۲۴۳۹۴۷۷

عنوان کتاب: راهنمای جوش و اتصالات جوشی در ساختمانهای فولادی

تهیه کننده:	دفتر مقررات ملّی ساختمان
ناشر:	نشر توسعه ایران
شمارگان:	۳۰۰۰ جلد
شابک:	۹۷۸-۹۶۴-۷۵۸۸-۸۸-۱
نوبت چاپ:	هفتم
تاریخ چاپ:	۱۳۹۴
چاپ و صحافی:	کانون
قیمت:	۳۰۰,۰۰۰ ریال

حق چاپ برای تهیه کننده محفوظ است.

به نام خدا

پیش‌گفتار

مقررات ملّی ساختمان در تمامی کشورها قواعدی هستند که به نحوی اجرای آن‌ها توسط شهروندان الزام قانونی پیدا می‌کند. ادراک مشترک کلیه عوامل و عناصر مرتبط اعم از دولت، دولت‌های محلی، مردم و مهندسان، موجب می‌گردد که منافع ملّی ناشی از حفظ و افزایش بهره‌وری از سرمایه‌گذاری‌های ملّی و هم چنین حفظ جان و منافع عمومی بهره‌برداران ساختمان‌ها بر منافع سازمانی دستگاه‌های اجرایی و یا منافع دولت‌های محلی و هم چنین منافع فوری سرمایه گذاران ترجیح داده شود. بدیهی است توافق و التزام بر این دسته از منافع و خواسته‌ها در قالب برنامه توسعه نظام ملّی ساخت و ساز تحقق می‌یابد.

از سال ۱۳۶۶ مقررات حاکم بر جنبه‌های مهندسی و فنی ساختمان (طراحی - نظارت - اجرا)، توسط وزارت راه و شهرسازی در قالب مقررات ملّی ساختمان به تدریج وضع و استفاده از آن الزامی شده است. توسعه آموزش عالی، مراکز فنی و حرفه‌ای و سازمان‌های نظام مهندسی موجب افزایش نیروی انسانی متخصص و ماهر در سطح کشور گردید و به موازات آن مقررات ملّی ساختمان و استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی نیز به همت اساتید و صاحبنظران شاغل در حرفه به صورت دوره‌ای مورد بازنگری و تجدید چاپ قرار گرفته‌اند. در حال حاضر این مقررات به درجه‌ای از کمال و غنا رسیده است که به عنوان مرجع و منبع آموزشی ضمن تأمین نیاز نسبی دانشگاهیان و جامعه مهندسی کشور، سازندگان و بهره‌برداران، ابزار و مرجع کنترل لازم را برای اطمینان از کیفیت ساخت و سازها برای ناظران و بازرسان فراهم نموده است.

مقایسه کیفیت ساختمان‌ها بویژه از حیث سازه‌ای در سال‌های اخیر با قبل از تدوین مقررات ملّی ساختمان مؤید تأثیر این مقررات در ارتقای کیفیت ساختمان‌ها و سیر تکاملی آن در جهت تأمین ایمنی، بهداشت، رفاه و آسایش و صرفه اقتصادی می‌باشد اما با مقایسه آمار کمی و کیفی، وضع موجود کشور با میانگین شاخص‌های جهانی فاصله قابل توجهی وجود دارد.

برای جبران فاصله شاخص‌های پیش گفته شده لازم است اولاً نهادهای حاکمیتی سیاست‌گذار و برنامه‌ریز و مراجع صدور پروانه ساختارهای کنترل و نظارت را مورد بازنگری قرار داده تا سیستم نظارت جدی‌تری نسبت به تولید، توزیع و مصرف مصالح استاندارد و اجرای مقررات ملّی ساختمان اعمال گردد. ثانیاً سازمان‌های نظام مهندسی ساختمان، تشکل‌های حرفه‌ای دانشگاه‌ها و مراکز آموزشی و تحقیقاتی بیش از پیش در ترویج و

تبیین مقررات وضع شده، الگوسازی و ارایه نمونه‌های عینی رعایت مقررات یاد شده و معرفی فن‌آوری‌های نوین و به نمایش گذاشتن مزایای آن تلاش نمایند. ثالثاً مهندسان و سازندگان که وظیفه اساسی در اعمال ضوابط و مقررات ساختمانی را در طراحی، اجرا و نظارت ساخت و سازها بر عهده دارند با به روز رسانی دانش فنی و مهارت حرفه‌ای و با تکیه بر اصل اخلاق حرفه‌ای خود نسبت به اجرای مقررات ملّی ساختمان بیش از پیش اصرار ورزیده و کارفرمایان و مالکان نیز تشویق یا ملزم به رعایت مقررات ملّی ساختمان آن شوند. همچنین مردم به عنوان بهره‌برداران نهایی می‌توانند با افزایش سطح آگاهی از حقوق خود نقش اساسی در ارتقای کیفیت از طریق افزایش مطالبات در کیفیت و بهره‌وری ساختمان‌ها و ایجاد انگیزه رقابت در ارایه ساختمان‌های با کیفیت ایفا نمایند.

در خاتمه از کلیه اساتید و صاحبنظران و تدوین کنندگان که از ابتدا تاکنون در تدوین و تجدیدنظر مباحث مقررات ملّی ساختمان تلاش نموده و در همفکری و همکاری با این وزارت از هیچ کوششی دریغ ننموده‌اند، سپاس‌گزارم. همچنین برای دست اندرکاران ساخت و ساز از دستگاه‌های نظارتی و کنترلی مراجع صدور پروانه و کلیه عزیزانی که اجرای این مقررات را خدمتگزاری به میهن و مردم خویش می‌پندارند، آرزوی موفقیت و سربلندی در پیشگاه خدای متعال می‌نمایم.

عباس آخوندی

وزیر راه و شهرسازی

فهرست مطالب

۱. معرفی جوشکاری ساختمانی / ۱

۱ـ۱ تعریف جوشکاری ۳
۱ـ۲ جوش قوس الکتریکی ۳
۱ـ۳ مدار جوشکاری قوس الکتریکی ۴
۱ـ۴ عوامل مهم جوشکاری ۶
۱ـ۵ فرآیندهای جوشکاری ۸
۱ـ۶ جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار (SMAW) ۹
۱ـ۷ جوش زیرپودری (SAW) ۱۱
۱ـ۸ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی (GMAW) ۱۵
۱ـ۹ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود توپودری (FCAW) ۱۷
۱ـ۱۰ جوش گاز الکتریکی و سرباره الکتریکی ۲۱
۱ـ۱۱ جوش خمیری ۲۲
۱ـ۱۲ جوشکاری گل‌میخ ۲۲
۱ـ۱۳ وضعیت‌های جوشکاری ۲۴
۱ـ۱۴ اتصالات جوشی ۲۷
۱ـ۱۵ انواع جوش ۲۷
۱ـ۱۶ علایم جوشکاری ۲۹
۱ـ۱۷ کاربرد انواع جوش در ساختمان ۳۲
۱ـ۱۸ جوش‌پذیری ۳۶
۱ـ۱۹ پیش‌گرمایش ۳۷

۲. وسایل و تجهیزات جوشکاری قوس الکتریکی / ۳۹

۲ـ۱ معرفی ۴۱
۲ـ۲ قابلیت‌های جوشکاری قوس الکتریکی ۴۲
۲ـ۳ اصول کلی ۴۲
۲ـ۴ منابع انرژی جوشکاری ۴۳
۲ـ۵ منحنی ولتاژ ـ شدت جریان ۴۵

۲ ـ ۶ ماشین‌های مورد استفاده در جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار ۴۷
۲ ـ ۷ کابل و وسایل اتصال ۵۲
۲ ـ ۸ تجهیزات حفاظتی ۵۷
۲ ـ ۹ ابزار تمیزکاری گل‌جوش ۶۴
۲ ـ ۱۰ ابزار نگهداری الکترود ۶۵
۲ ـ ۱۱ ابزار پیش‌گرمایش درز ۶۶
۲ ـ ۱۲ ابزارهای اندازه‌گیری ۶۶
۲ ـ ۱۳ ابزارهای نشانه‌گذاری ۶۶
۲ ـ ۱۴ ابزار نصب ۶۷
۲ ـ ۱۵ تجهیزات جوشکاری تحت حفاظت گاز ۶۹
۲ ـ ۱۶ تجهیزات جوشکاری قوسی زیرپودری ۷۲

۳. الکترود / ۷۷

۳ ـ ۱ معرفی ۷۹
۳ ـ ۲ تعاریف عمومی ۷۹
۳ ـ ۳ الکترود روکش‌دار ۸۰
۳ ـ ۴ روکش الکترود ۸۰
۳ ـ ۵ طبقه‌بندی و شماره‌گذاری الکترودها طبق AWS ۸۵
۳ ـ ۶ انتخاب نوع و قطر الکترود ۸۷
۳ ـ ۷ مشخصه‌های کاربردی الکترودها ۸۸
۳ ـ ۸ فلز پایه ۹۰
۳ ـ ۹ جریان جوشکاری ۹۰
۳ ـ ۱۰ ضخامت و شکل فلزات مورد جوشکاری ۹۰
۳ ـ ۱۱ وضعیت جوشکاری ۹۱
۳ ـ ۱۲ معرفی الکترودهای متعارف و کاربرد آنها ۹۱
۳ ـ ۱۳ نگهداری الکترودهای روکش‌دار ۹۵
۳ ـ ۱۴ خشک‌کن الکترود ۹۸
۳ ـ ۱۵ بسته‌بندی الکترودها ۹۹
۳ ـ ۱۶ ضوابط بازرسی ظاهری الکترودها ۱۰۰

۴. طراحی درز جوش / ۱۰۵

۴ ـ ۱ معرفی ۱۰۷
۴ ـ ۲ انواع اتصال ۱۰۷
۴ ـ ۳ انواع جوش ۱۰۸
۴ ـ ۴ انواع درز ۱۱۰
۴ ـ ۵ دهانه یا بازشدگی ریشه (R) ۱۱۳

۴ ـ ۶ تسمه‌های پشت‌بند ۱۱۵
۴ ـ ۷ گرده جوش ۱۱۶
۴ ـ ۸ ضخامت ریشه ۱۱۶
۴ ـ ۹ سنگ زدن ریشه از پشت (شیارزنی پشت) ۱۱۸

۵. عیب‌های جوش / ۱۲۱

۵ ـ ۱ عیب‌های اصلی جوش ۱۲۳
۵ ـ ۲ عیوب جوش در جوشکاری تحت حفاظت گاز ۱۳۷
۵ ـ ۳ عیوب جوش در فرآیند جوشکاری با قوس زیرپودری ۱۴۰
۵ ـ ۴ ترک‌خوردگی جوش ۱۴۱

۶. تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری / ۱۵۳

۶ ـ ۱ عوامل مؤثر در تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری ۱۵۵
۶ ـ ۲ عوامل اعوجاج ۱۵۶
۶ ـ ۳ تأثیرات نامطلوب جوش بیش از حد ۱۵۷
۶ ـ ۴ کنترل انقباض جوش ۱۵۸
۶ ـ ۵ انقباض عرضی ۱۶۱
۶ ـ ۶ هلالی شدن بال ۱۶۵
۶ ـ ۷ شمشیری شدن (انحنای طولی) ۱۶۶
۶ ـ ۸ هم‌راستایی ورق‌ها ۱۷۱
۶ ـ ۹ استفاده از حرارت برای رفع انقباض‌های جوشکاری ۱۷۲
۶ ـ ۱۰ حرارت تولیدی در هنگام جوشکاری (حرارت القایی به‌علت جوشکاری) ۱۷۶
۶ ـ ۱۱ جمع‌بندی مطالب فصل ۱۸۶

۷. بازرسی جوش ـ بازرسی چشمی (عینی) / ۱۸۹

۷ ـ ۱ مقدمه ۱۹۱
۷ ـ ۲ زمان شروع نظارت و بازرسی ۱۹۲
۷ ـ ۳ پنج دستورالعمل برای حصول کیفیت در جوش ساختمانی ۱۹۳
۷ ـ ۴ نظارت‌های پیشگیرانه (PM) ۱۹۸
۷ـ ۵ بازرسی عینی (V.I.) ۱۹۹
۷ ـ ۵ ـ ۱ اصول بازرسی چشمی (عینی) جوش ۱۹۹
۷ ـ ۵ ـ ۲ وظایف عمدهٔ بازرسی جوش ۲۰۵
۷ ـ ۵ ـ ۳ وسایل بازرسی چشمی (عینی) جوش ۲۰۶
۷ ـ ۵ ـ ۴ اندازه‌گیری جوش ۲۰۷
۷ ـ ۶ ضوابط پذیرش بازرسی چشمی (عینی) جوش ۲۱۰

۷ ـ ۷ رواداری‌های عیوب ظاهری جوش در بازرسی چشمی (عینی) طبق ISO 5817 ..... ۲۱۳
۷ ـ ۸ چک‌لیست بازرسی چشمی (عینی) ۲۱۸

۸. آزمایش‌های ارزیابی / ۲۲۹

۸ ـ ۱ معرفی ۲۳۱
۸ ـ ۲ آزمایش‌های ارزیابی و تأیید ۲۳۱
۸ ـ ۳ آزمایش‌های مخرب ۲۳۲
۸ ـ ۴ آزمایش‌های غیرمخرب ۲۵۷
۸ ـ ۵ برنامه‌ریزی آزمایش‌های غیرمخرب ۳۰۱
۸ ـ ۶ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO 5817 ..... ۳۰۲

۹. مسائل اجرایی در کارهای فولادی / ۳۰۹

۹ ـ ۱ عملیات اجرایی در کارهای فولادی ۳۱۱
۹ ـ ۲ تهیه نقشه‌های ساخت ۳۱۲
۹ ـ ۳ عملیات برشکاری و آماده‌سازی لبه‌ها ۳۱۳
۹ ـ ۴ ساخت اعضا ۳۲۱
۹ ـ ۵ عملیات تمیزکاری و رنگ ۳۵۶
۹ ـ ۶ عملیات حمل ۳۶۰
۹ ـ ۷ عملیات پیش‌مونتاژ و مونتاژ در پای کار ۳۶۲
۹ ـ ۸ عملیات واداشتن، نصب، خال‌جوش و اتصالات موقت ۳۶۳
۹ ـ ۹ شاقولی کردن ستون‌ها، هم‌محور کردن تیرها و تکمیل اطلاعات ۳۶۴
۹ ـ ۱۰ نصب کف ستون ۳۶۸
۹ ـ ۱۱ رواداری نصب ستون ۳۶۹

۱۰. طراحی جوش / ۳۷۱

۱۰ ـ ۱ مقدمه ۳۷۳
۱۰ ـ ۲ اندازه جوش گوشه ۳۷۳
۱۰ ـ ۳ محدودیت سایر جوش‌ها ۳۷۷
۱۰ ـ ۴ جوش شیاری با نفوذ نسبی ۳۷۹
۱۰ ـ ۵ انواع جوش ۳۸۰
۱۰ ـ ۶ تنش‌های مجاز جوش ۳۸۰
۱۰ ـ ۷ ارزش جوش ۳۸۱
۱۰ ـ ۸ حداکثر اندازه مؤثر ساق جوش گوشه ۳۸۲
۱۰ ـ ۹ اتصال اعضا با نیروی محوری ۳۸۳
۱۰ ـ ۱۰ اتصالات جوشی با برون‌محوری ۳۸۶

۱۰ ـ ۱۱ ترکیب برش و پیچش ۳۸۸
۱۰ ـ ۱۲ ترکیب برش و خمش ۳۹۲
۱۰ ـ ۱۳ تخمین طول جوش تحت اثر لنگر خمشی ۳۹۴

۱۱. طراحی اتصالات / ۳۹۷

۱۱ ـ ۱ معرفی ۳۹۹
۱۱ ـ ۲ اتصال سادهٔ تیر با نبشی جان ۴۰۳
۱۱ ـ ۳ اتصال سادهٔ تیر با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر ۴۰۷
۱۱ ـ ۴ اتصال سادهٔ تیر با نشیمن تقویت‌شده ۴۱۱
۱۱ ـ ۵ اتصالات صلب تیر به‌ستون ۴۲۱
۱۱ ـ ۶ وصلهٔ تیرها ۴۶۴
۱۱ ـ ۷ وصلهٔ ستون‌ها ۴۷۰
۱۱ ـ ۸ اتصال مهاربندی همگرا ۴۷۷
۱۱ ـ ۹ اتصالات پای ستون (کف ستون) ۵۰۶
۱۱ ـ ۱۰ اتصالات لوله‌ها و قوطی‌ها ۵۳۲

۱۲. جوش درزهای استاندارد ۵۶۵

۱۳. تعداد عبور ۵۸۷

۱۴. کنترل کیفی در ساختمان‌های کوچک / ۶۲۱

۱۴ ـ ۱ معرفی ۶۲۳
۱۴ ـ ۲ قانون 5 P ۶۲۴
۱۴ ـ ۳ بازرسی عینی (V.I) ۶۲۷
۱۴ ـ ۴ جوش خوب چیست ؟ ۶۲۹

۱۵. برنامه‌ریزی آزمایش‌ها ۶۳۷

پیوست ۱ مشخصات هندسی نیمرخ‌های ساختمانی ۶۴۱

پیوست ۲ فرم‌های استاندارد ۶۵۵

پیوست ۳ آزمون جوشکاران ساختمانی طبق استاندارد ملّی ایران ۶۶۳

واژه‌نامه انگلیسی به‌فارسی ۶۷۱

فصل

۱ معرفی جوشکاری ساختمانی

۱ـ۱ تعریف جوشکاری ۳
۱ـ۲ جوش قوس الکتریکی ۳
۱ـ۳ مدار جوشکاری قوس الکتریکی ۴
۱ـ۴ عوامل مهم جوشکاری ۶
۱ـ۵ فرآیندهای جوشکاری ۸
۱ـ۶ جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار (SMAW) ۹
۱ـ۷ جوش زیرپودری (SAW) ۱۱
۱ـ۸ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی (GMAW) ۱۵
۱ـ۹ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود توپودری (FCAW) ۱۷
۱ـ۱۰ جوش گاز الکتریکی و سرباره الکتریکی ۲۱
۱ـ۱۱ جوش خمیری ۲۲
۱ـ۱۲ جوشکاری گل‌میخ ۲۲
۱ـ۱۳ وضعیت‌های جوشکاری ۲۴
۱ـ۱۴ اتصالات جوشی ۲۷
۱ـ۱۵ انواع جوش ۲۷
۱ـ۱۶ علایم جوشکاری ۲۹
۱ـ۱۷ کاربرد انواع جوش در ساختمان ۳۲
۱ـ۱۸ جوش‌پذیری ۳۶
۱ـ۱۹ پیش‌گرمایش ۳۷

۱ معرفی جوشکاری ساختمانی

۱ـ۱ تعریف جوشکاری

جوشکاری عبارت است از اتصال و یکپارچه کردن قطعات فلزی به‌طور عام و فولادی به‌طور خاص به‌کمک حرارت، فشار و یا ترکیبی از حرارت و فشار. رد پای تاریخی جوشکاری را باید در جوش سندانی دنبال کرد. در این شیوه دو قطعهٔ فولادی گداخته شده با ضربات چکش و یا سنبه با یکدیگر یکپارچه می‌شدند.

در هر فرآیند جوشکاری عوامل زیر مورد نیاز است:

- منبع ایجاد گرما یا فشار
- فلز مادر یا فلز پایه
- فلز پُرکننده یا فلز جوش

منبع ایجاد گرما می‌تواند شعله یا منبع الکتریکی باشد. منظور از فلز پایه قطعات فلزی است که باید با یکدیگر یکپارچه شوند. فلز پُرکننده نیز فلزی است که در فرآیند جوشکاری ذوب‌شده و درز بین دو قطعه فلز پایه را پُر می‌کند. جوشکاری می‌تواند با و یا بدون فلز پرکننده باشد.

۱ـ۲ جوش قوس الکتریکی

جوش قوس الکتریکی، یکی از روش‌های جوشکاری است که کاربرد بسیار وسیعی در جوشکاری ساختمانی دارد. در این روش اتصال بین قطعات فلز مادر با ذوب کردن لبه‌های درز و سخت شدن بعدی آنها صورت می‌گیرد. در حین ذوب، فلز پایه و فلز جوش (پرکننده) با یکدیگر ممزوج شده و پس از سخت شدن، اتصال قطعات تأمین می‌گردد.

حرارت لازم برای ذوب مصالح، به‌وسیله قوس الکتریکی تأمین می‌شود. قوس الکتریکی بین مفتول فولادی که

الکترود نامیده می‌شود و فلز پایه تشکیل می‌شود. با نزدیک کردن الکترود به‌درز جوش، قوس ایجادشده و حرارتی معادل ۳۶۰۰ درجه سلسیوس در قوس ایجاد می‌شود. این حرارت زیاد، باعث ذوب فلز پایه و نوک الکترود می‌شود و یک حوضچه مذاب از هر دو فلز در نوک الکترود به‌وجود می‌آورد. با حرکت الکترود، حوضچه مذاب به‌سمت جلو حرکت کرده و حوضچه‌های مذاب پشتی سرد و منجمد شده و باعث امتزاج و یکپارچگی دو فلز در محل درز می‌شوند.

قوس الکتریکی

گازها در حالت عادی قابلیت هدایت الکتریسیته ندارند، ولی اگر تحت تأثیر عوامل خارجی از قبیل حرارت زیاد، میدان الکتریکی و غیره قرار گیرند، بعضی از اتم‌ها الکترون از دست داده و بار مثبت پیدا می‌کنند (یون‌های مثبت) و برخی از الکترون‌ها وارد مدار اتم‌های خنثی شده و آنها را دارای بار منفی می‌سازند (یون‌های منفی). این عمل یونیزه شدن نامیده می‌شود. گاز یا هوا پس از یونیزه شدن قابلیت هدایت الکتریسیته پیدا می‌کند و هرچه شدت عمل یونیزه شدن بیشتر باشد، حرکت یون‌های باردار سریع‌تر و قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر می‌گردد.

با نزدیک کردن نوک الکترود به‌فلز پایه، در فاصله‌ای حدود قطر الکترود، هوا یونیزه شده و قابلیت هدایت الکتریکی پیدا می‌کند. لیکن به‌علت بالا بودن مقاومت الکتریکی در طول قوس، انرژی الکتریکی تبدیل به‌انرژی حرارتی می‌شود.

قوس الکتریکی در میدان مغناطیسی منحرف می‌شود، با کوتاه کردن طول قوس و تغییر زاویه الکترود می‌توان از میزان انحراف قوس کاست.

۱ ـ ۳ مدار جوشکاری قوس الکتریکی

در شکل ۱ ـ ۱ ـ الف مدار جوشکاری نشان داده شده است.

این مدار شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) ماشین جوشکاری که می‌تواند ترانس، رکتیفایر، و یا موتور ـ مولد (دینام یا دیزل ژنراتور) باشد. در این مورد در فصل دوم بحث کامل‌تری ارایه می‌شود.

ب) اتصال به فلز پایه

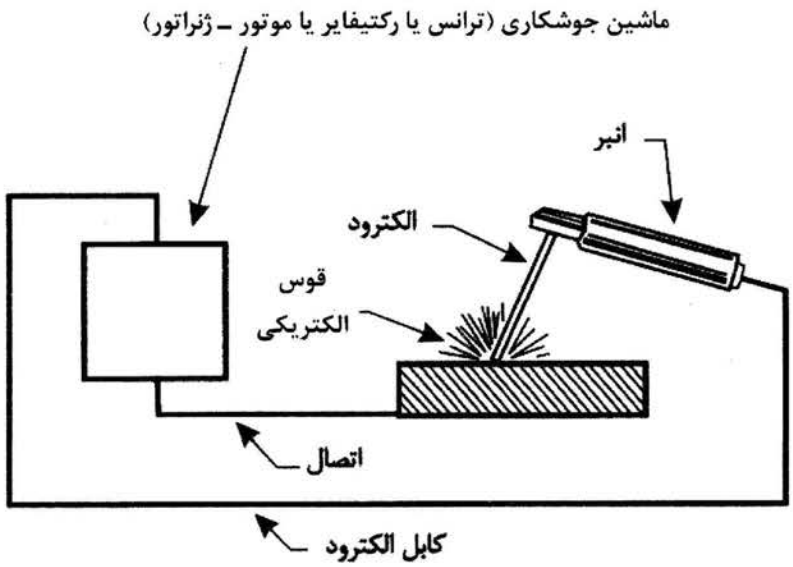
پ) اتصال به‌انبر و الکترود

ت) قوس الکتریکی

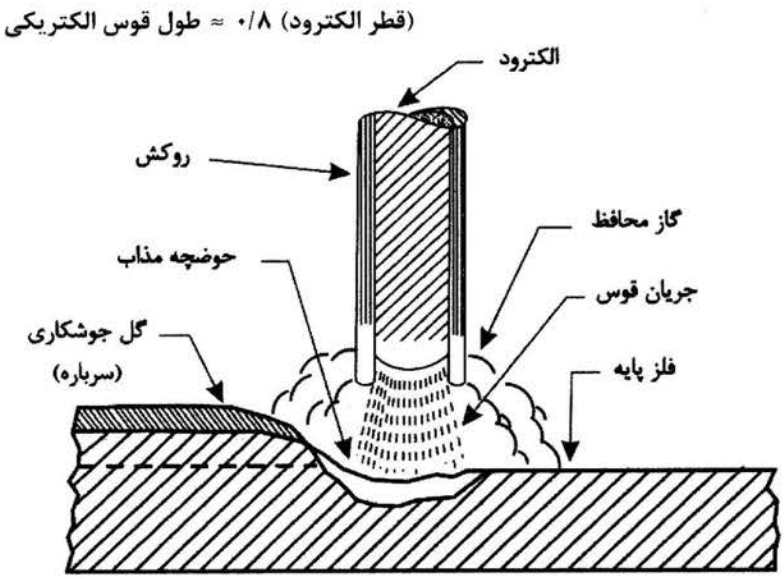
اگر نوک الکترود به‌قطعه فلز پایه بچسبد، اصطلاحاً اتصال کوتاه حاصل شده و جریان زیادی در مدار برقرار می‌گردد که مورد نظر نمی‌باشد.

اما اگر الکترود در فاصله معینی از فلز پایه قرار گیرد، حرکت الکترون‌ها باعث یونیزه شدن هوا و ایجاد قوس الکتریکی می‌شود. مقاومت الکتریکی زیاد قوس، تولید حرارت فوق‌العاده‌ای می‌نماید که باعث ذوب الکترود و لبه‌های دو قطعه فلز پایه در داخل حوضچه مذاب که در واقع کوره ذوب بسیار کوچکی می‌باشد، می‌گردد (شکل ۱ ـ ۱ ـ ب).

در داخل حوضچه، فلز پایه و فلز جوش با هم آمیخته‌شده و با حرکت الکترود به‌سمت جلو، حوضچه‌های پشتی سرد و منجمد گشته و نوار جوش به‌وجود می‌آید.



الف ـ مدار جوشکاری



ب ـ تشکیل حوضچه مذاب در نوک الکترود

شکل ۱ ـ ۱ مدار جوشکاری و جزییات حوضچهٔ مذاب.

نوع جریان

جوشکاری قوس الکتریکی را می‌توان با جریان یکسو (مستقیم) و یا جریان متناوب برقرار نمود.

قطبیت[1]

وقتی که برای جوشکاری از جریان یکسو استفاده می‌شود، مدار جوشکاری را می‌توان به‌دو صورت برقرار نمود:

اتصال با قطبیت منفی: در اتصال با قطبیت منفی یا مستقیم[2]، قطب منفی به‌الکترود متصل می‌شود. در این حالت حدود $\frac{۲}{۳}$ حرارت حاصله در فلز مبنا و $\frac{۱}{۳}$ در الکترود آزاد می‌شود.

اتصال با قطبیت مثبت: در اتصال با قطبیت مثبت یا معکوس[3]، قطب مثبت به‌الکترود متصل می‌شود. در این حالت حدود $\frac{۱}{۳}$ حرارت حاصله در فلز مبنا و $\frac{۲}{۳}$ در الکترود رها می‌شود.

در جوشکاری با جریان متناوب، نظر به‌اینکه جهت جریان به‌تناوب عوض می‌شود، اتصال با قطبیت مثبت یا منفی مفهومی ندارد. در نتیجه نیمی از حرارت حاصل از قوس الکتریکی، در الکترود و نیمی دیگر در قطعه آزاد می‌شود.

۱ ـ ۴ عوامل مهم جوشکاری

در جوشکاری قوسی چهار عامل مهم وجود دارد که تأثیر زیادی بر کیفیت جوش دارند و برای اینکه جوش خوبی بدست آید، لازم است هر یک از آنها با نوع کار و وسایل مورد استفاده هماهنگ شوند (شکل ۱ ـ ۲).

این چهار عامل متغیر عبارتند از:

۱. شدت جریان
۲. طول قوس یا ولتاژ قوس
۳. سرعت پیشروی
۴. زاویه الکترود

شدت جریان قوس متناسب با قطر الکترود مصرفی روی ماشین جوشکاری میزان می‌شود. هرچه قطر الکترود بیشتر باشد، جریان مصرفی بیشتر است. همیشه میزان آمپری که سازنده الکترود توصیه کرده است، مورد توجه قرار گیرد.

ولتاژ قابلیت تشکیل و تداوم قوس الکتریکی را معین کرده و میزان پایداری، یا دوام آن را مشخص می‌کند. اگر ولتاژ زیاد باشد، طول قوس بلند بوده و ممکن است موجب انحراف قوس گردد. اگر میزان ولتاژ خیلی کم باشد، طول قوس خیلی کوچک بوده و برقراری قوس بسیار مشکل است.

---

1. Polarity
2. DCEN or DCSP
3. DCEP or DCRP

۱ـ۴ـ۱ تعیین شدت جریان

وقتی قوس برقرار شد و جوشکاری آغاز گردید مقدار آمپری که از مدار جوشکاری عبور می‌کند به‌شدت جریان جوشکاری موسوم است. جریان قوس متناسب با قطر الکترود مصرفی روی ماشین جوشکاری میزان می‌شود.

در جوشکاری با الکترودهای روکشدار استاندارد، عدد آمپر به‌طور تقریبی با عدد قطر برحسب هزارم اینچ برابر است.

بنابراین الکترود به‌قطر ۳/۲۵ میلیمتر یا $\frac{۱}{۸}$ اینچ که برابر با ۰/۱۲۵ اینچ می‌باشد، با ۱۲۵ آمپر خوب کار می‌کند. وقتی صحبت از قطر می‌شود منظور قطر سیم مغزه است نه قطر روکش الکترود.

۱ـ۴ـ۲ طول قوس

طول قوس عبارت است از فاصله بین سر الکترود تا سطح قطعه مورد جوشکاری به‌هنگام برقراری قوس؛ طول قوس در کیفیت جوشکاری تأثیر زیادی دارد. طول قوس با ولتاژ دو سر قوس رابطه مستقیم دارد یعنی برای اینکه طول قوس سه برابر شود، نیاز به‌ولتاژ سه برابر خواهد داشت. به‌طور تجربی می‌توان گفت به‌ازای هر $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ طول قوس ۱۰ ولت بین دو سر قوس لازم است، به‌عبارت دیگر می‌توان گفت به‌ازای هر یک میلیمتر قوس، تقریباً ۶/۳ ولت لازم است. یک قاعده کلی بیان می‌کند که: «طول قوس بایستی قدری کمتر از قطر الکترود مورد استفاده باشد» مثلاً با الکترود به‌قطر ۴ میلی‌متر، طول قوس بین ۳ تا ۴ میلی‌متر و ولتاژ ۲۰ تا ۲۲ ولت مناسب است.

عملاً برای جوشکاری اندازه‌گیری دقیق طول قوس هنگام جوشکاری مقدور نیست ولی جوشکار می‌تواند با گوش دادن به‌صدای قوس و یا تمرین، طول قوس مناسب را برقرار سازد.

۱ـ۴ـ۳ سرعت پیشروی

سرعت پیشروی قوس با ضخامت فلز مورد جوشکاری، مقدار جریان و اندازه، شکل یا گرده دلخواه جوش تغییر خواهد کرد. مطابق یک قاعدهٔ کلی سرعت پیشروی مناسب عبارتست از سرعتی که در اجرای یک جوش تک پاسه ساده با طول قوس ثابت، حوضچهٔ مذاب تشکیل شده دو برابر قطر الکترود باشد.

۱ـ۴ـ۴ زاویه الکترود

در جوشکاری ورق حالت مسطح (حالت تخت)، الکترود بایستی عمود بر ورق باشد و در حالت‌های دیگر بهتر است الکترود زاویه موجود جوشکاری را نصف نماید.

معمولاً انحراف تا ۱۵ درجه از آنچه گفته شد اشکالی ندارد. محدودهٔ زوایای مناسب جوشکاری در وضعیت‌های مختلف جوشکاری در آیین‌نامهٔ جوشکاری ساختمانی ایران آمده است.

۱ ـ ۵ فرآیندهای جوشکاری[4]

فرآیندهای جوشکاری در سه رده عمومی قرار می‌گیرند:

۱. جوشکاری دستی
۲. جوشکاری نیمه‌خودکار
۳. جوشکاری خودکار

اختلاف سه فرآیند فوق در موارد زیر می‌باشد:

الف) هدایت انبر که در جوشکاری دستی و نیمه‌خودکار توسط کارگر انجام می‌شود.

ب) نوع الکترود که در جوشکاری دستی از الکترود روکش‌دار با طول محدود[5] استفاده می‌شود و در جوشکاری نیمه‌خودکار و خودکار از الکترود لخت (بدون روکش) با طول پیوسته که دور قرقره پیچیده‌شده، استفاده می‌شود.

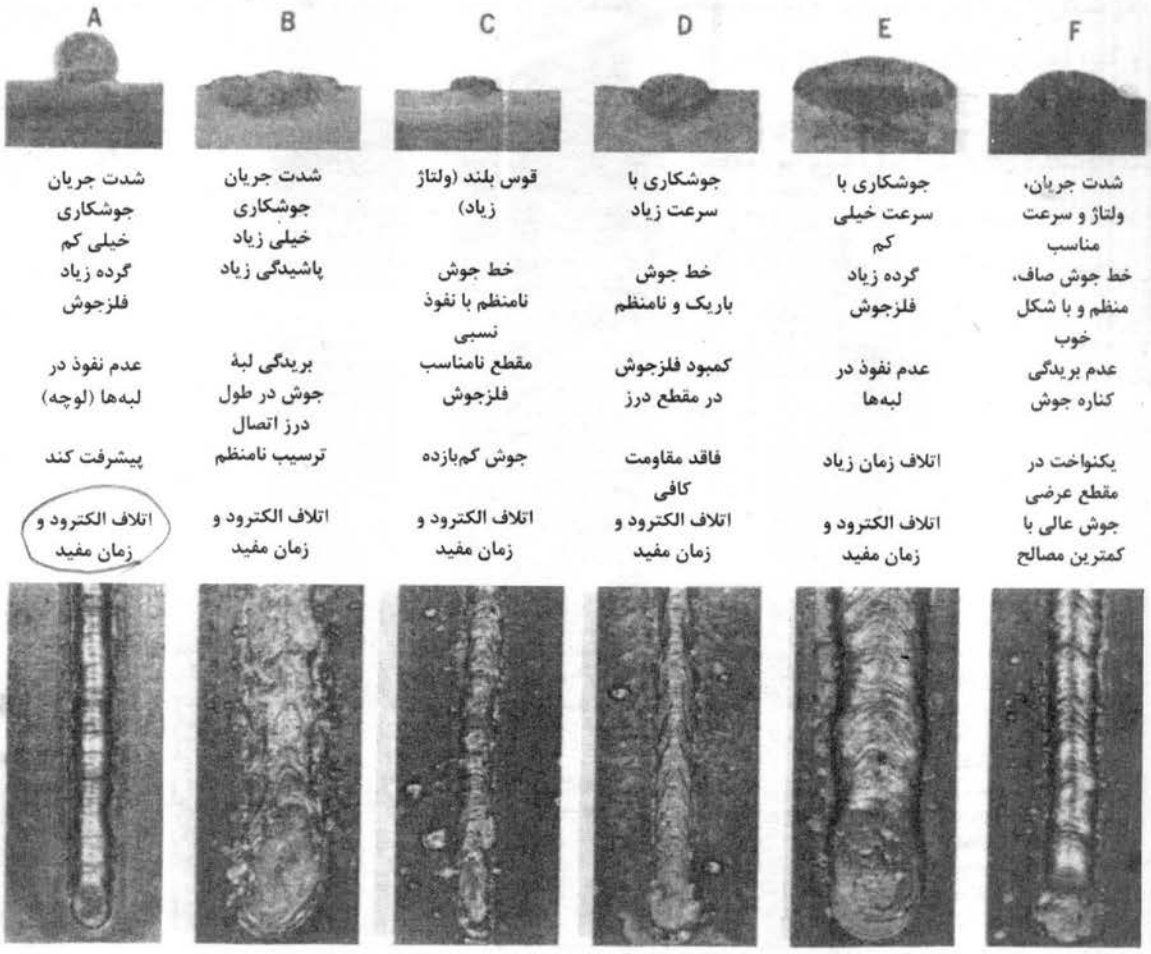
پ) نحوه محافظت از نوار جوش مذاب در حال سخت شدن.

در جوشکاری نیمه‌خودکار، هدایت انبر توسط جوشکار انجام می‌شود، لیکن طول الکترود نامحدود است. فرآیندهای جوشکاری خودکار و نیمه‌خودکار به‌قرار زیر است:

۱. جوش زیرپودری
۲. جوش تحت حفاظت گاز با الکترود فلزی
۳. جوش تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن
۴. جوش تحت حفاظت گاز با الکترود توپودری
۵. جوش گاز الکتریکی
۶. جوش سرباره الکتریکی

تمایز قابل توجه در فرآیندهای فوق، نحوه محافظت از نوار جوش در حالت سخت شدن است. در جوشکاری دستی این کار توسط روکش الکترود که در حین ذوب الکترود با آن ذوب‌شده و به‌صورت لایه سخت در روی جوش خود را می‌بندد، انجام می‌شود. در سایر روش‌ها چون از الکترود لخت استفاده می‌شود، محافظت به‌سبک دیگری تأمین می‌گردد که در زمان مناسب مورد بحث قرار می‌گیرد.

4. Process
5. Stick



شکل ۱ ـ ۲ تأثیر عوامل مهم روی کیفیت جوش.

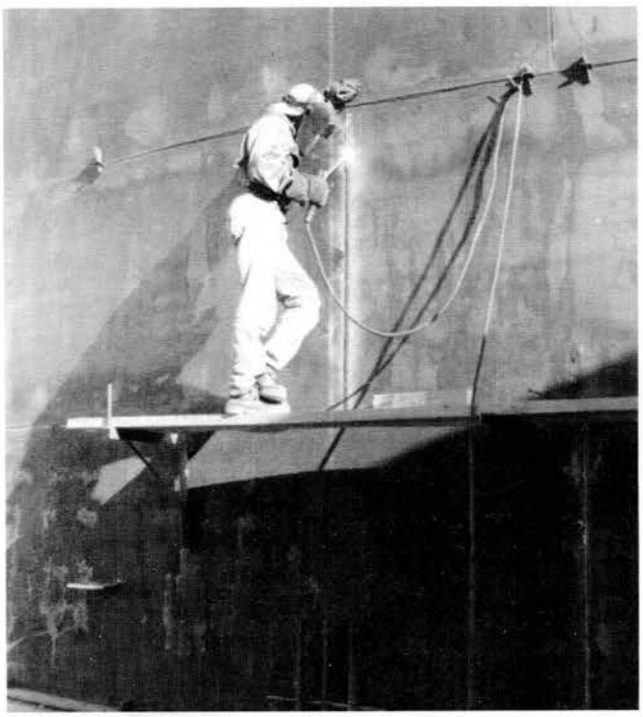
۱ ـ ۶ جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار (SMAW)

جوشکاری دستی متداول‌ترین فرآیند جوشکاری در کارگاه‌های ساختمانی است که در تمام حالات تخت، افقی، سربالا و سقفی قابل اجرا می‌باشد. وسایل مورد نیاز آن شامل مولد، مدار، انبر، ماسک، الکترود روکش‌دار و جوشکار ماهر می‌باشد. کیفیت جوش حاصل بستگی به‌مهارت جوشکار، نوع الکترود و روکش آن و سایر تجهیزات جوشکاری دارد.

صدالبته مهارت جوشکار و نحوهٔ آموزش جوشکار، اهمیت اول را دارد. سایر تجهیزات لازم برای جوشکاری دستی شامل چکش گِل‌زن، برس، گرم‌کن الکترود و لوله دمیدن هوا برای زدودن گرد و غبار درز جوش است.

در شکل ۱ ـ ۳ تصاویری از جوشکاری دستی ارایه شده است. عیب عمده این روش سرعت کم و هزینه دستمزد و وقت‌گیر بودن عملیات و گِل‌برداری بین عبورهای پی در پی نوار جوش است.

(الف) جوشکاری دستی در حالت تخت



(ب) جوشکاری دستی در حالت سر بالا

شکل ۱ ـ ۳ جوشکاری دستی.

در شکل ۱ ـ ۴ نیز تجهیزات جوشکاری دستی به‌نمایش درآمده است. تجهیزات نشان داده شده شامل مولد، کابل و گیره اتصال، کابل انبر، و الکترود روکش‌دار می‌باشد.

روکش الکترود به‌طور مستقیم در فرآیند جوش دخالت ندارد، لیکن نقش بسیار عمده‌ای در افزایش سهولت و کیفیت جوشکاری دارد. در فصل سوم این موضوع به‌طور کامل مورد توجه قرار خواهد گرفت، لیکن در حدی که برای ادامه بحث لازم است، باید توضیحاتی ارایه گردد. روکش در حین جوشکاری به‌همراه الکترود ذوب شده و پس از سرد شدن به‌صورت لایه‌ای روی نوار جوش می‌بندد. وجود این لایه، از اکسیداسیون نوار جوش، و سرد شدن سریع آن جلوگیری کرده و باعث افزایش کیفیت جوشکاری می‌شود. در سایر فرآیندهای جوشکاری این روکش باید به‌نحو دیگری تأمین گردد.

شکل ۱ ـ ۴ تجهیزات جوشکاری دستی شامل مولد، کابل اتصال به‌فلز پایه، کابل انبر، انبر و الکترود روکش‌دار.

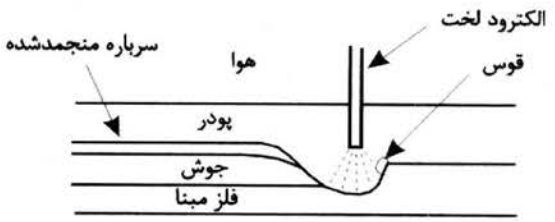
۱ ـ ۷ جوش زیرپودری (SAW)

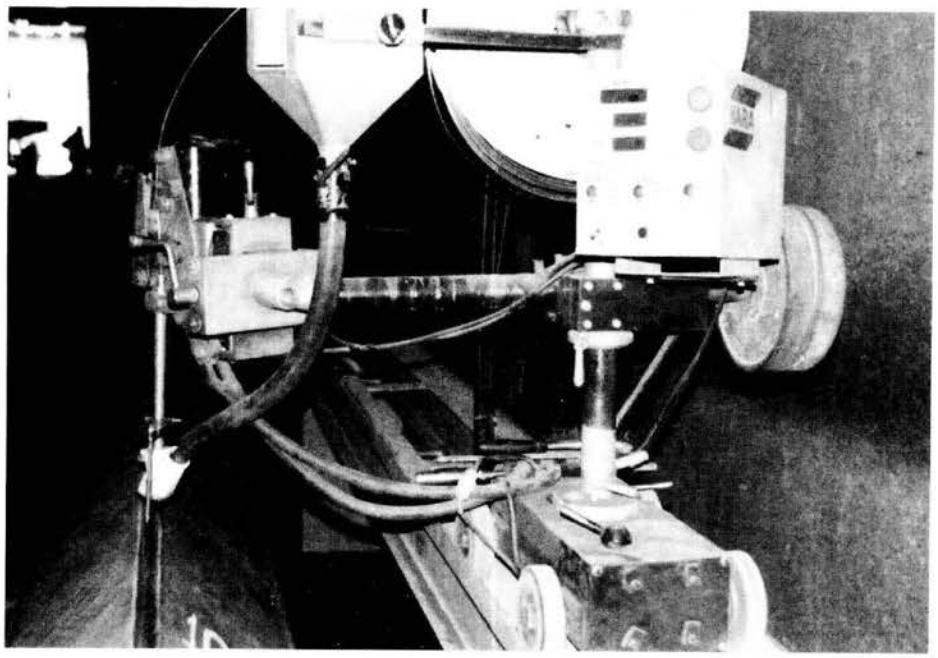
جوش زیرپودری یک روش خودکار است. در جوشکاری به‌روش زیرپودری، ماده حفاظت‌کننده جوش، به‌صورت پودر روی درز ریخته می‌شود. به‌فاصله کمی پشت نازل پودر، قوس الکتریکی توسط الکترود لخت و در زیر این پودر برقرار می‌گردد. در حین جوشکاری، قوس زیرپودر برقرار شده و حرقه جوشکاری مشاهده نمی‌شود و نیازی به‌استفاده از ماسک برای اپراتور نیست و تنها عینک محافظ صنعتی کفایت می‌کند (شکل ۱ ـ ۵).

الکترود فلزی لخت که در این نوع جوشکاری از آن استفاده می‌شود، به‌مصرف پُر کردن درز می‌رسد. نوار جوش توسط گل جوشکاری که از پودرهای ذوب‌شده ایجاد شده و روی آن لایه دیگری از پودر ذوب نشده به‌صورت دانه‌ای قرار دارد، حفاظت می‌شود. پودر ذوب‌نشده قابل بازیابی است.

پودر که عامل مشخصه این روش جوشکاری است روکشی ایجاد می‌کند که اجازه می‌دهد عمل جوشکاری بدون پاشیدگی، جرقه زدن و یا ایجاد دود انجام پذیرد. پودر دانه‌ای معمولاً به‌طور خودکار روی خط جوش و در پیشاپیش الکترود که در حال حرکت به‌جلو می‌باشد، ریخته می‌شود. این ماده حوضچه مذاب را در مقابل گازهای هوا محافظت نموده و به‌تمیزی فلز جوش کمک می‌کند و در ضمن خواص شیمیایی فلز جوش را نیز بهبود می‌بخشد.

جوشکاری به‌روش قوس زیرپودری اغلب به‌صورت تخت برای جوشکاری کارخانه‌ای در حالت خودکار و یا نیمه‌خودکار مورد استفاده قرار می‌گیرد. (شکل ۱ ـ ۵)



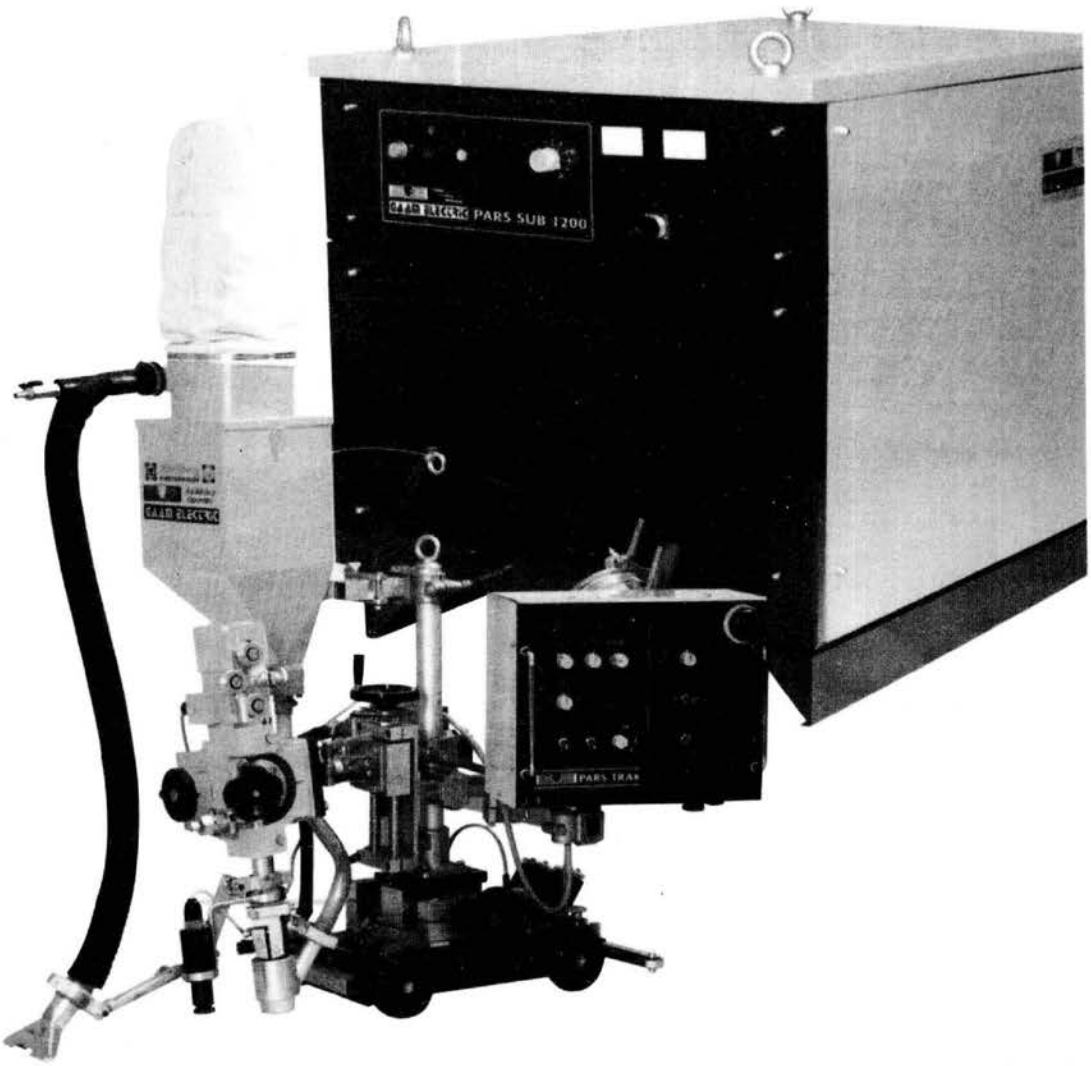


شکل ۱ ـ ۵ جوش زیرپودری.

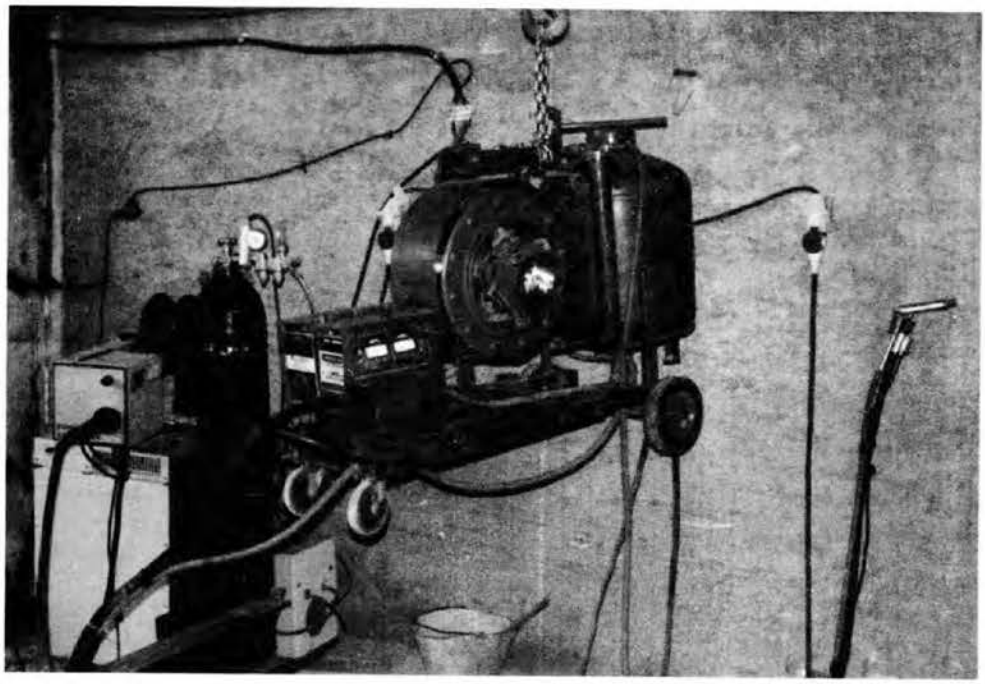
وسایل جوش زیرپودری

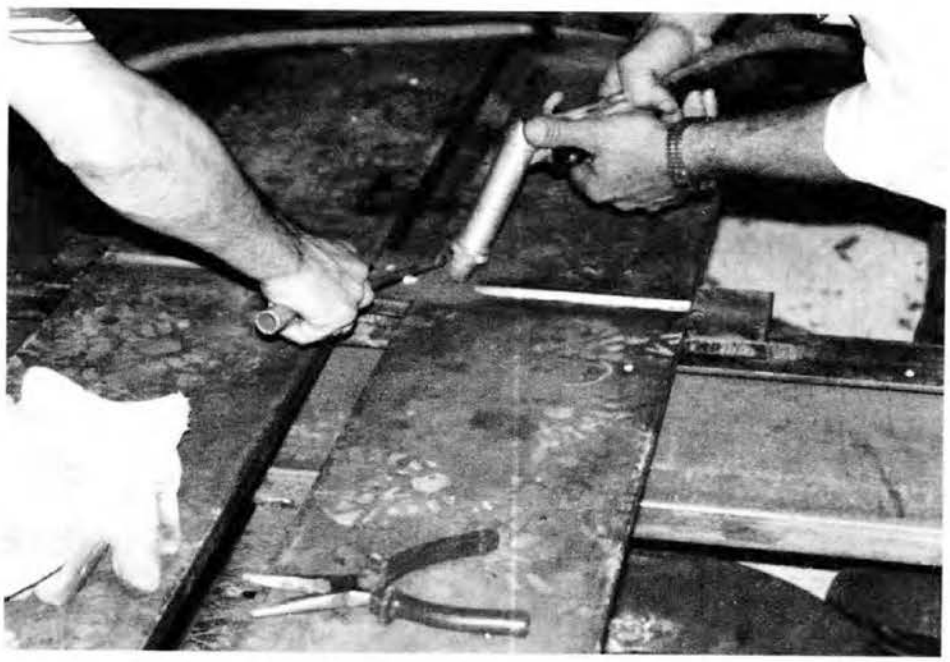
در شکل‌های ۱ ـ ۶ و ۱ ـ ۷ تجهیزات لازم برای جوشکاری زیرپودری نشان داده شده است. این وسایل مشتمل هستند بر:

۱. مولد
۲. مخزن پودر
۳. نازل پودر
۴. انبر
۵. سیستم نگهداری و هدایت الکترود لخت
۶. روبات هدایت انبر و ریل‌های مربوطه

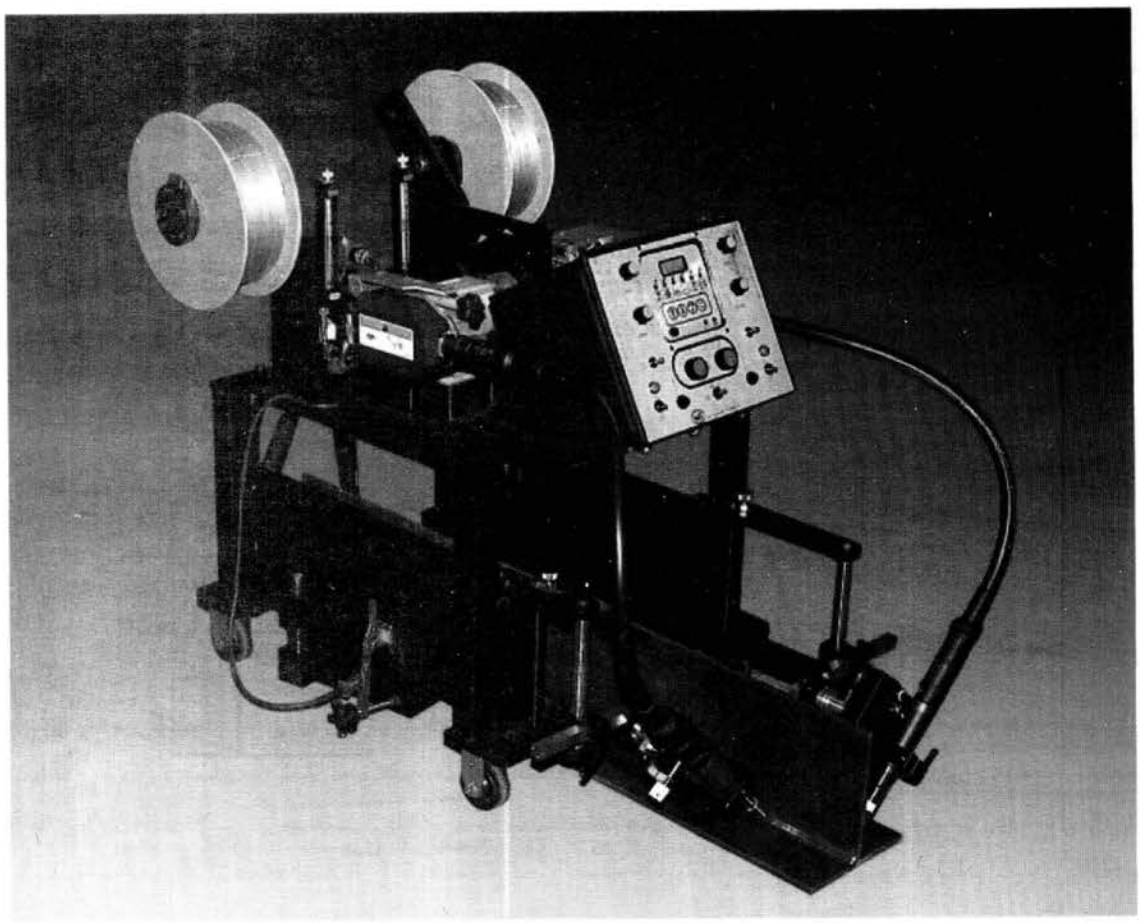


شکل ۱ ـ ۶ تجهیزات جوشکاری زیرپودری.





شکل ۱ ـ ۷ جوشکاری زیرپودری نیمه‌خودکار ـ نازل پودر در اطراف الکترود قرار دارد.



شکل ۱ ـ ۸ تجهیزات جوشکاری زیرپودری با دو نازل جوشکاری.

۱ ـ ۸ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی[6]

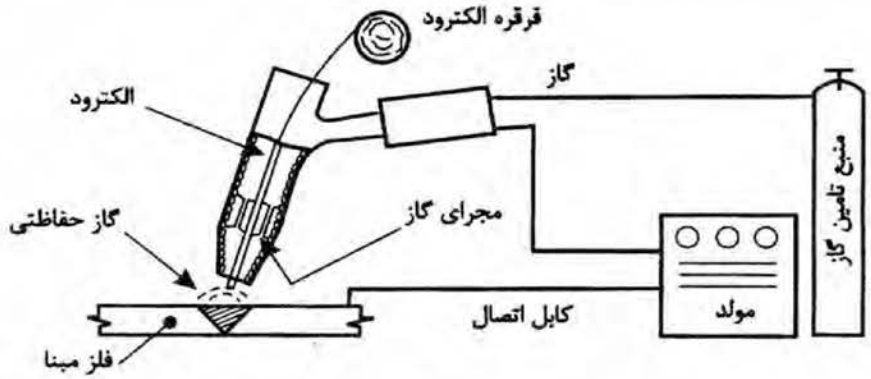
جوش تحت حفاظت گاز فرآیندی است قوسی که در آن الکترود مصرفی، که تحت پوشش گاز محافظ قرار دارد، به‌صورت خودکار تغذیه می‌گردد. از آنجا که خصوصیات الکترود قوس و سرعت رسوب، به‌صورت خودکار تنظیم می‌شوند، تنها سرعت انتقال، هدایت و تنظیم مکان انبر مخصوص جوشکاری[7] است که به‌صورت دستی و توسط جوشکار انجام می‌گیرد.

در این روش الکترود مفتول لخت و پیوسته‌ای است که از میان گیره الکترود گذشته و با یک قرقره تغذیه می‌شود (شکل ۱ ـ ۹). حفاظت در این روش با سپری از گاز غیرفعال (نظیر آرگون) و یا فعال (نظیر CO_2) صورت می‌گیرد.

بعضی از خصوصیات این روش جوشکاری به‌قرار زیر می‌باشند:

6. *GMAW*
7. *Gun*

۱. حرارت ایجادشده نسبت به‌سایر روش‌ها کمتر است، در نتیجه اعوجاج جوشکاری کمتر است.
۲. تغذیه پیوسته سیم جوش
۳. نرخ ترسیب زیاد در نوار جوش
۴. عدم وجود سرباره و در نتیجه عدم نیاز به‌تمیزکاری جوش
۵. عدم نفوذ هیدروژن در نوار جوش
۶. جوشکاری تحت حفاظت گاز باید در محیط‌های بسته و کارخانه‌ای و بدون وزش باد انجام گیرد، لیکن در وضعیت‌های مختلف به‌صورت نیمه‌خودکار قابل استفاده است.



شکل ۱ ـ ۹ جوش قوس الکتریکی تحت حفاظت گاز.

تمام توابع فرآیند توسط تجهیزات زیر کنترل می‌شوند:
۱ ـ انبر مخصوص جوشکاری و کابل‌ها
۲ ـ واحد تغذیه سیم جوش
۳ ـ کپسول گاز CO_2 (و یا ترکیبی از CO_2 و آرگون)
۴ ـ مولد

انبر مخصوص جوشکاری و کابل‌ها سه وظیفه دارند:
۱ ـ از طریق آنها گاز وارد منطقه قوس می‌شود.
۲ ـ الکترود مصرفی به‌مجرای اتصال هدایت می‌گردد.
۳ ـ انرژی الکتریکی به‌مجرای اتصال متصل می‌شود.

خصوصیات جوش تحت حفاظت گاز را می‌توان توسط چهار مدل اصلی انتقال فلز به‌خوبی توضیح داد:
انتقال اسپری محوری، انتقال قطره‌ای، انتقال پالسی و انتقال کوتاه.
منظور از مدل انتقال فلز، نحوهٔ جدا شدن قطرات مذاب از نوک الکترود و انتقال آنها به‌حوضچهٔ مذاب می‌باشد. هر کدام از مدل‌های انتقال فلز مشخصات متفاوتی دارند به‌طوری‌که می‌توان هر یک از آنها را به‌عنوان یک فرآیند

جوشکاری متفاوت تلقی نمود. مدل انتقال فلز به‌فاکتورهایی از قبیل میزان ولتاژ و شدت جریان، نوع گاز محافظ مورد استفاده و مشخصات منبع قدرت بستگی دارد.

یکی از وجوه تمایز بین مدل‌های فوق، اختلاف در میزان حرارت ورودی به‌قطعه کار می‌باشد. حالت اسپری بیشترین حرارت ورودی را ایجاد می‌کند، پس از آن حالت پالسی، حالت قطره‌ای و در نهایت حالت قوس کوتاه می‌باشد. بنابراین انتخاب مدل اسپری جهت جوشکاری مقاطع ضخیم با سرعت بالا مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد، اگرچه با این قوس امکان جوشکاری فقط در وضعیت تخت میسر می‌باشد. امکان جوشکاری در حالت اتصال کوتاه در تمام وضعیت‌ها وجود دارد، ولی جهت جوشکاری مقاطع ضخیم به‌دلیل کم بودن میزان انرژی قوس، احتمال بروز ذوب ناقص زیاد می‌باشد.

جهت کسب اطلاعات تکمیلی می‌توانید به‌کتب مرجع مرتبط با این روش جوشکاری مانند کتاب تکنولوژی بازرسی جوش مراجعه نمایید.

در جدول ۱ ـ ۱ اطلاعاتی در خصوص انتخاب نوع گاز محافظ با توجه به‌مصالح مصرفی ارایه شده است.

۱ ـ ۹ جوش تحت حفاظت گاز با الکترود توپودری

این فرآیند شبیه جوشکاری تحت حفاظت گاز است، با این تفاوت که الکترود ممتد آن لوله‌ای‌شکل بوده، و در مغزه خود مقدار محدودی پودر دارد. این ماده همان نقشی را به‌عهده دارد که روکش در روش جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار و یا پودر در روش جوش زیرپودری به‌عهده داشتند. در الکترودهای ممتد قرقره پیچ حفظ روکش بر روی سیم امکان ندارد. به‌این جهت پودر در مغز الکترود جاسازی می‌شود. در این حالت حفاظت هم به‌وسیله گاز و هم پودر داخل الکترود انجام می‌شود (شکل ۱ ـ ۱۱).

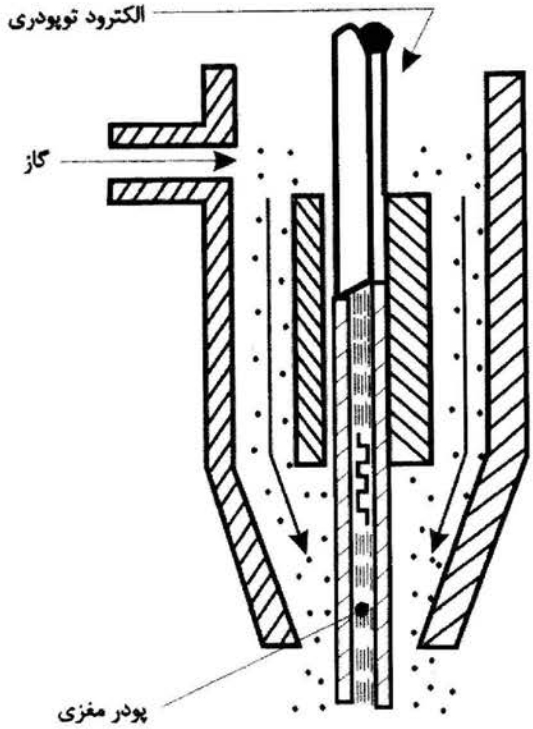
در جوشکاری قوسی با الکترودهای توپودری[8]، حرارت جوشکاری از طریق ایجاد قوس الکتریکی بین الکترود پرکننده پیوسته و قطعه کار تأمین می‌شود. خصوصیت منحصر به‌فرد این فرآیند، استفاده از الکترودهای توپودری می‌باشد.

جوشکاری قوسی با الکترود توپودری دو حالت مختلف دارد. در فرآیند FCAW با حفاظت گازی (شکل ۱ ـ ۱۲ ـ الف)، از یک گاز خارجی برای حفاظت قوس در برابر نیتروژن و اکسیژن موجود در اتمسفر استفاده می‌شود. به‌طور کلی قسمت‌های تشکیل‌دهنده مرکز الکترودهای مورد استفاده در این روش، حاوی تشکیل‌دهنده‌های سرباره، اکسیژن‌زداها، پایدارکننده‌های قوس و عناصر آلیاژی می‌باشند.

در فرآیند FCAW با الکترودهای خودمحافظ[9] (شکل ۱ ـ ۱۲ ـ ب)، اجزای هسته الکترود فلز جوش را بدون حفاظت خارجی، از اتمسفر محافظت می‌کنند. در برخی الکترودهای خودمحافظ، گاز حفاظتی از طریق تجزیه اجزای پودر درون الکترود ایجاد می‌شود. در برخی موارد دیگر، حفاظت از طریق سرباره صورت می‌گیرد و قطره‌های فلز مذاب از قوس عبور می‌کنند و حوضچه جوش توسط پوشش سرباره در مقابل اتمسفر محافظت می‌شود. در بسیاری از الکترودهای خودمحافظ، مقادیری از مواد اکسیژن‌زدا و نیتروژن‌زدا نیز وجود دارد که به‌ایجاد فلز جوش بدون عیب کمک می‌کند. الکترودهای خود محافظ می‌توانند حاوی پایدارکننده قوس و عناصر آلیاژی نیز باشند.

8. *Flux-Cored Arc Welding (FCAW)*
9. *Self Shielded FCAW*

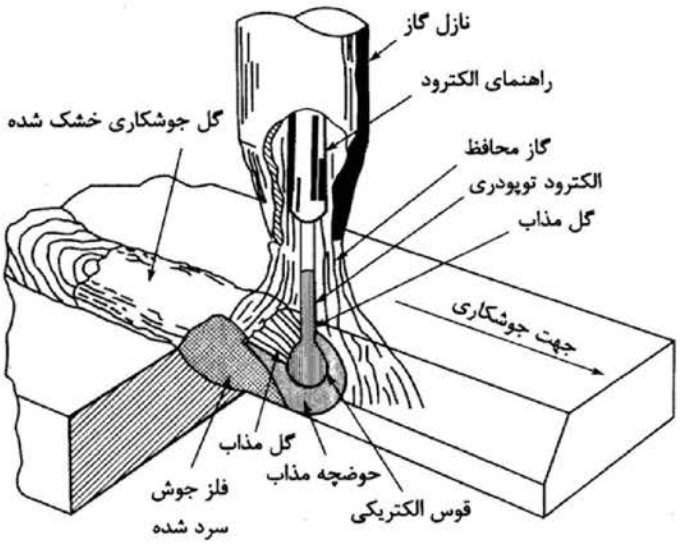
شکل ۱ ـ ۱۰ تجهیزات جوش قوس الکتریکی تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی (GMAW).



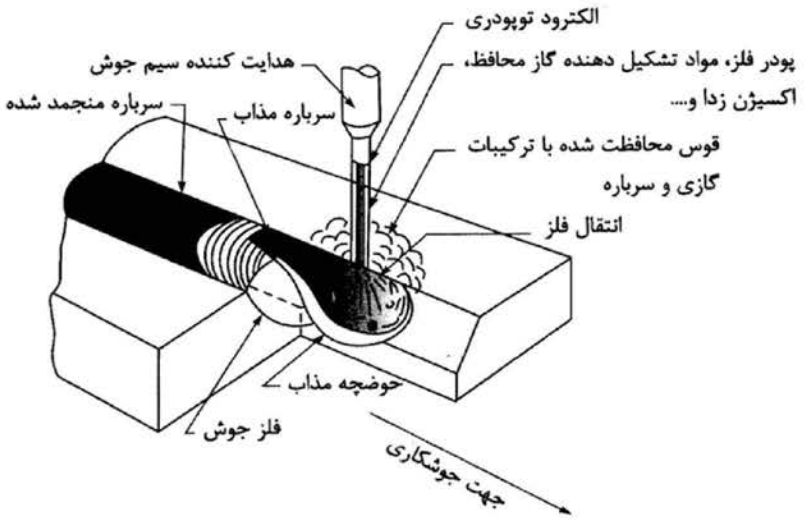
شکل ۱ ـ ۱۱ نازل برای جوشکاری با الکترود توپودری.

جدول ۱ ـ ۱ انتخاب روش گاز محافظ در فرآیندهای جوش قوس الکتریکی تحت حفاظت گاز

مصالح مصرفی	گاز محافظ						روش		قطبیت
	آرگون	هلیم	CO_2	O_2	H_2	N_2	GTAW	GMAW	
فولاد نرمه	۱۰۰						*		DCSP
	۸۰ تا ۷۵		۲۵ تا ۲۰					*	DCRP
		۱۰۰					*A		DCRP
			۱۰۰					*	DCRP
	۹۸			۲				*	DCRP
فولاد کم آلیاژ	۹۷			۳				*	DCRP
	۹۵			۵				*	DCRP
	۸۰				۲۰				DCRP
	۸۰		۲۰						DCRP
فولاد ضدزنگ	۹۹			۱				*	DCRP
	۹۵			۵				*	DCSP
	۸۰				۲۰		*		DCSP
	۱۰۰						*		DCSP
		۱۰۰					*A		DCSP



الف ـ فرآیند جوشکاری قوسی با الکترود توپودری تحت حفاظت گاز



شکل ۱ ـ ۱۲ انواع فرآیندها با جوشکاری با الکترود توپودری.

فرآیند توپودری با داشتن بازدهی بالا در جوشکاری پیوسته و مزایای وجود پودر، نسبت به‌دیگر فرآیندهای جوشکاری برتری‌هایی دارد. این برتری‌ها عبارتند از:

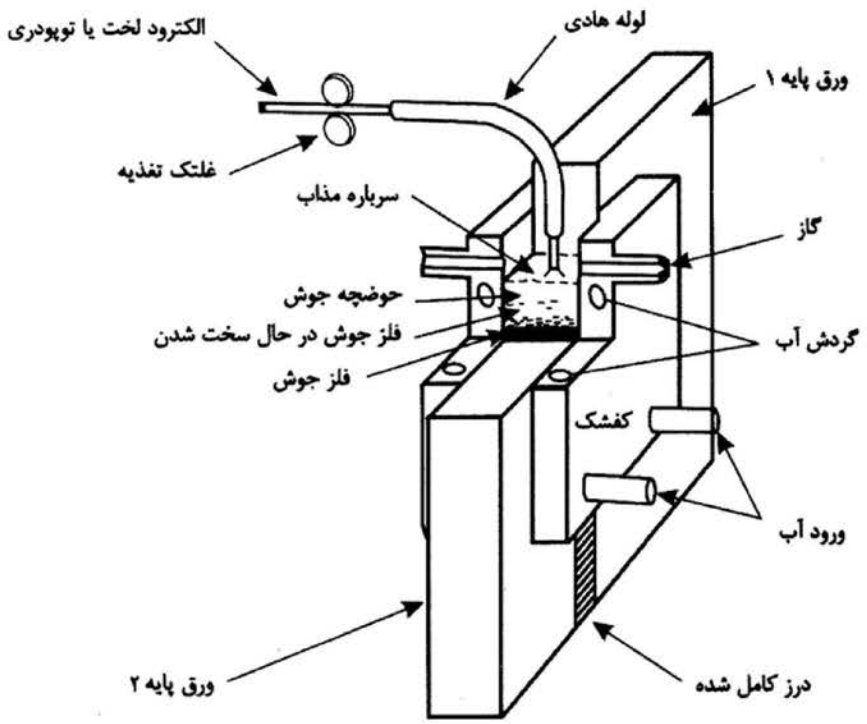
- سرعت رسوب بالا برای جوشکاری در همه وضعیت‌ها
- نیاز به‌مهارت کمتر جوشکاری نسبت به‌فرآیند GMAW

- ساده‌تر بودن نسبت به‌جوشکاری قوسی زیرپودری (SAW)
- ایجاد نفوذ عمیق‌تر نسبت به‌فرآیند جوشکاری قوسی با الکترود دستی (SMAW)
- حساسیت کمتر به‌آلودگی و زنگ زدن، نسبت به‌فرآیند جوشکاری قوسی با حفاظت گاز (GMAW)

۱ـ۱۰ جوشکاری گاز الکتریکی و سرباره الکتریکی

۱ـ۱۰ـ۱ جوش گاز الکتریکی[10] (EGW)

همان‌طور که شکل ۱ ـ ۱۳ نشان می‌دهد، جوشکاری گاز الکتریکی، روش ماشینی خودکار برای جوشکاری درزها در وضعیت قائم است. در این روش هم از الکترود ممتد لخت و هم از الکترود توپودری می‌توان استفاده نمود. این روش قادر به‌پُر کردن درز جوش ورق‌های ضخیم با یک بار عبور می‌باشد. شیار جوش از دو طرف توسط دو کفشک که توسط جریان آب خنک نگه داشته می‌شود، احاطه می‌شود. کفشک همراه با پیشرفت جوشکاری، به‌سمت بالا حرکت می‌کند. در نتیجه حوضچه مذاب از دو طرف به‌طور کامل محصور شده و از ریزش آن جلوگیری می‌شود. جوش را می‌توان با دمیدن گاز و یا استفاده از الکترود توپودری محافظت نمود.

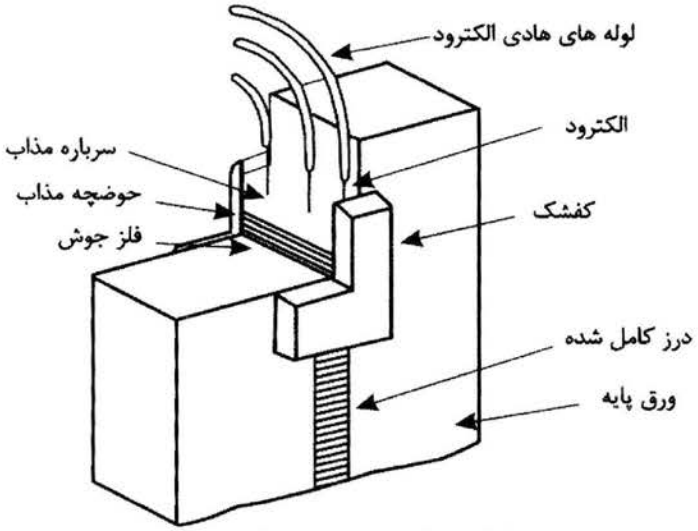


شکل ۱ ـ ۱۳ جوشکاری گاز الکتریکی.

10. *Electro Gas Weldings*

۱ ـ ۱۰ ـ ۲ جوشکاری سرباره الکتریکی (ESW)

همان‌طور که شکل ۱ ـ ۱۴ نشان می‌دهد، جوشکاری سرباره الکتریکی مشابه جوشکاری گاز الکتریکی است. با این تفاوت که جوشکاری به‌کمک حرارت حاصل از مقاومت سرباره جوش در مقابل جریان الکتریکی صورت می‌گیرد و سرباره مذاب باعث محافظت جوش شده و از طرف دیگر باعث ذوب مفتول و لبه‌های ورق می‌شود. سرباره در حالت جامد هادی الکتریسیته نیست، در نتیجه برای شروع جوشکاری به‌حرارت قوس الکتریکی برای ذوب سرباره نیاز است. اما با توجه به‌اینکه عملیات اصلی جوشکاری به‌واسطه حرارت حاصل از مقاومت سرباره در مقابل جریان الکتریکی صورت می‌گیرد، این جوش در حقیقت جوش قوس الکتریکی نیست. کفشک‌های هادی جوش می‌توانند به‌صورت مصرف‌شدنی یا مصرف‌نشدنی باشند. با این روش می‌توان درز با هر ضخامتی را با یک بار عبور جوش نمود. به‌طور اصولی جوشکاری گاز الکتریکی و سرباره الکتریکی برای درزها با ضخامت زیاد توجیه اقتصادی دارند. به‌واسطه سرعت کم پیشروی جوشکاری، نوار جوش حاصل دارای بافت درشتی بوده و در نتیجه طاقت نمونه زخم‌دار آن کم خواهد بود.



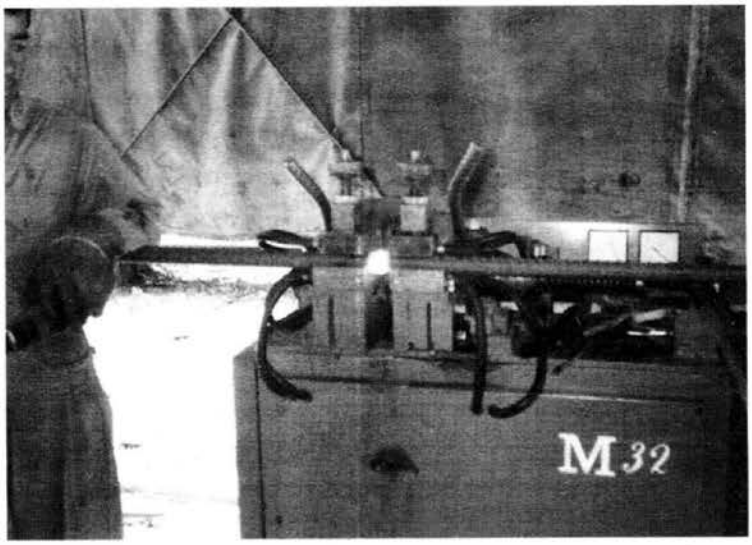
شکل ۱ ـ ۱۴ جوش سرباره الکتریکی.

۱ ـ ۱۱ جوش خمیری

جوش خمیری در صنعت ساختمان اغلب برای جوشکاری میلگردها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش دوسر میلگرد که هرکدام به‌قطبی از مولد متصل شده‌اند، به‌یکدیگر نزدیک می‌شوند. با برقراری قوس الکتریکی، دوسر میلگردها داغ و سرخ می‌شوند. در این لحظه دو سر میلگرد به‌هم فشرده می‌شوند تا امتزاج کامل حاصل گردد.

۱ ـ ۱۲ جوشکاری گل میخ

فرآیند جوشکاری قوسی گل‌میخ از رایج‌ترین فرآیندهای جوشکاری گل‌میخ‌های فلزی به‌فلز پایه می‌باشد، که از لحاظ



شکل ۱ ـ ۱۵ جوش خمیری.

ساختاری مشابه روش SMAW است. در این فرآیند گل‌میخ فلزی به‌عنوان الکترود عمل نموده و قوس الکتریکی بین نوک گل‌میخ و سطح ورق ایجاد می‌شود که منجر به‌ذوب و ممزوج شدن گل‌میخ با ورق فولادی می‌گردد. گل‌میخ در داخل یک انبر تپانچه‌ای شکل قرار گرفته و جهت محافظت منطقهٔ جوش از یک قطعه حلقوی سرامیکی استفاده می‌شود. پس از برقراری قوس در یک زمان مشخص انبر تپانچه‌ای شکل، گل‌میخ را به‌سمت حوضچهٔ مذاب فشار داده و فرآیند جوشکاری به‌اتمام می‌رسد. در این فرآیند علاوه‌بر ذوب کل مقطع گل‌میخ، یک جوش گوشه ظریف هم اطراف گل‌میخ ایجاد می‌شود. مدت زمان کل فرآیند کمتر از یک ثانیه می‌باشد. (شکل ۱ ـ ۱۶).

شکل ۱ ـ ۱۶ جوشکاری گل‌میخ به‌روش قوسی با انبر تپانچه‌ای شکل در کارگاه.

۱ ـ ۱۳ وضعیت‌های جوشکاری

برحسب وضعیت قطعه مورد جوش و الکترود نسبت به‌هم چهار وضعیت جوشکاری وجود دارد:

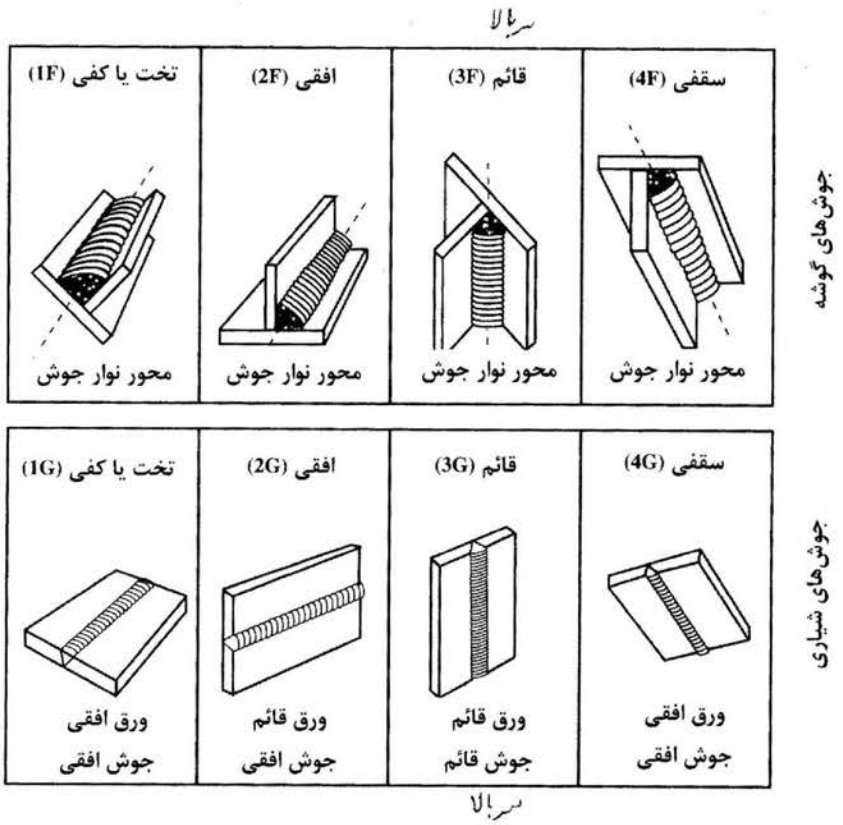
وضعیت تخت یا کفی (با علامت 1F در جوش گوشه و 1G در جوش شیاری)؛

وضعیت افقی (با علامت 2F در جوش گوشه و 2G در جوش شیاری)؛

وضعیت سربالا (با علامت 3F در جوش گوشه و 3G در جوش شیاری)؛

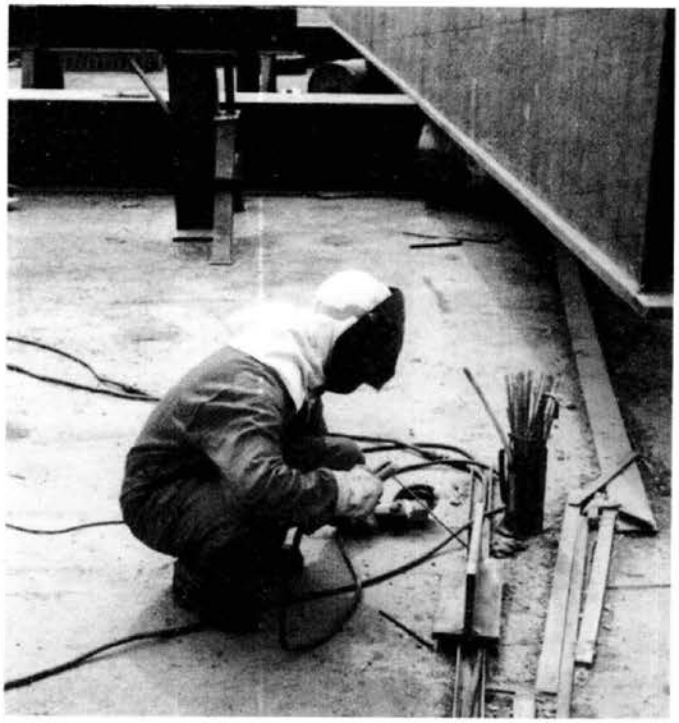
وضعیت سقفی (با علامت 4F در جوش گوشه و 4G در جوش شیاری)؛

جوشکاری در وضعیت تخت ساده‌ترین و در وضعیت سقفی، مشکل‌ترین می‌باشد.



شکل ۱ ـ ۱۷ وضعیت‌های جوشکاری.

(الف) جوشکار حین جوشکاری تخت



(ب) جوشکار حین جوشکاری افقی

شکل ۱ ـ ۱۸ وضعیت‌های جوشکاری.

(پ) جوشکار حین جوشکاری سربالا

(ت) جوشکار حین جوشکاری سقفی

شکل ۱ ـ ۱۸ وضعیت‌های جوشکاری. (ادامه)

۱ ـ ۱۴ اتصالات جوشی

برای برقراری اتصال، قطعات فلز پایه در حالات مختلفی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. به‌این حالات اتصال گفته می‌شود. انواع اتصالات جوشی به‌قرار ذیل می‌باشد:

الف) اتصال لب به‌لب

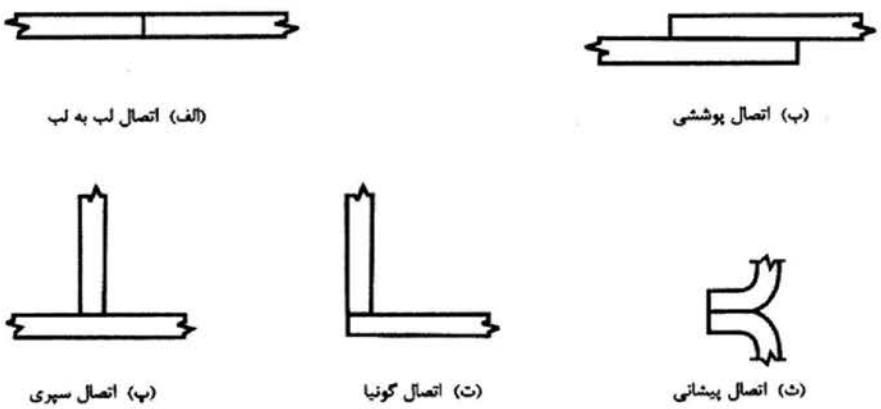
ب) اتصال پوششی (رویهم)

پ) اتصال سپری

ت) اتصال گونیا

ث) اتصال پیشانی

در شکل ۱ ـ ۱۹ انواع اتصالات جوشی نشان داده شده است.



شکل ۱ ـ ۱۹ انواع اتصال جوشی.

۱ ـ ۱۵ انواع جوش

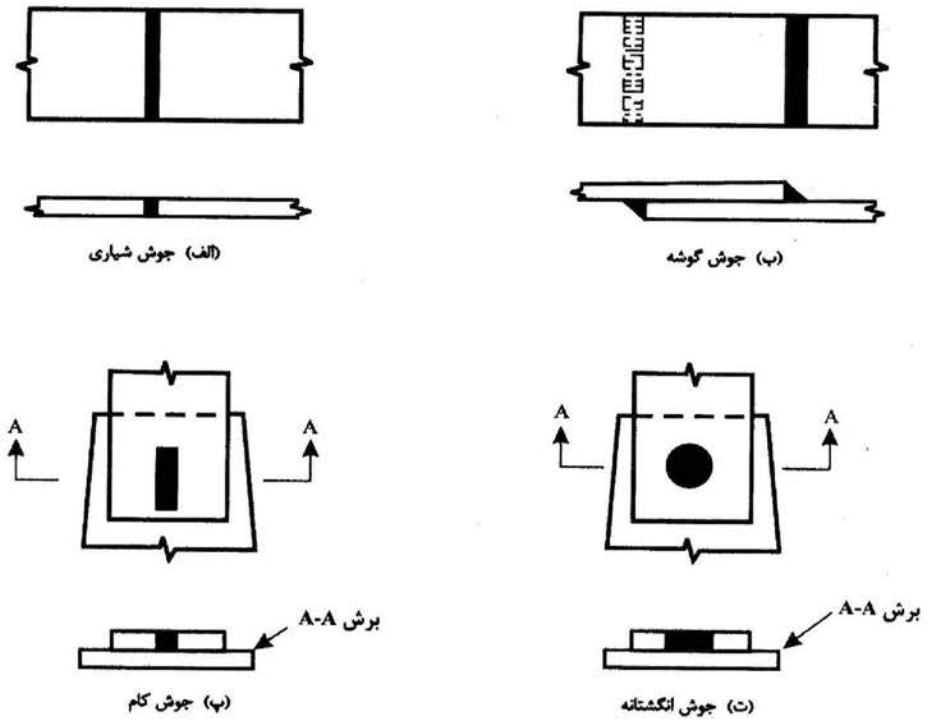
در شکل ۱ ـ ۲۰ انواع جوش نشان داده شده است که عبارتند از:

الف) جوش شیاری

ب) جوش گوشه

پ) جوش کام

ت) جوش انگشتانه

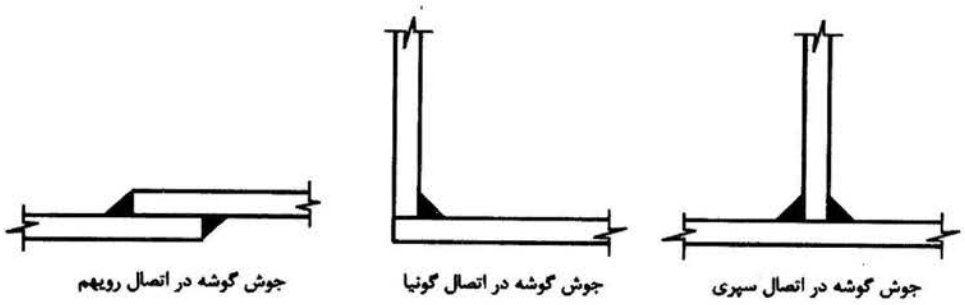


شکل ۱ ـ ۲۰ انواع جوش.

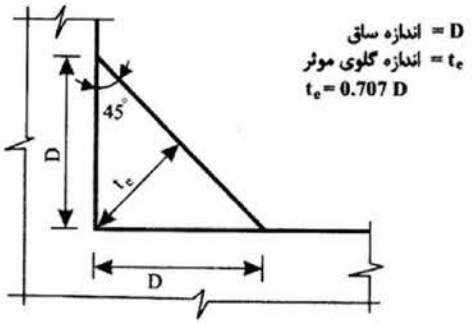
جوش گوشه

جوش گوشه متداول‌ترین جوش در ساختمان‌های فولادی است. از این جوش می‌توان در اتصال رویهم، اتصال سپری و اتصال گونیا از شکل ۱ ـ ۱۹ استفاده کرد که نتیجه آن در شکل ۱ ـ ۲۱ نشان داده شده است. در شکل ۱ ـ ۲۲ مشخصات هندسی جوش گوشه با دو ساق مساوی نشان داده شده است. در این شکل به‌اختلاف بین اندازه گلو و اندازه ساق توجه داشته باشید. اگر t_e اندازه گلو و D اندازه ساق جوش گوشه باشد، داریم:

$$t_e=0.707D \qquad (۱ - ۱)$$



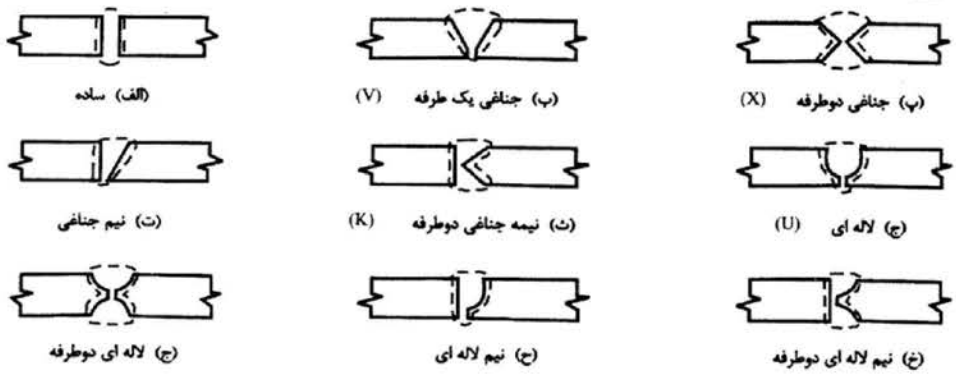
شکل ۱ ـ ۲۱ انواع جوش گوشه در اتصالات مختلف.



شکل ۱ ـ ۲۲ هندسه نوارجوش گوشه با ساق‌های مساوی.

جوش شیاری

از جوش شیاری برای یکسره کردن تمام قدرت ورق‌ها و برقراری درز جوش‌های تمام‌قدرت استفاده می‌شود. برای انجام جوش شیاری در دو لبه مجاور هم، لازم است لبه‌های کار به‌منظور نفوذ کامل جوش آماده گردند. در شکل ۱ ـ ۲۳ انواع آماده‌سازی لبه‌ها ارایه شده است. در عمل اغلب از درز ساده و یا درزهای جناغی استفاده می‌شود.

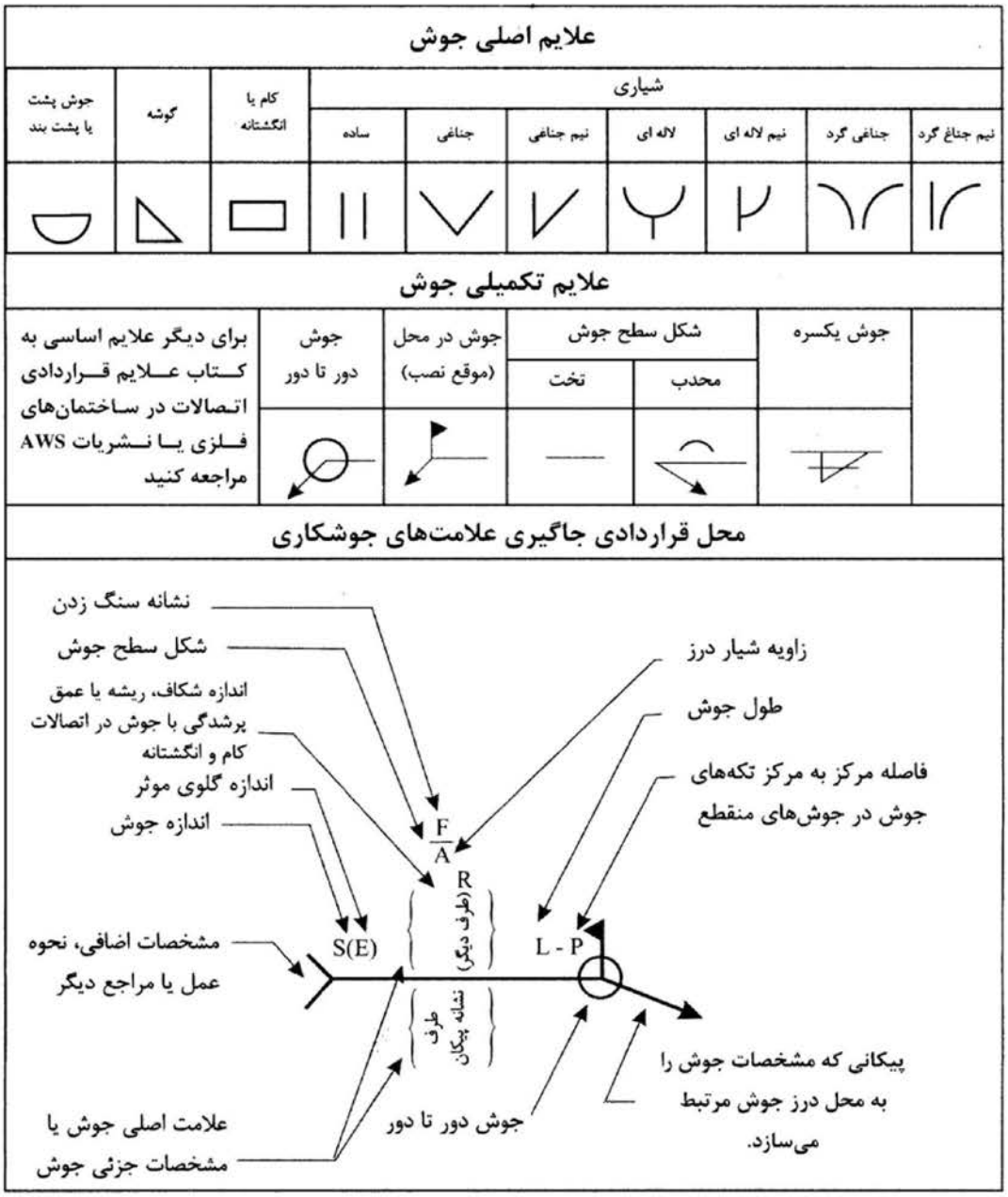


شکل ۱ ـ ۲۳ انواع جوش شیاری.

۱ ـ ۱۶ علایم جوشکاری

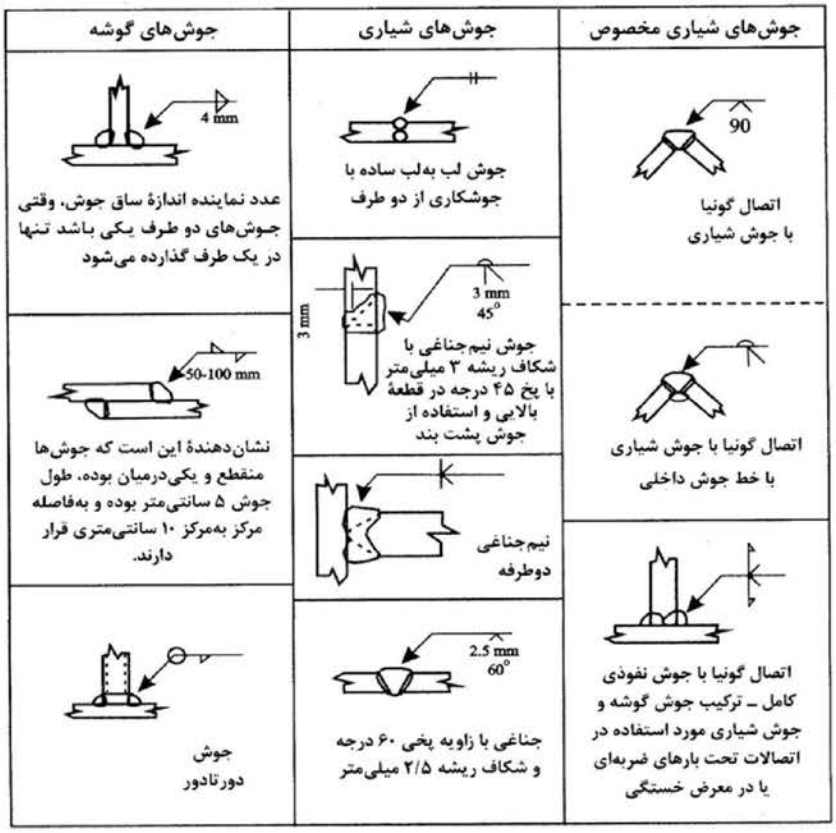
قبل از اینکه یک درز یا اتصال جوش شود، طراح باید قادر باشد به‌طریقی دستورات خود را در مورد اندازه و نوع جوش لازم، به‌نقشه‌کش و یا سازنده اتصال ارایه نماید. انواع اصلی جوش در بخش قبل مورد بحث قرار گرفت. اگر برای ساخت هر اتصال جدیدی، به‌دستورالعمل‌های اختصاصی و مشروحی احتیاج باشد، کار طراح در تهیه دستور ساخت یک اتصال، بسیار مشکل می‌شود.

نیاز به‌یک وسیله ساده و در عین حال دقیق برای برقراری تفاهم میان طراح و سازنده، به‌استفاده از علایم اختصاری که نمایشگر انواع جوش‌ها و اندازه آنهاست، رواج بخشیده است. علایم استانداردی که در شکل ۱ ـ ۲۴ به‌نمایش درآمده است، به‌خوبی هر دستورالعمل اختصاصی، مشخص‌کننده نوع، اندازه، طول و محل هر جوش می‌باشد.



شکل ۱ ـ ۲۴ پیکان جوش.

اغلب اتصالاتی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتیاج به‌دستورالعمل خاصی ندارند و به‌ترتیبی که به‌طور نمونه در شکل ۱ ـ ۲۵ نمایش داده شده مشخص می‌گردند.



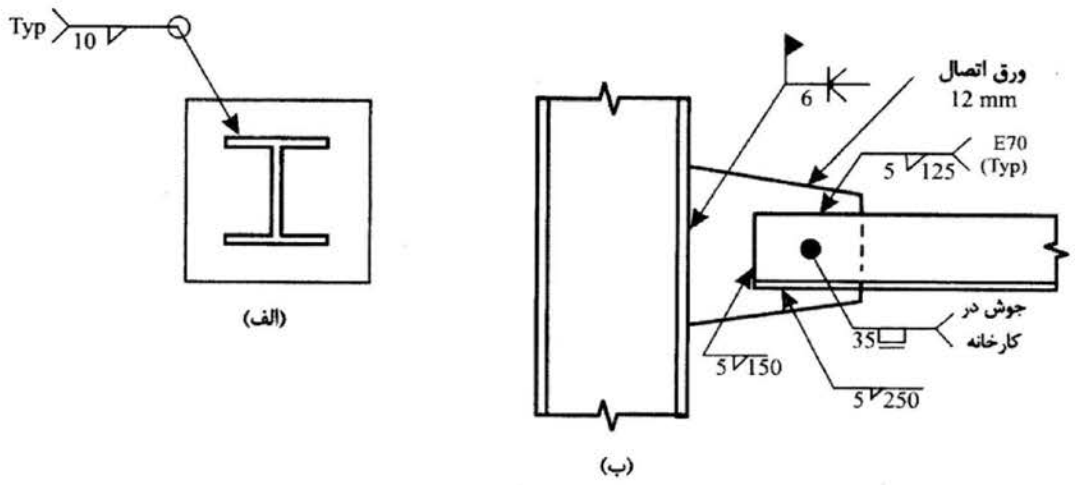
شکل ۱ ـ ۲۵ کاربرد علایم جوشکاری.

ممکن است خواننده احساس کند که تعداد علایم، بی‌جهت زیاد است، در صورتی که سیستم نمایش جوش به‌تعداد انواع اصلی تنظیم شده و با سرهم کردن آنها دستورالعمل‌های کامل تهیه می‌شود. هرگاه از یک نوع اتصال خاص در قسمت‌های مختلف یک سازه استفاده به‌عمل آید، می‌توان تنها به‌نمایش یک جزییات تیپ مانند شکل ۱ ـ ۲۶ ـ الف، بسنده کرد. هرگاه اتصالات خاص مورد استفاده قرار گیرند، باید به‌قدر کافی جزییات هریک را مشخص ساخت تا هیچ تردیدی درباره نقطه‌نظرهای طراح باقی نماند (شکل ۱ ـ ۲۶ ـ ب).

در شکل ۱ ـ ۲۶ ـ ب، طراح مشخص ساخته که جوش انگشتانه در کارخانه و بر روی زمین انجام می‌گیرد در حالی که جوش نیم‌جناغی دوطرفه که ورق اتصال را به‌ستون متصل می‌سازد، در محل کارگاه و موقع نصب اجرا می‌شود.

از آنجایی که طراح مشخص نساخته که آیا جوش گوشه متصل‌کننده نبشی به‌ورق در کارخانه یا در کارگاه و محل نصب انجام پذیرد، سازنده اسکلت فلزی آزاد خواهد بود که در این مورد تصمیم بگیرد.

در این مورد خاص بهتر است که جوش گوشه در کارخانه و قبل از نصب انجام شود. چرا که در غیر این صورت



شکل ۱ ـ ۲۶ استفاده از علایم جوش.

ممکن است جوش انگشتانه در حین عملیات نصب تحت تنش‌های اضافی قرار گیرد. عموماً به‌دلیل ملاحظات اقتصادی سازنده سعی می‌کند تا آنجا که امکان دارد جوش‌ها را در روی زمین انجام دهد. بنابراین مشخص ساختن جوش‌هایی که طراح می‌خواهد حتماً در محل نصب و پای کار انجام شود، از اهمیت بسیار برخوردار است.

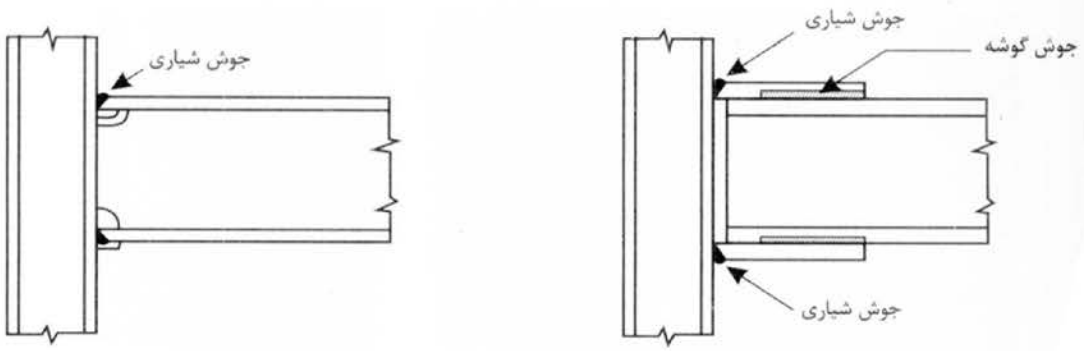
۱ ـ ۱۷ کاربرد انواع جوش در ساختمان

جوش گوشه بیشترین کاربرد را در ساختمان دارد. اغلب اتصالات شامل اتصالات نبشی‌ها، مهاربندها، ورق‌های مهاربندی توسط جوش گوشه انجام می‌شود.

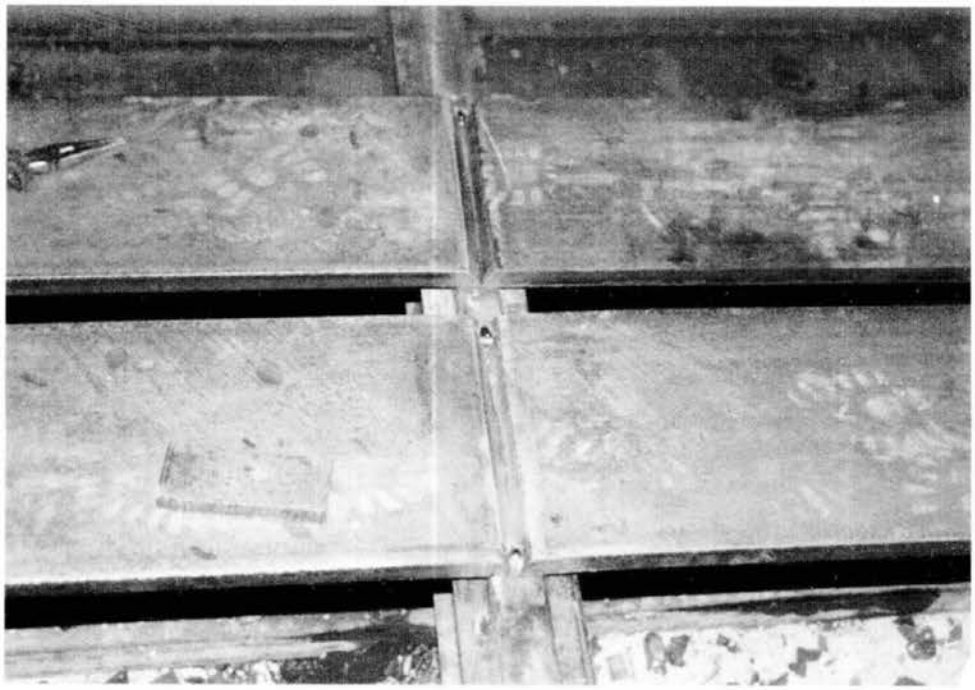
اصولاً جوش گوشه باید طوری آرایش داده شود که تحت تنش برشی قرار داده شود. جوش گوشه نباید تحت تنش‌های قائم قرار گیرد.

از جوش شیاری برای یکسره کردن ورق‌ها برای ساخت تیرورق‌ها و ستون‌های ورقی و همچنین در اتصالات صلب تیر به‌ستون برای اتصال ورق‌های زیرسری و روسری به‌ستون استفاده می‌شود.

از جوش‌های شیاری در مواقعی که جوش تحت تنش‌های قائم قرار دارد، استفاده می‌شود (شکل ۱ ـ ۲۷).

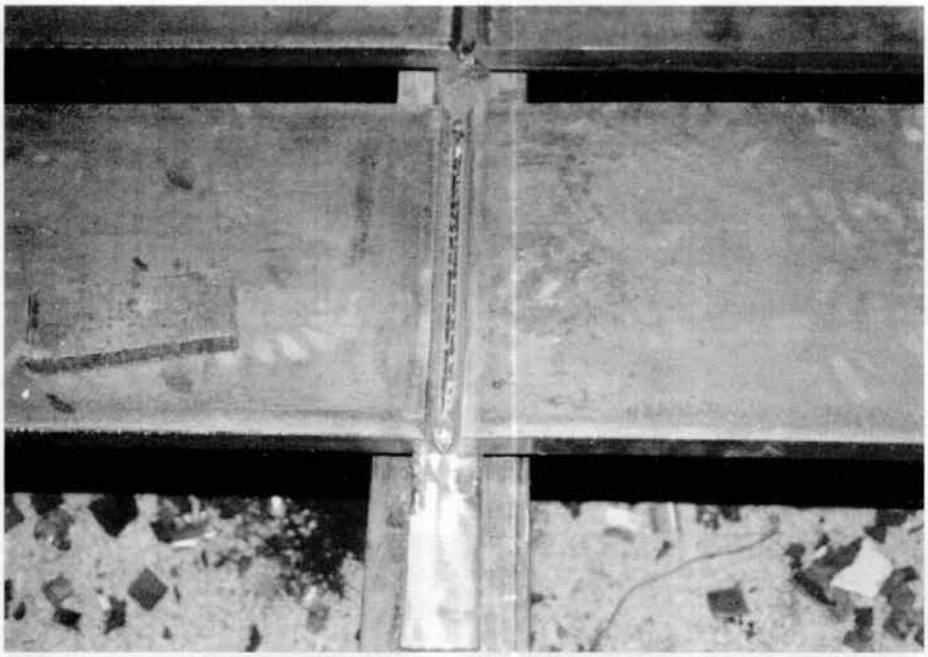


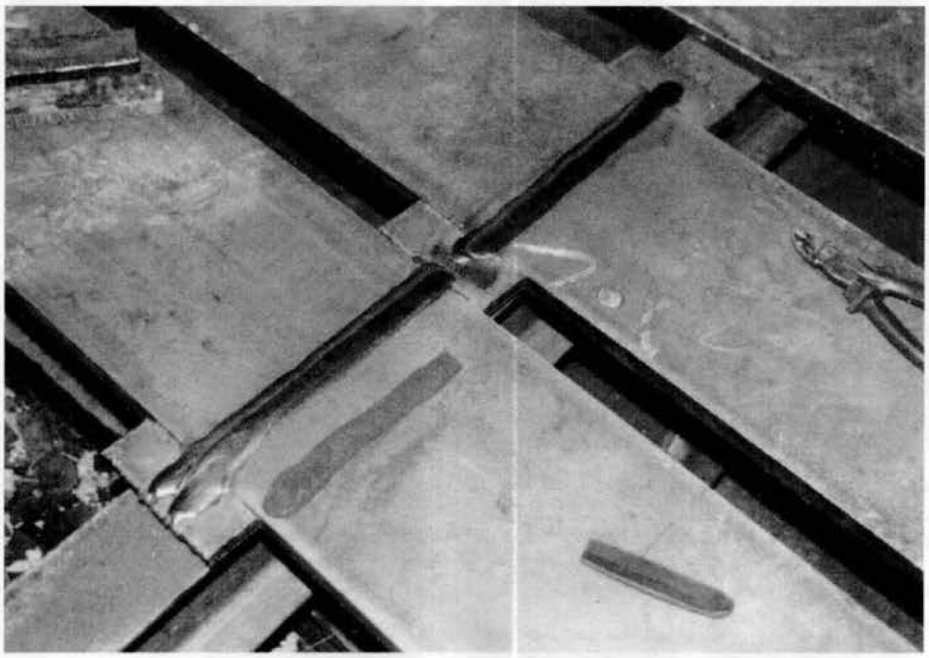
(الف) (ب)



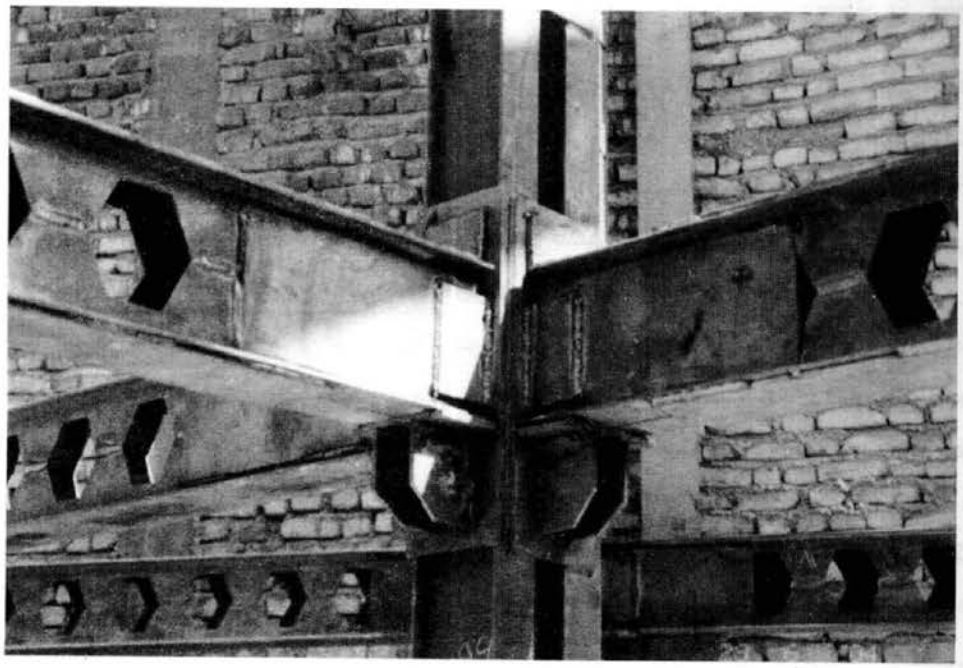
(پ) کاربرد جوش شیاری در یکسره کردن ورق‌ها در تیرورق‌ها و ستون‌های ورقی

شکل ۱ ـ ۲۷ کاربرد انواع جوش در ساختمان.





شکل ۱ ـ ۲۸ استفاده از جوش شیاری در یکسره کردن ورق‌ها.



شکل ۱ ـ ۲۹ استفاده از جوش گوشه در اتصالات مهاربند.

۱ ـ ۱۸ جوش‌پذیری

اکثر فولادهای ساختمانی را می‌توان با روش جوش قوس الکتریکی با درزهای سالم و قوی، جوش داد. جوش‌پذیری فولاد به‌صورت قابلیت سهولت در حصول جوش سالم و بدون ترک تعریف می‌شود. یک نوع فولاد وقتی قابل جوش نامیده می‌شود که بدون مخارج اضافی و مشکلات جنبی، آن را بتوان به‌صورت متعارف جوش نمود.

جوشکاری بعضی از انواع فولاد، راحت‌تر از سایر فولادها می‌باشد. از آنجایی که جوش ترکیبی از فلز الکترود و فلز پایه است، برای حصول جوش خوب، تعیین ترکیبات فلز جوش و فلز پایه، هر دو، لازم می‌باشد.

آلیاژهای غیرآهنی موجود در فولاد، عوامل عمده مؤثر بر جوش‌پذیری آن می‌باشند. در جدول ۱ ـ ۲ حدود متعارف این آلیاژها برای حصول حداکثر سرعت جوشکاری و اقتصاد مناسب کار ارایه شده است. فولادهایی که آلیاژهای آنها بیشتر از مقادیر مندرج در این جدول است، احتیاج به‌الکترودها و دستورالعمل‌های خاص جوشکاری دارند. هم‌چنین به بند ۶ ـ ۱۰ ـ ۴ نیز مراجعه شود.

آلیاژهای فولادهای نرمه غالباً در محدوده‌های ذکرشده در جدول ۱ ـ ۲ قرار دارد. لیکن در جوشکاری فولادهای پُرضخامت، حتی اگر از نوع فولادهای نرمه باشند، نیاز به‌دستورالعمل‌ها و توجهات خاص می‌باشد.

میزان بعضی از آلیاژهای موجود در فولادهای پُرمقاومت و آلیاژدار از مقادیر جدول ۱ ـ ۲ تجاوز می‌نماید، در نتیجه جوشکاری آنها نیز نیاز به‌دستورالعمل‌ها و توجهات خاص دارد.

جدول ۱ ـ ۲ حدود مناسب آلیاژهای فولاد برای حصول قابلیت جوشکاری مناسب

عنصر		دامنهٔ مناسب (درصد)	در صورتی که مقدار هر یک از عناصر از مقادیر زیر تجاوز نماید، روش‌ها و تدابیر خاص در هنگام جوشکاری لازم است.
C	کربن	۰/۲۵ تا ۰/۰۶	۰/۳۵
Mn	منگنز	۰/۸ تا ۰/۳۵	۱/۴
Si	سیلیسیم	۰/۱(حداکثر)	۰/۳
S	سولفور	۰/۰۳۵(حداکثر)	۰/۰۵
P	فسفر	۰/۰۳(حداکثر)	۰/۰۴

در هنگام جوشکاری ورق‌های ضخیم و یا فولادهای پرمقاومت و آلیاژدار، نیاز به‌دستورالعمل‌های خاص جوشکاری برای جلوگیری از وقوع ترک می‌باشد. این دستورالعمل‌ها دربرگیرنده یک و یا تمام عوامل مذکور در زیر می‌باشند:

۱ ـ شکل و هندسه درز جوش؛

۲ ـ حداقل نفوذ به‌منظور جلوگیری از رقیق‌شدگی[11] فلز جوش با عناصر آلیاژ ورق؛

۳ ـ پیش‌گرمایش، دمای کنترل‌شده برای عبورهای (پاس‌های) میانی و کنترل حرارت القایی از عمل جوشکاری به‌منظور به‌تأخیر انداختن سرعت سرد شدن و کاهش تنش‌های انقباضی.

11. Dilution

۱ ـ ۱۹ پیش‌گرمایش

پیش‌گرمایش که از عوامل مهم جلوگیری از ایجاد ترک در جوش می‌باشد، در عمل به‌یکی از دلایل زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱ ـ به‌منظور کاهش تنش‌های انقباضی در جوش و فلز پایه مجاور آن، به‌خصوص در درزهایی که درجه گیرداری آنها زیاد است.

۲ ـ برای کاهش سرعت انجماد در گذر از محدوده دمای بحرانی (۷۲۰ تا ۹۹۰ درجه سلسیوس) به‌منظور جلوگیری از تردی و افزایش شکل‌پذیری نوار جوش و ناحیه تفتیده در فلز پایه.

۳ ـ برای کاهش سرعت سرد شدن در محدوده ۲۰۰ درجه سلسیوس برای اجازه دادن به‌خروج هرگونه هیدروژن جذب‌شده توسط مصالح جوش و ناحیه تفتیده در فلز پایه.

۴ ـ برای افزایش سرعت بحرانی مجاز سرد شدن در زیر دمایی که خطر ترک‌خوردگی در زیر نوار جوش از بین رفته است.

۵ ـ به‌منظور افزایش طاقت زخم[12] در ناحیه جوش.

۶ ـ کاهش دمای انتقال در فلز پایه اطراف آن.

در صورت استفاده از الکترود کم‌هیدروژن، پیش‌گرمایش را می‌توان به‌حداقل رسانید. در وضعیت‌هایی نظیر جوشکاری ورق‌های خیلی ضخیم یا پُر آلیاژ و یا درزهای با درجه گیرداری بالا، نیاز به‌پیش‌گرمایش بیشتری است.

هرچند که پیش‌گرمایش فواید زیادی در بر دارد، لیکن به‌علت افزایش مخارج استفاده از آن، در مواردی توصیه می‌شود که به‌آن نیاز است.

حداقل پیش‌گرمایش

حداقل دمای پیش‌گرمایش و دمای پاس‌های میانی طبق توصیه‌های AWS در جدول ۱ ـ ۳ ارایه شده است. این حداقل‌ها باید با توجه به‌حرارت جذب‌شده در حین جوشکاری، تجزیه شیمیایی فولاد، هندسه درز و سایر عوامل اصلاح گردد.

12. *Notch toughness*

جدول ۱ ـ ۳ حداقل دمای پیش‌گرمایش و دمای پاس‌های میانی طبق AWS

نوع جوشکاری		
جوشکاری با الکترودهای کم‌هیدروژن	جوشکاری با الکترودهای غیر کم‌هیدروژن	t (ضخامت) (mm)
لازم نیست [۲]	لازم نیست [۳]	≤۲۰
۲۰ درجه سلسیوس	۶۵ درجه سلسیوس	>۲۰ , ≤۴۰
۶۵ درجه سلسیوس	۱۰۵ درجه سلسیوس	>۴۰ , ≤۶۰
۱۰۵ درجه سلسیوس	۱۵۰ درجه سلسیوس	>۶۰

۱ ـ وقتی دمای محیط کمتر از (۱۵-) درجه سلسیوس باشد، جوشکاری نباید انجام شود.

۲ ـ وقتی که دمای فلز پایه کمتر از دمای توصیه‌شده برای ضخامت ورق است، برای هر دو حالت خال‌جوش و جوش اصلی باید پیش‌گرمایش انجام شود. پیش‌گرمایش باید به‌طریقی انجام شود که دمای سطحی قطعاتی که فلز جوش در روی آنها ترسیب می‌شود، به‌فاصله‌ای مساوی ضخامت قطعه (ولی کمتر از ۷۵ میلی‌متر) در طرفین و سمت پیشروی جوش، از درجه حرارت مذکور در جدول بزرگتر گردد. دمای پیش‌گرمایش نباید از ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر گردد (درجه حرارت پاس‌های میانی شامل هیچ محدودیتی نمی‌باشد).

۳ ـ وقتی که دمای فلز پایه کمتر از صفر باشد، با اعمال پیش‌گرمایش دمای آن باید به ۲۰ درجه سلسیوس برسد. جوشکاران باتجربه با لمس قطعه، دمایی در حد بدن را دمایی مناسب برای جوشکاری مناسب می‌دانند.

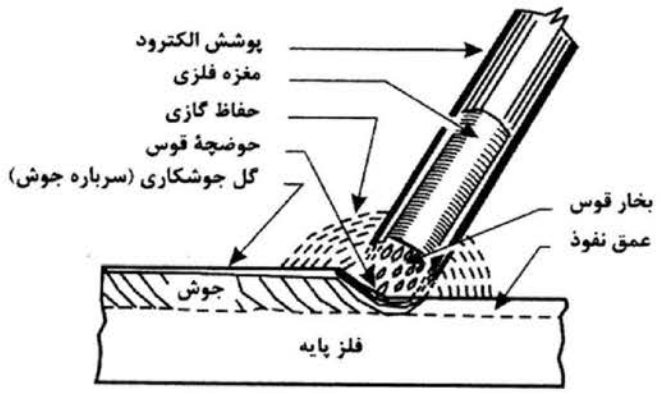
۲ وسایل و تجهیزات جوشکاری قوس الکتریکی

۲ـ۱ معرفی ۴۱
۲ـ۲ قابلیت‌های جوشکاری قوس الکتریکی ۴۲
۲ـ۳ اصول کلی ۴۲
۲ـ۴ منابع انرژی جوشکاری ۴۳
۲ـ۵ منحنی ولتاژ ـ شدت جریان ۴۵
۲ـ۶ ماشین‌های مورد استفاده در جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار ۴۷
۲ـ۷ کابل و وسایل اتصال ۵۲
۲ـ۸ تجهیزات حفاظتی ۵۷
۲ـ۹ ابزار تمیزکاری گل‌جوش ۶۴
۲ـ۱۰ ابزار نگهداری الکترود ۶۵
۲ـ۱۱ ابزار پیش‌گرمایش درز ۶۶
۲ـ۱۲ ابزارهای اندازه‌گیری ۶۶
۲ـ۱۳ ابزارهای نشانه‌گذاری ۶۶
۲ـ۱۴ ابزار نصب ۶۷
۲ـ۱۵ تجهیزات جوشکاری تحت حفاظت گاز ۶۹
۲ـ۱۶ تجهیزات جوشکاری قوسی زیرپودری ۷۲

۲ وسایل و تجهیزات جوشکاری قوس الکتریکی

۲ـ۱ معرفی

جوش قوس الکتریکی با الکترود روکش‌دار (SMAW) نوعی جوشکاری قوسی دستی است که در آن حرارت لازم برای جوشکاری، توسط قوس الکتریکی بین یک مفتول فلزی روکش‌شده که الکترود خوانده می‌شود و قطعه فلز پایه فراهم می‌شود. به‌همین دلیل این فرآیند گاهی جوشکاری برقی با الکترود نیز خوانده می‌شود. سوختن و تجزیه روکش الکترود، حفاظ گازی ایجاد می‌کند که انتهای الکترود، حوضچه مذاب جوشکاری، قوس و قطعه فلز حرارت دیده را از نفوذ هوا محافظت می‌کند (شکل ۲ ـ ۱). این حفاظ گازی باعث تثبیت قوس الکتریکی و همچنین کاهش پاشیدگی جوش و سهولت کار می‌شود. حفاظت بیشتر برای فلز مذاب در حوضچه مذاب، توسط پوششی از گِل[1] جوشکاری در حین عمل جوشکاری به‌وجود می‌آید.



شکل ۲ ـ ۱ نمایش شماتیک جوش قوس الکتریک با الکترود روکش‌دار.

1. *Slag* (سرباره)

فلز جوش، توسط مغزه فلزی الکترود تأمین می‌شود و این مغزه فلزی براساس طبقه‌بندی الکترود دارای خواص مختلفی است. روکش و فلز پُرکننده خواص مکانیکی، شیمیایی، متالورژی و الکتریکی جوش را به‌مقدار زیاد کنترل می‌کنند. اطلاعات بیشتر در مورد الکترود در فصل بعد ارائه شده است.

۲ ـ ۲ قابلیت‌های جوشکاری قوس الکتریکی

تجهیزات مورد نیاز برای جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود روکش‌دار، ساده و قابل حمل و نسبت به‌تجهیزات لازم برای روش‌های دیگر جوشکاری ارزان‌قیمت هستند. با اجرای تمهیدات لازم جهت تهویه کافی، جلوگیری از آتش‌سوزی و دیگر خطرات موجود، این نوع جوشکاری می‌تواند در محیط بسته و هوای آزاد و در هر مکان و موقعیتی انجام شود.

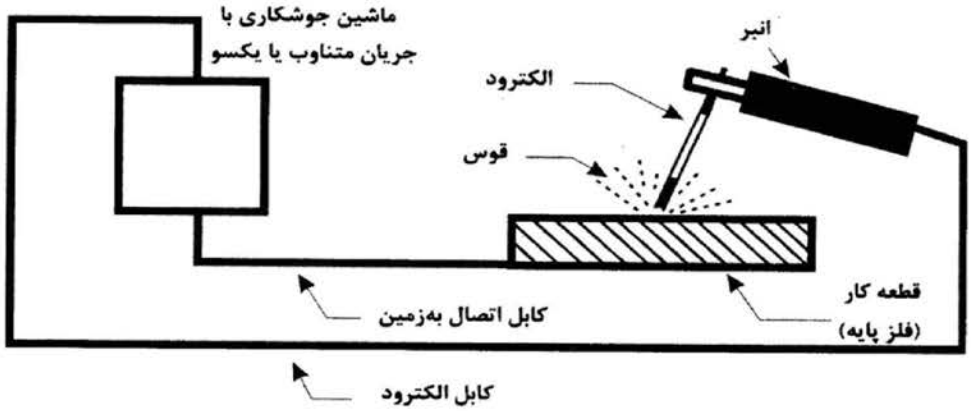
الکترودهای روکش‌دار در جوش قوس الکتریکی از لحاظ خواص و مقاومت، قابل سازگاری با بسیاری از فلزات پایه می‌باشند. جوشکاری فولاد کم‌آلیاژ و کم‌کربن، فولاد زنگ نزن و فولاد اصلاح‌شده با این روش بسیار آسان می‌باشد و جوشکاری چدن و فولاد پرمقاومت با اجرای تهمیدات خاص در مورد پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش، با این روش امکان‌پذیر است. همچنین جوشکاری آلیاژهای مس و نیکل با این شیوه امکان‌پذیر بوده ولی جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن[۲]، در این موارد ارجح است.

روش الکترود روکش‌دار برای فلزات نرم نظیر روی، برنج و قلع که نقطه جوش و نقطه ذوب پایینی دارند، کاربرد ندارد.

۲ ـ ۳ اصول کلی

تجهیزات مورد استفاده در جوشکاری قوس الکتریکی در یک مدار جوشکاری، شامل ماشین جوشکاری، فلز پایه، کابل‌ها، انبر، الکترود و گیره اتصال به‌زمین می‌باشند (شکل ۲ ـ ۲). حرارت ایجادشده توسط قوس الکتریکی، فلز پایه و الکترود مصرفی را به‌حالت مذاب در می‌آورد. گرمای قوس بسیار زیاد است، به‌گونه‌ای که دمایی معادل ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ درجه سلسیوس در مرکز قوس اندازه‌گیری شده است. جوشکاری با تشکیل قوس الکتریکی در هنگام نزدیک کردن مغزه فلزی الکترود به‌قطعه فلز پایه آغاز می‌شود. حرارت حاصل از قوس الکتریکی، الکترود و سطح فلز را در مجاورت قوس ذوب می‌کند. سپس قطرات کوچک فلز مذاب از انتهای الکترود به‌داخل حوضچه مذاب بر روی سطح قطعه فلزی منتقل می‌شود. در جوشکاری تخت این انتقال و جابه‌جایی توسط نیروهای ثقلی، جاذبه مولکولی و کشش سطحی انجام می‌شود. وقتی جوشکاری در وضعیت قائم و یا وضعیت سقفی است، نیروهای جاذبه مولکولی و کشش سطحی موجب انتقال قطرات فلز مذاب می‌شوند. به‌خاطر دمای زیاد قوس الکتریکی، فلز مذاب که به‌حالت روان درآمده است، فوراً از محل تشکیل قوس الکتریکی جابه‌جا می‌شود. پس از آغاز جوشکاری، قوس در طول قطعه حرکت داده شده و عملیات ذوب و ترکیب فلزات پیشرفت می‌کند.

2. *Gas Metal - Aec Welding*

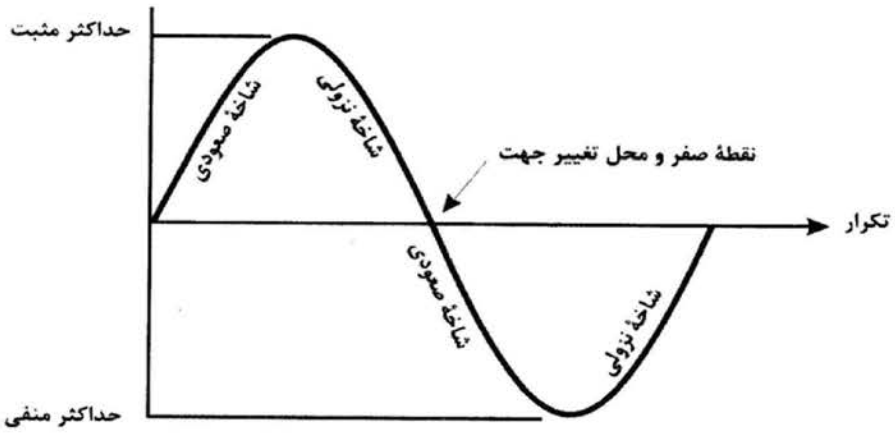


شکل ۲ ـ ۲ عناصر تشکیل‌دهنده مدار الکتریکی جوش قوس الکتریک با الکترود روکش‌دار.

۲ ـ ۴ منابع انرژی جوشکاری

هر نوع فرآیند جوشکاری هنگامی به‌حداکثر مقدار بازده خود می‌رسد که منبع انرژی طراحی‌شده متناسب با آن مورد استفاده قرار گیرد. هر نوع منبع انرژی دارای اختلاف اصولی از لحاظ الکتریکی با انواع دیگر است که آن را برای یک فرآیند و هدف خاص مناسب می‌سازد.

جوشکاری قوس الکتریک به‌شدت جریان الکتریکی کافی (برحسب آمپر) برای ذوب فلز پایه و الکترود، و ولتاژ مناسب (برحسب ولت) برای تولید قوس نیاز دارد. الکترودها بسته به‌نوع و اندازه‌شان به‌ولتاژی حدود ۱۷ تا ۴۵ ولت و جریان تقریبی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ آمپر نیاز دارند. جریان الکتریکی می‌تواند متناوب و یا یکسو باشد، ولی باید از منبعی تأمین شود که جهت برآوردن شرایط مختلف کاری قابل کنترل باشد. شکل ۲ ـ ۳ چرخه‌ای از جریان متناوب را نشان می‌دهد.



شکل ۲ ـ ۳ یک چرخه از جریان متناوب.

قطبیت

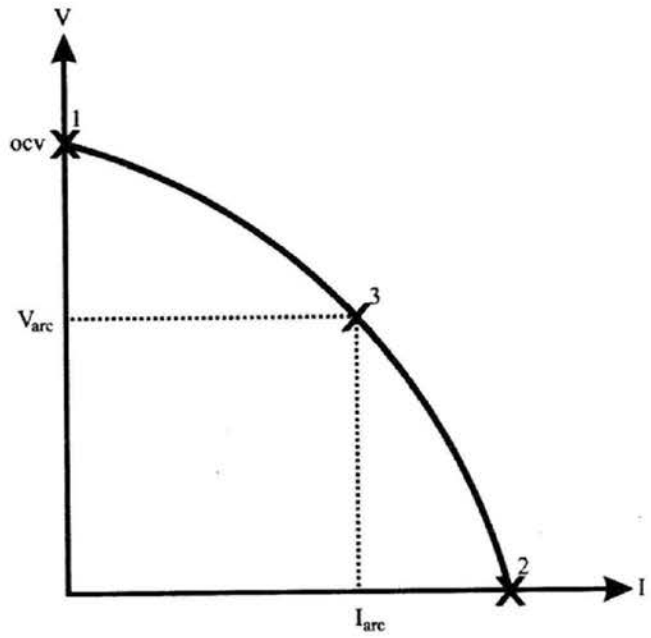
در جوشکاری با جریان یکسو، دو نوع قطبیت مستقیم (منفی) و یا معکوس (مثبت) مورد استفاده است. قطبیت (مستقیم یا معکوس) جهت جریان الکتریکی را در مدار جوشکاری نشان می‌دهد.

هنگامی که جوشکاری با قطبیت مستقیم (منفی) (DCSP یا DCEN) انجام می‌شود انبر الکترود به‌خروجی منفی و فلز پایه به‌خروجی مثبت وصل می‌گردد. در قطبیت مستقیم یا قطبیت منفی، مسیر جریان از قطب منفی منبع انرژی به‌سمت الکترود، سپس در طول قوس الکتریکی به سمت قطعه فلز پایه حرکت کرده و نهایتاً به‌قطب مثبت منبع انرژی باز می‌گردد.

در جوشکاری با قطبیت معکوس (مثبت) (DCRP یا DCEP)، انبر الکترود به‌قطب مثبت و فلز پایه به‌قطب منفی منبع انرژی متصل می‌گردد. در قطبیت معکوس، مسیر جریان الکتریکی از انتهای منفی منبع به‌سمت فلز پایه، قوس، الکترود و سپس به‌سمت قطب مثبت منبع انرژی می‌باشد.

اختلاف پتانسیل و شدت جریان (ولتاژ و آمپراژ)

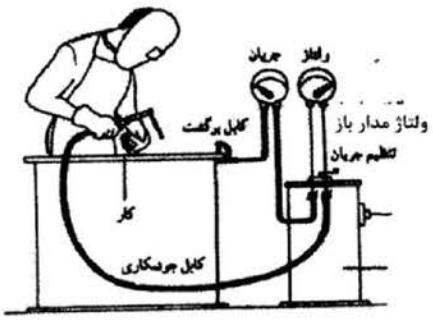
اگر در ذهن خود شدت جریان عبوری از سیم مدار را با جریان آب در یک لوله مقایسه نماییم، مفهوم کنترل و تنظیم جریان بهتر درک می‌شود. آمپراژ، مقدار یا دبی جریان است و مقدار حرارت تولیدشده در جوشکاری را معین می‌کند. ولتاژ در حکم اختلاف ارتفاع موجود برای رانش جریان در لوله است. ولتاژ قابلیت تشکیل و تداوم قوس الکتریکی را معین کرده و میزان پایداری، یا دوام آن را مشخص می‌کند. اگر ولتاژ زیاد باشد، طول قوس بلند بوده و ممکن است موجب انحراف قوس گردد. اگر میزان ولتاژ خیلی کم باشد، طول قوس خیلی کوچک بوده و برقراری قوس بسیار مشکل است.



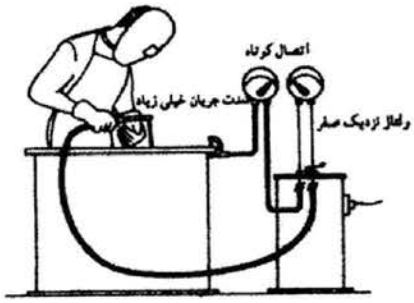
شکل ۲ ـ ۴ منحنی ولتاژ ـ آمپر (V.I.).

۲ ـ ۵ منحنی ولتاژ ـ شدت جریان[3]

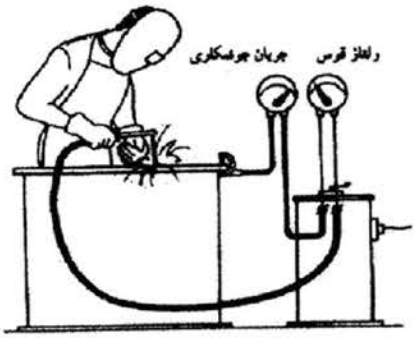
دستگاه‌های جوشکاری دارای مشخصه‌ای به‌نام ولتاژ ـ آمپر (V-I) می‌باشند. قبل از شروع به‌جوشکاری هیچ جریانی برقرار نشده و شدت جریان، صفر و اختلاف پتانسیل در حداکثر خود می‌باشد که به‌آن ولتاژ مدار باز (OCV)[4] گفته می‌شود (نقطه ۱ روی نمودار شکل ۲ ـ ۴ و شکل ۲ ـ ۵ ـ الف).



(الف) ولتاژ و آمپراژ در حالتی که مدار باز است



(ب) ولتاژ و آمپراژ در حالت اتصال کوتاه



(پ) ولتاژ و آمپراژ در حالت برقراری قوس

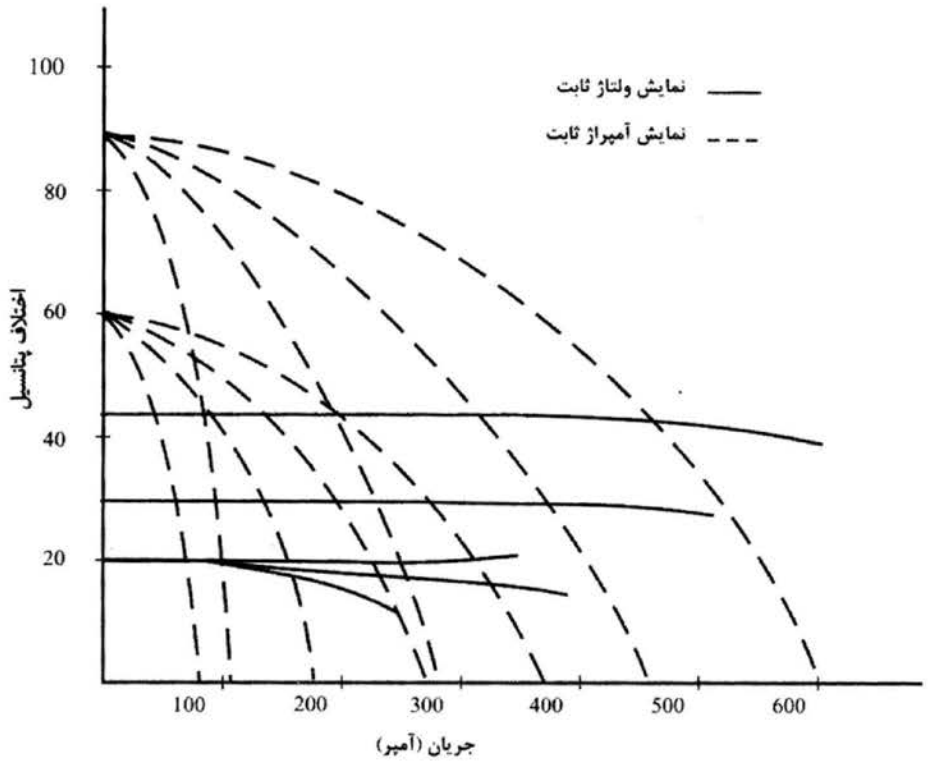
شکل ۲ ـ ۵ تغییرات شدت جریان و ولتاژ در جوشکاری قوسی.

3. *Volt- Ampere*
4. *Open Circuite Voltage*

برای شروع جوشکاری یک لحظه نوک الکترود را به‌فلز می‌زنیم تا جریان برقرار گردد و قوس جوشکاری تشکیل گردد. در این لحظه شدت جریان از مدار عبور کرده و اختلاف پتانسیل به‌صفر می‌رسد (نقطه ۲ روی نمودار شکل ۲ ـ ۴ و شکل ۲ ـ ۵ ـ ب). در هنگام جوشکاری نوک الکترود به‌اندازه طول قوس از سطح کار فاصله دارد که این قوس جوشکاری حکم مقاومت مدار را داشته و شدت جریان و اختلاف پتانسیل در نقطه ۳ روی نمودار ۲ ـ ۴ مشخص می‌شود (شکل ۲ ـ ۵ ـ پ). به‌این منحنی، منحنی V-I گفته می‌شود. دو نوع منحنی V-I وجود دارد، ولتاژ ثابت و جریان ثابت.

وقتی که گفته می‌شود مدار ولتاژ ثابت است یعنی اینکه در هنگام جوشکاری تغییرات ولتاژ نسبت به‌تغییرات آمپر بسیار اندک می‌باشد و طول قوس[5] (فاصله بین نوک الکترود تا سطح قطعه کار) تقریباً ثابت است. وقتی گفته می‌شود مدار از نوع شدت جریان ثابت است یعنی اینکه در هنگام جوشکاری با تغییرات اختلاف پتانسیل، یعنی کم و زیاد شدن طول قوس جوشکاری، شدت جریان تغییر نسبتاً کمی دارد (شکل ۲ ـ ۶).

نمودار V-I از این نظر اهمیت دارد که رابطه بین ولتاژ و شدت جریان خروجی را بیان می‌کند. مشخصه ولتاژ ثابت در جوشکاری زیرپودری و تحت حفاظت گاز که سیم‌جوش پیوسته و کلافی می‌باشد، استفاده می‌شود. بنابراین باید نرخ تغذیه سیم‌جوش با نرخ رسوب سیم برابر باشد تا قوس ثابت بماند.



شکل ۲ ـ ۶ نمونه‌ای از منحنی‌های V-I برای منابع انرژی با شدت جریان ثابت و اختلاف پتانسیل ثابت.

5. *Arc lenght*

در حالتی که جوشکاری غیرذوبی باشد، یعنی الکترود ذوب نشود، مثل روش‌های جوش تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن و یا اینکه طول الکترود محدود باشد، مثل جوشکاری دستی، از مشخصه آمپر ثابت استفاده می‌گردد. در روش‌های جوشکاری که با دست انجام می‌شود و به‌دلیل دستی بودن آن طول قوس تغییر کرده و ولتاژ نیز به‌دلیل داشتن رابطه مستقیم با تغییرات طول قوس، تغییر نماید، اگر طراحی دستگاه نیز به‌گونه‌ای باشد که باعث تغییرات زیاد در شدت جریان گردد، جوش مناسبی به‌دست نمی‌آید، در نتیجه جهت جبران اشتباه در حرکت دست جوشکار، مشخصه ولت آمپر این‌گونه دستگاه‌ها باید آمپر ثابت باشد.

هر نوع روش جوشکاری قوس الکتریکی به‌خواص V-I مشخصی نیاز دارد:

- جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن[6] و جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار نیاز به‌شیب خروجی تند از یک منبع انرژی با جریان ثابت دارند. شدت جریان الکتریکی ثابت جهت کنترل پایداری و تثبیت قوس الکتریکی ضروری است.
- جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود فلزی، نیاز به‌شیب خروجی نسبتاً افقی دارد و جهت تثبیت قوس الکتریکی این شیب خروجی باید از منبع انرژی با ولتاژ ثابت به‌دست آید.
- جوشکاری زیرپودری بسته به‌نوع کاربرد و کنترل دقیق تجهیزات، قابل سازگاری با شیب‌های خروجی مختلف است.

بعضی از ماشین‌های جوشکاری جریان مستقیم ممکن است دو نوع اصلی از شیب خروجی را در یک واحد منفرد ترکیب کنند. در این حالت می‌توان با زدن کلید انتخاب‌کننده، یک شیب تند (با جریان ثابت) یا یک شیب تخت (با ولتاژ ثابت) تولید کرد.

۲ـ۶ ماشین‌های مورد استفاده در جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

به‌طور کلی سه نوع ماشین جوشکاری وجود دارد:

۱ـ موتور ـ مولدها شامل موتور درونسوز یا موتور برقی (موتور ـ ژنراتور و دینام‌ها)؛

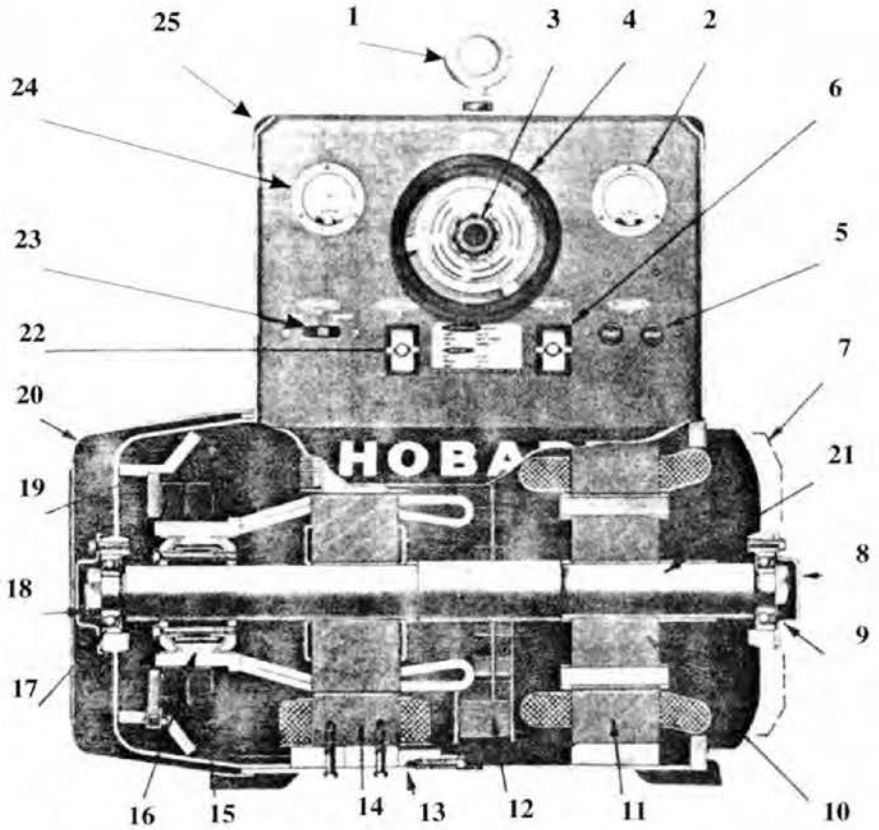
۲ـ مبدل ـ یکسوکننده‌ها (رکتیفایر)؛

۳ـ مبدل‌ها (ترانس‌ها)؛

۲ـ۶ـ۱ ماشین‌های جوشکاری موتور ـ مولد[7]

موتور ـ مولدها (موتور ـ ژنراتورها) معمولاً تنها جریان یکسو تولید می‌کنند، هر چند که می‌توانند برای تولید جریان متناوب نیز طراحی و ساخته شوند. اکثر موتور ـ مولدها از نوع جریان ثابت بوده و به‌ویژه برای الکترودهای روکش‌دار و جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مدل از این ماشین‌ها در شکل ۲ ـ ۷ نشان داده شده است.

6. *Gas Tungsten- Arc Welding*
7. *D.C. and A.C. Motor-Generator welding Machine*



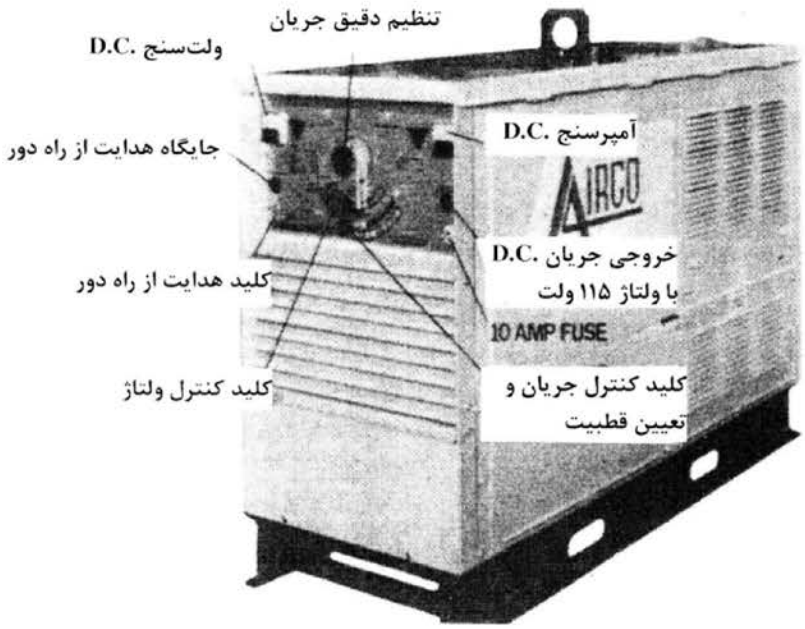
قسمت‌های داخلی طبق شکل به‌شرح زیر است:

۱ . قلاب فلزی بزرگ و محکم
۲ . ولت‌سنج بزرگ جریان
۳ . تنظیم ریز شدت جریان
۴ . تنظیم در شدت جریان
۵ . کلید خاموش ـ روشن
۶ . اتصال‌دهنده کابل‌های زمین
۷ . حفاظ فلزی
۸ . درپوش یاتاقان
۹ . یاتاقان
۱۰ . محفظه مسی روتور
۱۱ . موتور سه فاز
۱۲ . پروانه فلزی خنک‌کن
۱۳ . قاب فلزی
۱۴ . مولد جریان
۱۵ . جاروبک گرافیتی ـ فلزی
۱۶ . یکسوکننده
۱۷ . یاتاقان توپی
۱۸ . درپوش یاتاقان
۱۹ . قاب فلزی
۲۰ . روکش فلزی متحرک
۲۱ . شفت
۲۲ . کابل‌های اتصال‌دهنده جوشکاری
۲۳ . کلید قطبیت
۲۴ . آمپرسنج بزرگ
۲۵ . روکش

شکل ۲ ـ ۷ موتور ـ مولد برقی (دینام).

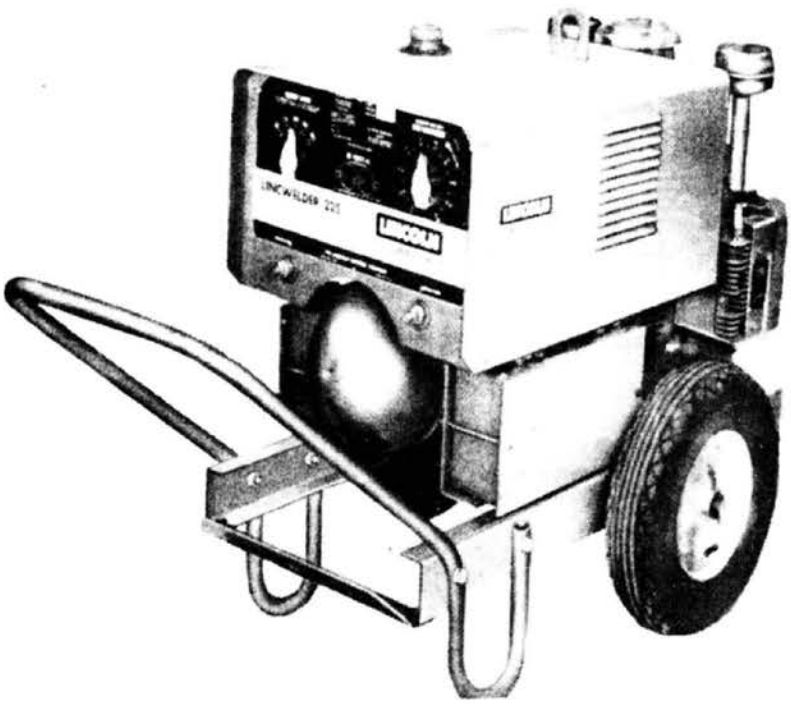
موتور ـ مولدهای برقی (دینام‌ها)، شامل یک موتور با جریان متناوب سه فاز، یک مولد جریان یکسو یا متناوب و یک مولد میدان مغناطیسی مستقر بر روی یک شفت می‌باشند. جریان متناوب سه فاز، موتور الکتریکی را به‌کار انداخته و این موتور مولدی را به‌کار می‌اندازد که جریان لازم برای جوشکاری را تولید می‌کند. این قسمت‌ها در شکل ۲ ـ ۸ نشان داده شده است.

در بعضی از کارهای ساختمانی و کارهای تعمیری استفاده از منبع انرژی الکتریکی مقرون به‌صرفه نبوده، همچنین در بعضی موارد انرژی الکتریکی قابل دسترسی نیست. بنابراین استفاده از موتورهای بنزینی و دیزلی به‌عنوان



شکل ۲ ـ ۸ دیزل ـ ژنراتور جوشکاری با جریان یکسو با ظرفیت ۴۰۰ آمپر.

منبع انرژی جهت راه‌اندازی مولد جوشکاری ضروری است. کنترل جوشکاری توسط این ماشین‌ها مشابه موتور ـ مولدهای برقی (دینام) است. واحدهای مختلف دستگاه بر روی یک شاسی ساخته می‌شود که در زیر آن چرخ‌های لاستیکی مشابه لاستیک اتومبیل وجود دارد که باعث سهولت حرکت آن در قسمت‌های مختلف کارگاه می‌گردد (شکل ۲ ـ ۹).



شکل ۲ ـ ۹ این موتور درونسوز بنزینی، ماشین جوشکاری را راه‌اندازی کرده و برای روشنایی اضطراری و برای وسایل برقی، برق متناوب تأمین می‌کند.

سوخت موتورها معمولاً بنزین و گازوییل می‌باشد. موتور ـ مولدهای جریان یکسو و متناوب و موتورهای درونسوز دارای خصوصیات مطلوب برای جوشکاران جوش قوس الکتریکی می‌باشند.

۲ ـ ۶ ـ ۲ ماشین جوشکاری مبدل ـ یکسوکننده D.C (رکتیفایرها)

مبدل ـ یکسوکننده‌ها (رکتیفایرها) که نمونه‌ای از آن در شکل ۲ ـ ۱۰ نشان داده شده، دارای طرح‌های متعدد برای مقاصد مختلف می‌باشند. انعطاف‌پذیری، یکی از دلایل پذیرش گسترده این ماشین در صنعت جوشکاری است. این ماشین‌ها قادر به‌تحویل جریان با قطبیت منفی یا مثبت می‌باشند، همچنین ممکن است برای جوشکاری دستی با الکترود، جوشکاری تحت حفاظت گاز، جوشکاری زیرپودری و جوشکاری گل‌میخ‌ها مورد استفاده قرار گیرند و امکان سرویس‌دهی همزمان چندین کاربر را دارا می‌باشند.

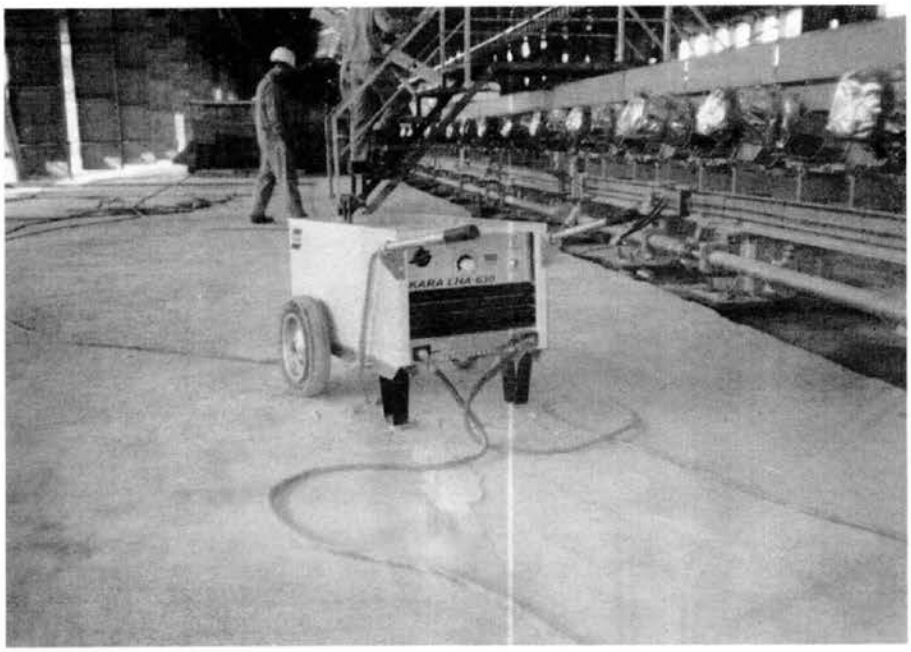
همه ماشین‌های مبدل ـ یکسوکننده دارای دو قسمت اصلی هستند:

(۱) مبدل (ترانسفورماتور) جهت تنظیم شدت جریان متناوب ورودی به‌ماشین؛

(۲) یکسوکننده که جریان متناوب را به‌جریان مستقیم تبدیل می‌کند.

مهمترین قسمت دیگر این ماشین‌ها یک پروانه تهویه است. این پروانه از افزایش حرارت یکسوکننده در حین کار و در نتیجه کاهش طول عمر مفید آن جلوگیری می‌کند. مشابه موتور ـ مولدهای یکسو، کنترل جریان پیوسته در یک دامنه وسیع امکان‌پذیر است.

مبدل ـ یکسوکننده‌ها دارای قسمت‌های گردنده نیستند، بنابراین در هنگام عدم استفاده و یا کارکرد آهسته انرژی کمتری مصرف می‌کنند. این ماشین‌ها به‌نگهداری و مراقبت کمتری نیاز دارند.



شکل ۲ ـ ۱۰ ماشین جوشکاری یکسوکننده (رکتیفایر).

ماشین‌های جوشکاری مبدل ـ یکسوکننده AC-DC

ماشین‌های AC-DC به‌کاربر اجازه می‌دهند که نوع جریان را به‌صورت مستقیم یا متناوب و نوع قطبیت را به‌صورت مستقیم یا معکوس انتخاب کند. این ماشین‌ها در اصل یک مبدل ـ یکسوکننده جریان A.C. هستند. یک کلید به‌کاربر اجازه می‌دهد تا فقط از قسمت مبدل برای جریان متناوب استفاده کند. با زدن یک کلید یا چرخاندن یک صفحه، جریان خروجی به‌داخل یکسوکننده فرستاده می‌شود و این دستگاه جریان را به‌جریان مستقیم جوشکاری تبدیل می‌کند. مدار یکسوکننده این ماشین مشابه سایر ماشین‌های مبدل ـ یکسوکننده می‌باشد (شکل ۲ ـ ۱۱).

شکل ۲ ـ ۱۱ مبدل A.C. (ترانس).

۲ ـ ۶ ـ ۳ ماشین‌های جوشکاری جریان متناوب (A.C) ـ مبدل‌های جریان متناوب (ترانس‌ها)

خاصیت جریان متناوب این است که در هر $\frac{۱}{۱۲۰}$ ثانیه جهت آن عکس می‌شود. این تغییر فاز مداوم جریان، باعث کاهش میدان مغناطیسی جریان شده و در نتیجه از انحراف قوس می‌کاهد. انحراف قوس باعث پاشیدگی شده و در ترکیب جوش ایجاد تداخل می‌کند.

هر چند که تشکیل قوس با جریان متناوب نسبت به‌حالت استفاده از جریان یکسو، تا اندازه‌ای مشکل است لیکن عدم وجود انحراف قوس و ولتاژ زیاد، باعث دوام و پایداری قوس می‌شود. این شرایط همچنین اجازه استفاده از الکترودهای بزرگ را داده و باعث افزایش سرعت کار در جوشکاری فلزات سنگین و ضخیم می‌گردد. دیگر مزایای ماشین‌های جریان متناوب، قیمت پایین، کاهش مصرف انرژی، بازده بالای تولید جریان، عملکرد بی‌صدا و کاهش نیاز به‌مراقبت و نگهداری نسبت به‌انواع دیگر است.

ماشین جوشکاری جریان متناوب مخصوصاً مناسب برای جوشکاری شیارها و پُر کردن درزهای ورق‌های ضخیم در موقعیت جوشکاری تخت می‌باشد.

مبدل‌های .A.C یا ترانس‌ها، رایج‌ترین ماشین‌های جوشکاری جریان متناوب می‌باشند (شکل۲ ـ ۱۱). عملکرد مبدل، کاهش ولتاژ ورودی و افزایش آمپراژ می‌باشد. زیرا همان‌طور که ذکر شد، در جوشکاری معمولاً به‌ولتاژی پایین‌تر از ولتاژ برق شهر نیاز است.

۲ ـ ۷ کابل و وسایل اتصال

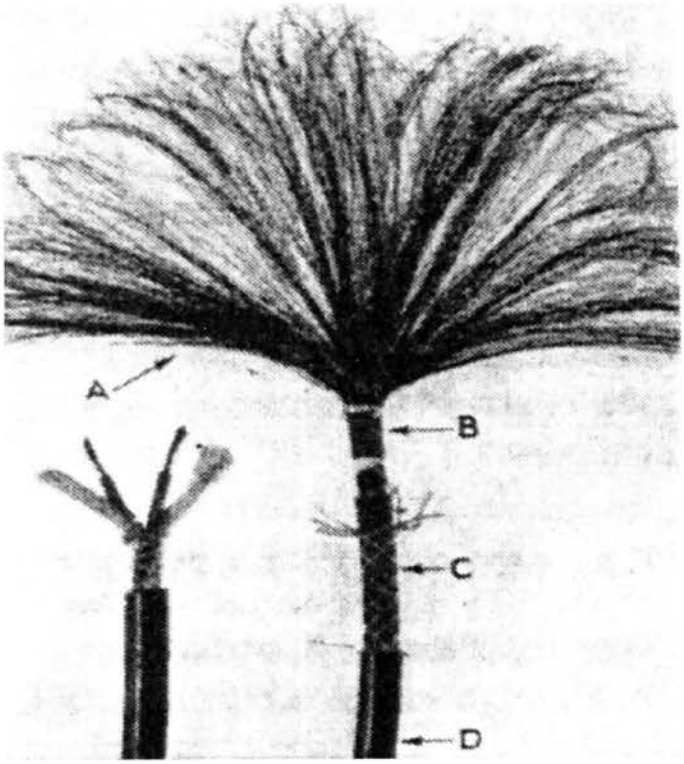
۲ ـ ۷ ـ ۱ کابل برق

کابل‌های برق که ماشین جوشکاری را به‌منبع انرژی متصل می‌کنند باید کاملاً عایق بوده و توانایی انتقال جریان الکتریسیته مورد نیاز را داشته باشند. محل نصب و استقرار ماشین جوشکاری در کارگاه بسیار مهم است چون در صورت از بین رفتن عایق کابل‌های برق یا لایه‌های عایق بدنه ماشین جوشکاری امکان برقراری شوک (ضربه) الکتریکی به‌منظور تشکیل قوس از بین خواهد رفت.

کابل الکترود و کابل اتصال به‌زمین

جهت تکمیل مدار الکتریکی میان ماشین جوشکاری و قطعه فلز مورد جوش، دو کابل با ظرفیت کافی برای انتقال جریان مورد نیاز می‌باشد. یکی کابل الکترود که کابل جوشکاری نیز خوانده می‌شود و به‌انبر الکترود متصل می‌شود و دیگری کابل زمین که به‌قطعه کار وصل می‌شود.

کابل‌های مورد استفاده، عموماً کابل‌های رشته‌ای از جنس مس با پوشش لاستیکی مطابق شکل ۲ ـ ۱۲ هستند که مشخصاً برای جوشکاری طراحی و ساخته می‌شوند. استفاده از کابل‌های از جنس رشته‌های آلومینیوم نیز در حال گسترش است. کابل، به‌ویژه کابل الکترود باید کاملاً انعطاف‌پذیر باشد تا موجب خستگی و یا مزاحمت جوشکار در حین کار نگردد.



شکل ۲ ـ ۱۲ ساختمان داخلی کابل جوشکاری.

جوشکاری قائم و سقفی که در آنها جوشکار باید الکترود و انبر جوشکاری را بالای سر نگه دارد، وضعیت دشواری را برای وی ایجاد می‌کند. کابل الکترود با انعطاف‌پذیری کم، دشواری کار را بیشتر کرده و باعث خستگی بیشتر جوشکار خواهد شد. بنابراین، در چنین حالتی حفظ سرعت و کیفیت جوش توسط جوشکار بسیار مشکل و یا غیرممکن است.

انعطاف‌پذیری زیاد در کابل الکترود ناشی از ساختمان مغزه آن می‌باشد. مغزه کابل الکترود از هزاران رشته مویی و ریز مسی تشکیل شده است و هر چقدر تعداد این رشته‌های باریک در یک کابل برای یک شماره مشخص بیشتر باشد، انعطاف‌پذیری کابل بالاتر است. شکل ۲ ـ ۱۲ ساختمان داخلی یک کابل مسی با روکش لاستیکی را نشان می‌دهد.

کابل‌های الکترود آلومینیومی نیز به‌صورت رشته‌ای هستند. لیکن، تعداد این رشته‌ها در یک کابل آلومینیومی نسبت به‌کابل مسی هم‌شماره، بیشتر می‌باشد. بنابراین برای یک شرایط مفروض شماره بزرگتری از یک کابل آلومینیومی (نسبت به‌کابل مسی) باید انتخاب شود. علیرغم اندازه بزرگتر، وزن کابل آلومینیومی و روکش آن تقریباً نصف وزن کابل مسی می‌باشد.

انتخاب شماره (اندازه) کابل

میزان آمپراژ ماشین جوشکاری و فاصله ماشین از محل کار دو عامل مهم در انتخاب کابل جوشکاری مناسب می‌باشند. جدول ۲ ـ ۱ این موضوع را نشان می‌دهد.

جدول ۲ ـ ۱ انتخاب اندازه مناسب کابل جوشکاری

انتخاب شمارهٔ مناسب کابل جوشکاری برای یک ماشین عاملی مهم در به‌دست آوردن یک جوش سالم می‌باشد. برای مثال یک کابل نمرهٔ ۴/۰ به‌طول ۳۰ متر در جریانی معادل ۵۰۰ آمپر افتی معادل ۴ ولت خواهد داشت. در یک ولتاژ خروجی معادل ۴۰ ولت، افت انرژی حدود ۱۰٪ خواهد بود. در این حالت جریان باید به میزان ۱۰٪ برای جبران این افت افزایش یابد.

حداکثر طول کابل مورد استفاده (متر)							
شدت جریان (برحسب آمپر)	۱۵	۲۲/۵	۳۰	۳۷/۵	۴۵	۵۲/۵	۶۰
۱۰۰	2	2	2	2	1	1.0	1.0
۱۵۰	2	2	1	1.0	2.0	2.0	3.0
۲۰۰	2	1	1.0	2.0	3.0	4.0	4.0
۲۵۰	2	1.0	2.0	3.0	4.0		
۳۰۰	1.0	2.0	3.0	4.0			
۳۵۰	1.0	3.0	4.0				
۴۰۰	1.0	3.0	4.0				
۴۵۰	2.0	3.0					
۵۰۰	3.0	4.0					

مشخصات کابل های ارائه شده در جدول فوق به قرار زیر است:

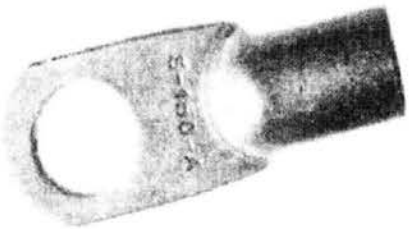
شماره AWG	قطر خارجی (mm)	ضخامت Sheath (mm)	Single wire ® max	سطح مقطع هادی کابل (mm²)
4	10.1-12.7	2.0	0.21	1*25
2	11.4-14.2	2.0	0.21	1*35
1	13.2-16.5	2.2	0.21	1*50
2/0	15.3-19.2	2.4	0.21	1*70
3/0	17.1-21.4	2.6	0.21	1*95
4/0	19.2-24.0	2.8	0.21	1*120

هر قدر شدت جریان (آمپراژ) و فاصله ماشین جوشکاری از محل کار بیشتر باشد، کابلی با اندازه بزرگتر باید انتخاب گردد. با کاهش قطر کابل، مقاومت آن افزایش می‌یابد، ولی اگر کابل خیلی کوچک (نازک) باشد، بیش از حد گرم‌شده و اثر سوء روی عمل جوشکاری خواهد داشت. افزایش طول کابل نیز موجب افزایش مقاومت خواهد شد، بنابراین ماشین جوشکاری باید حتی‌المقدور در نزدیکی محل جوشکاری مستقر گردد. کابل‌های جوشکاری با طول زیاد ممکن است باعث افت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای در طول خود گردند که این موضوع اثرات مهمی روی جریان الکتریکی و تشکیل قوس خواهد داشت.

کفشک کابل و گیره اتصال

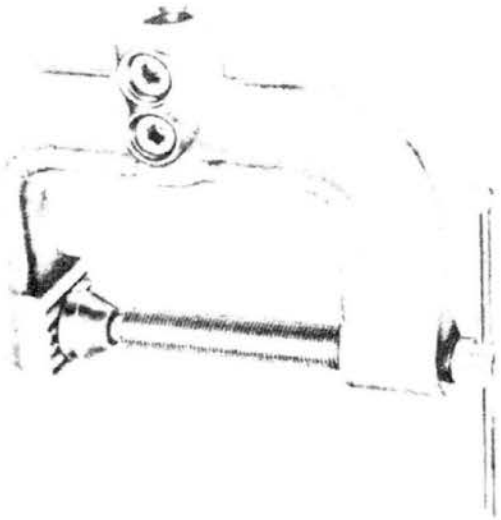
کفشک‌های مناسب طبق شکل ۲ ـ ۱۳ جهت اتصال کابل الکترود و کابل زمین (کابل اتصال) به‌ماشین جوشکاری مورد نیاز می‌باشند. این کفشک‌ها باید با لحیم یا اتصال مکانیکی مناسب به‌کابل‌های مورد نظر وصل شوند. اتصال این کفشک‌ها به‌محل خروجی ماشین جوشکاری باید کاملاً سفت و محکم باشد. لق شدن این اتصال باعث گرم شدن کفشک و ذوب شدن لحیم اتصال کابل به‌کفشک می‌گردد، سپس محل اتصال و کفشک‌ها سوخته و موجب اختلال در جریان جوشکاری خواهد شد.

انتهای دیگر کابل الکترود به‌انبر الکترود متصل‌شده و انتهای دیگر کابل اتصال باید به‌گونه‌ای مناسب به‌قطعه کار وصل شود. اگر این اتصال مطمئن نباشد، تشکیل قوس در محل اتصال، آن را سوزانده و احتمال دارد شرایط مطلوب جهت جوشکاری فراهم نگردد.

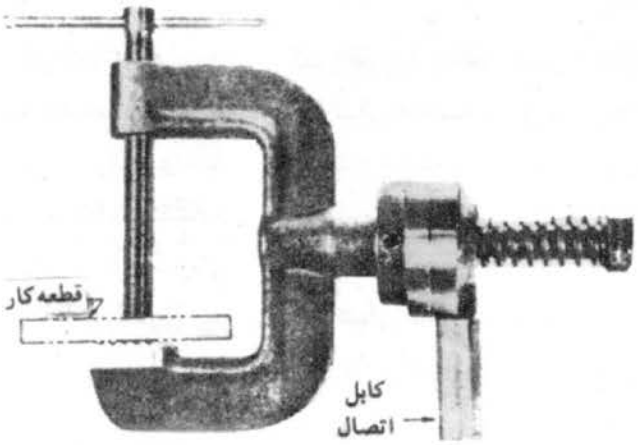


شکل ۲ ـ ۱۳ کفشک کابل الکترود و کابل اتصال.

اگر جوشکاری به‌گونه‌ای است که قطعه کار می‌تواند روی میز جوشکاری یا در یک گیره ثابت و دایمی قرار گیرد، کابل اتصال معمولاً به‌میز یا گیره پیچ می‌شود. اگر جوشکار باید بر روی سازه‌هایی در قسمت‌های مختلف کارگاه کار کند، انواع مختلفی از وسایل اتصال از قبیل قلاب، وزنه فلزی سنگین، گیره C شکل و یا گیره‌های اتصال ویژه مطابق شکل ۲ ـ ۱۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۲ ـ ۱۵ یک نوع خاص از گیره اتصال چرخشی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ ـ ۱۴ گیره C شکل از انواع گیره‌های اتصال و با ظرفیت ۶۰۰ آمپر. دهانه باز، آن را برای قطعات با ضخامت‌های زیاد مناسب می‌سازد.



شکل ۲ ـ ۱۵ این گیره چرخشی هنگامی استفاده می‌شود که قطعه باید بچرخد. گیره با قطعه می‌چرخد ولی کابل اتصالی نمی‌گردد و نمی‌پیچد.

۲ ـ ۷ ـ ۲ انبر الکترود[8]

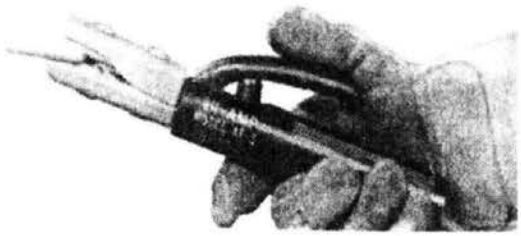
انبرهای فلزی

انبر فلزی الکترود وسیله‌ای برای نگه داشتن الکترود به‌صورت مکانیکی است. این وسیله جریان الکتریکی را از کابل جوشکاری به‌الکترود می‌رساند و دارای یک دسته عایق می‌باشد که دست جوشکار را از حرارت و جریان برق محافظت می‌کند.

فک‌های انبر باید به‌گونه‌ای طراحی شوند تا بتوانند الکترود را محکم و در زاویه دلخواه نگه دارند. آنها باید از فلزی با خاصیت هدایت الکتریکی زیاد ساخته شده و در مقابل درجه حرارت زیاد مقاوم باشند (شکل ۲ ـ ۱۶). در بسیاری از انبرها، فک‌هایی که در اثر استفاده نادرست، می‌سوزند و خراب می‌شوند، قابل تعویض با یک فک جدید می‌باشند، انبر باید سبک، متعادل و دارای گیره راحت باشد. تعویض الکترود باید آسان باشد و مقاومت کافی برای استفاده زیاد و سخت را داشته باشد. قسمت‌های انتقال جریان باید به‌اندازه کافی بزرگ باشند تا از گرم شدن بیش از حد آنها که باعث گرم شدن زیاد دسته انبر برای جوشکار خواهد شد، جلوگیری شود. به‌همین دلیل اندازه انبر باید متناسب با اندازه ماشین جوشکاری باشد، بدین معنی که برای یک ماشین جوشکاری با ظرفیت ۴۰۰ آمپر، انبر الکترود بزرگتری نسبت به‌یک ماشین با ظرفیت ۲۰۰ آمپر نیاز است. اغلب انبرها به‌طور کامل عایق بوده و در محلی از قطعه فلز مورد جوش قرار می‌گیرند که خطر تشکیل مدار کوتاه (چسبیدن نوک انبر به‌قطعه) وجود نداشته باشد. این مورد مخصوصاً مناسب کار در فواصل خیلی نزدیک به‌هم می‌باشد.

8. *Electrode holder*

انبر معمولاً با اتصال بدون لحیم به‌کابل جوشکاری متصل می‌شود. در این حالت وجود یک اتصال خوب جهت جلوگیری از گرم شدن بیش از حد گیره و کابل ضروری است.



شکل ۲ ـ ۱۶ انبر الکترود با عایق کامل. این انبر بدون خطر تشکیل مدار کوتاه به‌قطعه کار وصل می‌شود.

۲ ـ ۸ تجهیزات حفاظتی

۲ ـ ۸ ـ ۱ ماسک دستی[9] و ماسک کلاهی[10]

نور درخشان حاصل از قوس الکتریکی دارای دو نوع پرتو نامرئی می‌باشد که برای چشم‌ها و پوست بدون محافظ مضر است. یکی از پرتوها اشعه فرابنفش و دیگری اشعه مادون قرمز است. تکرار مشاهده این نور خواه به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم باعث درد چشم می‌شود که البته درد آن دایمی نیست. جوشکاران این نوع درد را «ریگ داغ در چشم*» می‌گویند. این پرتوها گاه سوزشی مشابه آفتاب سوختگی و گاهی تولید عفونت می‌کنند. آنها در فواصل کمتر از ۱۵ متر بر روی چشم و در فاصله‌ای کمتر از ۶ متر بر روی پوست اثر می‌گذارند.

پوشش‌های حفاظتی تنها برای مقابله با پرتوهای زیان‌آور نبوده بلکه جهت حفاظت جوشکار در مقابل قطره‌های فلز مذاب نیز هستند که بخصوص در جوشکاری‌های قائم و سقفی به‌جوشکار صدمه می‌زند. ماسک دستی، طبق شکل ۲ ـ ۱۷ دارای دسته‌ای است که شخص با استفاده از آن ماسک را جلو صورت خود نگه می‌دارد. بازرسین و ناظرین جوشکاری از این نوع ماسک استفاده می‌کنند. این نوع ماسک برای جوشکاری مناسب نیست چرا که در هنگام استفاده از آن جوشکار تنها با یک دست قادر به‌کار کردن می‌باشد و کنترل الکترود و انجام همزمان یک عمل ضروری دیگر با یک دست امکان‌پذیر نیست.

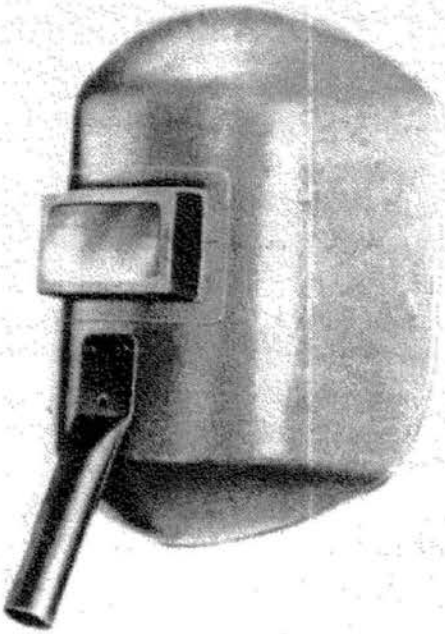
ماسک کلاهی، طبق شکل ۲ـ۱۸ که گاهی کلاه ایمنی[11] یا سربند[12] نیز خوانده می‌شود، مانند یک کلاه استفاده می‌شود. این ماسک به‌یک نوار روی سر[13] قابل تنظیم لولا می‌شود که به‌آن اجازه حرکت به‌سمت بالا یا پایین را به‌دلخواه می‌دهد. در هنگام استفاده از این ماسک هر دو دست جهت گرفتن انبر الکترود و شرکت در اعمال دیگر آزاد هستند.

---

9. *Hand shield*
10. *Head shield*

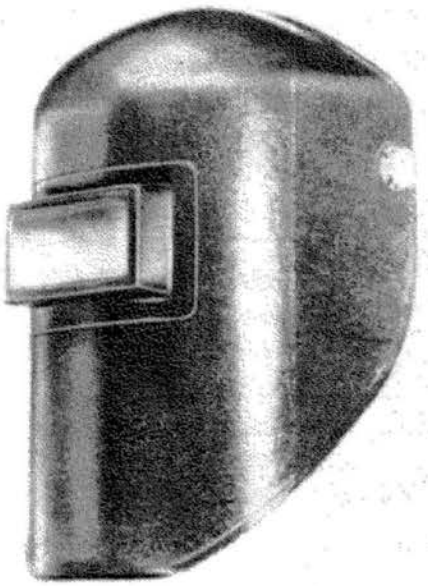
* اگر چشم در حین کار تحت تابش مستقیم قرار گیرد، هنگام خواب جرقه‌ها و نورهایی به‌خواب جوشکار می‌آید که به‌آن «چراغی» در شب می‌گویند.

11. *Helmet*
12. *Hood*
13. *Head band*



شکل ۲ ـ ۱۷ ماسک دستی معمولاً توسط بازرسین و ناظرین جوشکاری استفاده می‌شود.

وسایل ایمنی مذکور برای قسمت فوقانی سر تهیه شده‌اند، ولی جوشکاران باید یک نوع کلاه چرمی[۱۴] جهت حفاظت کامل‌تر بپوشند. این پوشش باید صاف بوده و فاقد جیب یا لبه‌های گردشده باشد تا قطرات فلز مذاب را در خود نگه ندارد.



شکل ۲ ـ ۱۸ ماسک کلاهی استاندارد.

14. Leather cap

هر دو نوع ماسک دستی و کلاهی از مواد فیبری فشرده،عایق و مقاوم به‌حرارت ساخته شده‌اند. این ماسک‌ها به‌طور کامل ناحیه سر و گردن را از ذرات فلز، دود، جرقه و پرتوهای خطرناک محافظت می‌کنند. جهت کاهش انعکاس نور معمولاً به‌رنگ سیاه می‌باشند. این ماسک‌ها دارای یک قاب پنجره‌ای برای نگه داشتن شیشه رنگی محافظ[15] هستند که اجازه می‌دهد جوشکار با ایمنی کامل عملیات را زیر نظر داشته باشد. اندازه این شیشه ۵×۱۱/۲۵ سانتی‌متر می‌باشد و رنگی است، به‌گونه‌ای که مانعی در مقابل اشعه فرابنفش و مادون قرمز و بسیاری از اشعه‌های مرئی ناشی از قوس الکتریکی می‌باشد. رنگ‌های مختلفی جهت تیره کردن شیشه محافظ ممکن است به‌کار رود. چگالی رنگ انتخاب‌شده بستگی به‌میزان درخشش قوس دارد که این درخشش براساس نوع الکترود و میزان جریان متغیر است. برای جوشکاری قوسی با الکترود فلزی با شدت جریان تا ۳۰۰ آمپر، درجه تیرگی ۱۰ و برای شدت جریان بیش از ۳۰۰ آمپر و برای جوش قوسی با گاز، درجه ۱۲ توصیه می‌شود. شیشه‌های تیره با کیفیت خوب، جذب ۹۹/۵ درصد یا بیشتر از اشعه مادون قرمز و جذب ۹۹/۷۵ درصد یا بیشتر از اشعه فرابنفش را تضمین می‌کنند. استفاده از شیشه‌های با صافی ضعیف توصیه نمی‌شود.

وجهی از شیشه محافظ که رو به‌جوش قرار دارد (وجه بیرونی) توسط یک شیشه شفاف[16] محافظت می‌شود. این روکش به‌خاطر حفاظت شیشه تیره اصلی (که معمولاً گران‌قیمت است) از پاشیدگی فلز مذاب و شکستگی است. شیشه روکش نسبتاً ارزان‌قیمت بوده و ممکن است با یا بدون پوشش شفاف[17] تولید شود. روکش‌هایی که تحت عملیات شیمیایی خاص قرار می‌گیرند دوام بیشتری نسبت به‌انواع دیگر دارند. هنگامی که شیشه روکش بر اثر دود و بخار و ترشحات جرقه جوشکاری کثیف می‌شود، باید تعویض گردد. جوشکاری با شیشه لکه‌دار برای دید مضر بوده و موجب التهاب چشم می‌گردد. بعضی از جوشکاران محافظت هر دو طرف شیشه رنگی را با استفاده از روکش شفاف ترجیح می‌دهند.

نوع دیگری از ماسک کلاهی در شکل ۲ ـ ۱۹ نشان داده شده است. این نوع به‌خاطر مجهز بودن به‌یک عینک (یا نقاب) بازشو متمایز از انواع دیگر است. گیره‌ای که شیشه محافظ اصلی و روکش شفاف را نگه می‌دارد، با اشاره انگشت بالا زده می‌شود. یک روکش شیشه‌ای شفاف که در جای خود ثابت است چشم‌ها را از پوسته داغ در هنگام بازرسی جوش گرم و همچنین از ذرات گل و فلز پخش‌شده در هوا هنگام تمیز کردن و برس زدن جوش محافظت می‌کند. این نوع مخصوصاً در هنگام کار در فواصل نزدیک به‌هم و محیط بسته که در آوردن کل ماسک مشکل می‌باشد، مورد استفاده است.

15. *Protective lens*

16. *Cover glass*

17. *Transparent coating*

شکل ۲ ـ ۱۹ ماسک جوشکاری با نقاب بازشو که اجازه می‌دهد جوشکار بدون درآوردن ماسک، جوش را بازرسی کرده و با برس سیمی آن را تمیز کند.

ماسک‌های ویژه

ماسک‌های کلاهی زیر برای شرایط ویژه طراحی شده‌اند:

- شیشه‌های با حوزه دید وسیع برای دید بهتر ممکن است در ماسک‌های استاندارد معمولی قرار داده شوند. اندازه این شیشه‌ها ۱۳/۱۲۵×۱۱/۲۵ سانتی‌متر است.
- ماسک‌های کلاهی چرمی[18]، در مکان‌های صعب‌الورود که فضای کافی برای ماسک‌های معمولی وجود ندارد استفاده می‌شود. این نوع دارای یک دریچه تهویه گرد و کوچک در قسمت فوقانی خود می‌باشد.
- ماسک‌های از جنس فیبر فلزی با کلاهک ایمنی که استفاده از آن جهت حفاظت در مقابل خطر سقوط اجسام و یا برخورد با اشیا آویزان در کارگاه پیشنهاد می‌شود.
- ماسک کلاهی با تهویه مطبوع[19] دارای یک مخزن هوای تازه به‌همراه شلنگ تغذیه است که مستقیماً به‌سمت ناحیه تنفس هدایت می‌شود. این نوع ماسک، سر و صدا را کاهش داده و جهت عبور هوا هیچ مزاحمتی برای چشم ندارد. این نوع در کار تعمیر و نگهداری و مواقعی که وجود گرما و دود و بخار ایجاد مشکل می‌کند، مورد استفاده است.
- لوله‌های تنفس که از دو جهت برای جوشکاری اطمینان و ایمنی ایجاد می‌کند. اول آنکه هوای تمیز و خنک که در مقابل بخارات سمی محافظت شده را فراهم می‌کنند. دوم، آنکه این لوله‌ها دارای یک شیر تنفس مخصوص هستند که بخارات را از داخل ماسک خارج کرده و دید واضح برای جوشکار فراهم می‌کنند.

---

18. Chrome leather helmet

19. Air-conditioned helmet

۲ ـ ۸ ـ ۲ عینک ایمنی[20]

استفاده از عینک در پشت ماسک ایمنی یک نیاز ضروری است (شکل ۲ ـ ۲۰)، به‌خصوص در کارگاه‌هایی که کارگران جوشکار نزدیک یکدیگر کار می‌کنند. تحت این شرایط حفاظت چشم‌ها در مقابل درخشش قوس بدون عینک امکان‌پذیر نیست. این عینک‌ها همچنین چشم جوشکاران را در هنگام نظارت جوش تکمیل شده، هنگام تمیز کردن گِل جوش و سنگ‌زنی جوش معیوب محافظت می‌کنند و توسط دستیاران جوشکاری، ناظرین، بازرسین و دیگر افرادی که با جوش سر و کار دارند استفاده می‌شود. عینک باید سبک وزن، دارای تهویه مناسب به‌منظور جلوگیری از عرق کردن شیشهٔ داخلی و راحت باشد. جهت حفاظت چشم از نور شدید، اطراف این عینک‌ها باید دارای چشم‌بند، یا سایه‌بان بوده و شیشه‌های آنها رنگی (با درجه تیرگی کم) باشد.

شکل ۲ ـ ۲۰ این جوشکار در پشت ماسک ایمنی خود از عینک استفاده کرده است. عینک چشم را از اشعه فرابنفش و نور شدید فلز مذاب حوضچه جوشکاری محافظت می‌کند.

۲ ـ ۸ ـ ۳ لباس محافظ[21]

در هنگام جوشکاری جرقه‌های آتش و قطرات فلز مذاب که توسط قوس الکتریکی ایجاد می‌شود به‌طور مداوم پاشیده می‌شود. اگر این قطرات و جرقه‌ها با پوست بدون محافظ تماس پیدا کند موجب سوختگی شدید خواهد شد.

20. *Flash goggle*
21. *Protective clothing*

لباس‌های معمولی ضخامت کافی جهت مقابله با این موارد را نداشته و مواد آنها در مقابل آتش مقاوم نیستند. جوشکار باید در هنگام کار لباس جوشکاری بپوشد که از پارچه ضخیم برای محافظت بدن در مقابل اشعه‌های تابیده شده از قوس الکتریکی و همچنین جرقه آتش و فلز مذاب دوخته شده است. شکل ۲ ـ ۲۱ جوشکاری را نشان می‌دهد که به‌طور مناسب در مقابل جرقه‌های آتش، اشعه و حرارت محافظت شده است.

همیشه پوشیدن لباس‌های محافظ به‌طور کامل که در بالا شرح داده شد برای همه نوع جوشکاری و در همه موقعیت‌ها لازم نیست. جوشکار می‌تواند بهترین قاضی در مورد لباس محافظ براساس نوع کار خود باشد. استفاده از دستکش جوشکاری همواره جهت حفاظت دست‌ها لازم است. دستکش‌ها را از چرم، پنبه نسوز و دیگر مواد مقاوم حرارتی می‌سازند.

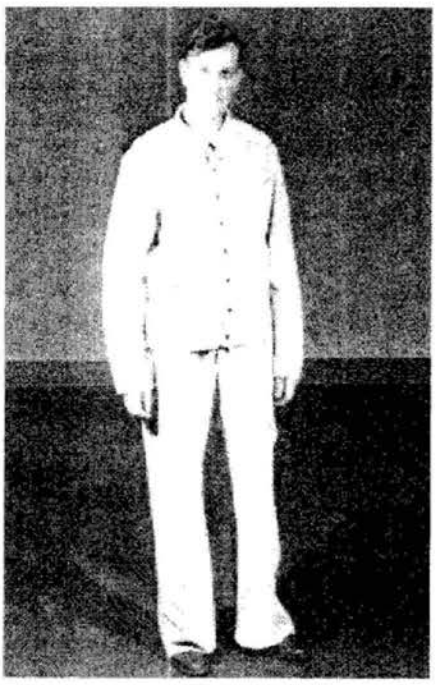
آستین‌های چرمی، شانه‌بند و پیش‌بند، لباس و بدن جوشکار را از آسیب حرارت و جرقه محفوظ می‌دارد (شکل ۲ـ۲۳). این لباس‌ها هنگامی که جوشکاری در موقعیت قائم و یا بالای سر است، کاملاً موردنیاز می‌باشد. هنگامی که

شکل ۲ ـ ۲۱ یک کارآموز جوشکاری با لباس محافظ مناسب.

شکل ۲ ـ ۲۲ دستکش چرمی جوشکاری.

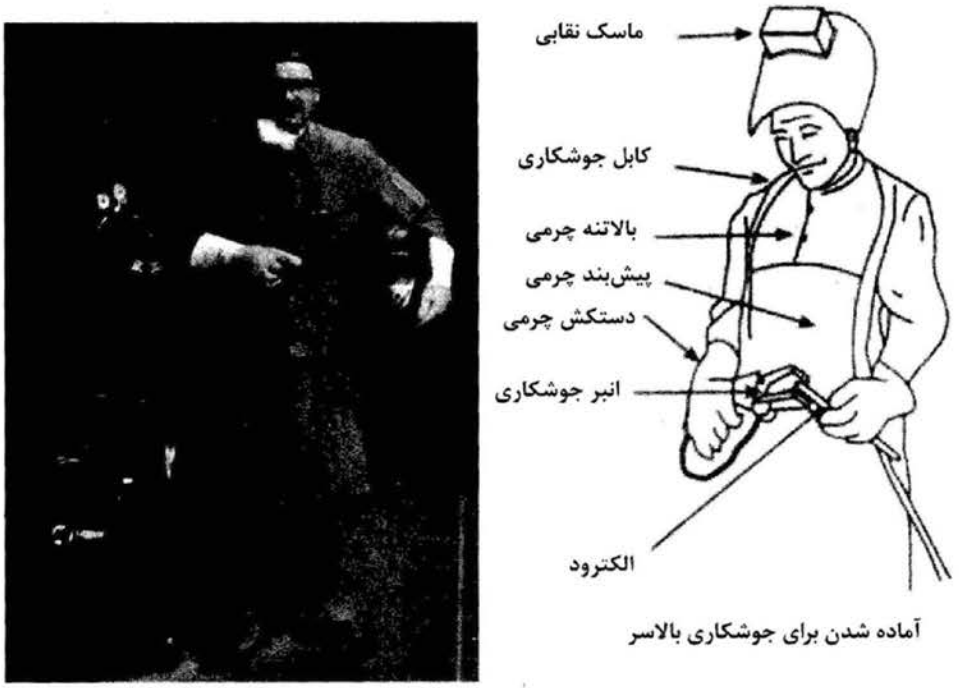
قسمت اعظم کار در موقعیت نشسته انجام می‌شود، جوشکار باید از یک لباس گشاد یا پیش‌بند چاک‌دار استفاده کند، زیرا پیش‌بند کامل (بدون درز) به‌دور خود می‌پیچد و برای جوشکار ایجاد مزاحمت می‌کند. ممکن است این نوع لباس گشاد از جنس چرم به‌همراه یک ژاکت چرمی پوشیده شود (شکل ۲ ـ ۲۴).

شکل ۲ ـ ۲۳ لباس محافظ به‌حفاظت جوشکار در مقابل جرقه و حرارت کمک می‌کند.



شکل ۲ ـ ۲۴ پوشش کامل چرمی و لباس‌های گشاد چرمی موجب حفاظت کل بدن می‌گردد.

در جوشکاری باید از کفش‌های تخت ساق بلند استفاده شود. پا و ساق پا می‌توانند توسط ساق‌بند و مچ‌بند بیشتر محافظت شوند. سوختگی در پا بسیار دردناک بوده و به‌سرعت عفونی می‌شود و به‌کندی التیام می‌یابد. به‌همین جهت حفاظت پا و استفاده از کفش‌های ایمنی در کارگاه جوشکاری بسیار مهم است. لبه‌های گردشده آستین پیراهن و یا پاچه‌های برگشته شلوار مکان مناسبی برای قرار گرفتن قطرات و جرقه‌های فلز مذاب و داغ می‌باشند و به‌همین جهت از قرار دادن آنها در لباس باید خودداری کرد.



شکل ۲ ـ ۲۵ وسایل فردی جوشکاری.

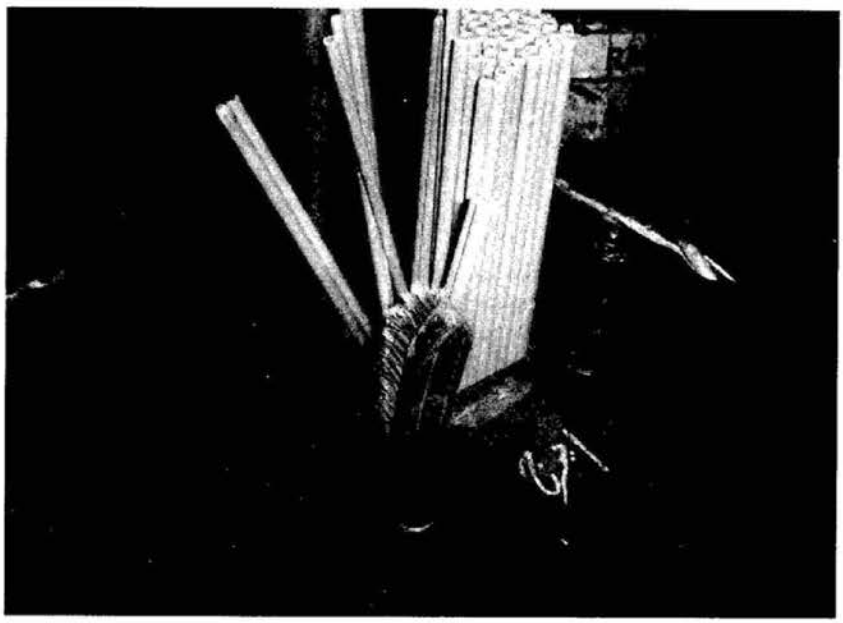
۲ ـ ۹ ابزار تمیزکاری گل‌جوش

بعد از سرد شدن نوار جوش و قبل از انجام نوار جوش دوم روی آن (عبور دوم یا پاس دوم)، باید گل روی عبور اول (پاس اول) برداشته شود. این عمل به‌کمک چکش گل‌زن (شکل ۲ ـ ۲۶) و فرچه فلزی انجام می‌شود. یعنی ابتدا پاس اول گل‌زنی‌شده و سپس روی آن فرچه سیمی کشیده می‌شود. جوشکاران دقیق قبل از اجرای پاس، به‌کمک یک لوله لاستیکی، درز را فوت کرده و تمیز می‌نمایند.

شکل ۲ ـ ۲۶ چکش گل‌زن و فرچه فلزی.

۲ ـ ۱۰ ابزار نگهداری الکترود

جهت حفاظت از الکترودها و دسته‌بندی آنها، در صورت استفاده از چند نوع الکترود، باید برای هر جوشکار یک جعبه الکترود مناسب تهیه شود. (شکل ۲ ـ ۲۷)



شکل ۲ ـ ۲۷ جعبه الکترود.

۲ ـ ۱۱ ابزار پیش‌گرمایش درز

جهت پیش‌گرم کردن درزهای جوش قبل از جوشکاری بخصوص در روزهای سرد، مطابق دستورالعمل‌های جوشکاری از گرم کن دستی استفاده می‌شود (شکل ۲ ـ ۲۸).

شکل ۲ ـ ۲۸ گرم‌کن درز اتصال.

۲ ـ ۱۲ ابزارهای اندازه‌گیری

از این ابزارها برای تعیین محل برش استفاده می‌شود. یکی از سودمندترین ابزارهای اندازه‌گیری، متر فولادی فنری است. معمولاً متر فنری ۳ متری نیازهای متعارف را برآورده می‌سازد، اما در پروژه‌های بزرگ ممکن است به‌متر ۱۵ متری نیاز باشد. برای انجام کارهای کوچکتر می‌توان از یک خط‌کش فولادی ۳۰ یا ۵۰ سانتی‌متری استفاده نمود. همیشه باید یک خط‌کش پلاستیکی ۱۵ سانتی‌متری هم در جیب لباس‌کار جوشکار موجود باشد.

۲ ـ ۱۳ ابزارهای نشانه‌گذاری

از این ابزارها برای رسم خط برش، بر طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، استفاده می‌شود. هنگام کار با مشعل برشکاری، به‌خط نشانه‌ای نیاز می‌باشد که بر اثر شعله محو نشود. ابزارهای نشانه‌گذاری عبارتند از سوزن خط کشی و سنبه‌نشان.

به‌کمک سنبه‌نشان می‌توان نشانه‌های لازم جهت تعیین محل سوراخ‌کاری‌ها را روی قطعات مشخص نمود.

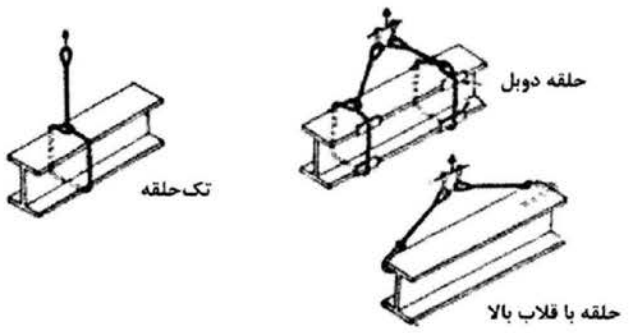
روش دیگری برای نشانه‌گذاری فلز به‌منظور برشکاری با مشعل استفاده از سنگ صابون است. اثر این سنگ مانند اثر گچ است، اما در دمای بالای برشکاری نمی‌سوزد. بنابراین مناسب است همیشه چند قطعه سنگ صابون در جعبه ابزار موجود باشد.

برای رسم کمان یا دایره از پرگار فلزی استفاده می‌شود؛ این وسیله نوعی سوزن خط کشی شبیه پرگار است، اما دو نوک فولادی تیز دارد. لازم به‌ذکر است از سوزن خط کشی فقط باید برای رسم خط برش استفاده شود. این نکته به‌ویژه در هنگام خط کشی ورق صادق است، زیرا این خط تمرکز تنش ایجاد می‌کند و بسیار احتمال می‌رود که ترک یا پارگی از محل خط کشی آغاز شود.

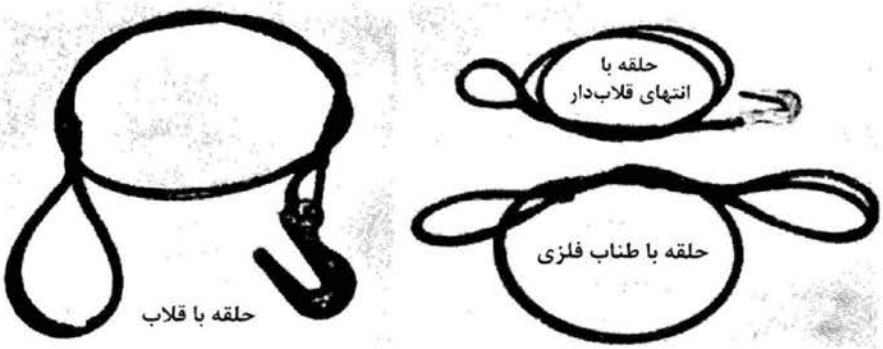
۲ ـ ۱۴ ابزار نصب

ابزار نصب و وسایل و ماشین‌آلاتی که در نصب سازه‌های فولادی به‌کار می‌روند، بسته به‌نوع و اندازه سازه می‌توانند انواع مختلف داشته باشند. از طرف دیگر اغلب این وسایل طبق استانداردهای سازندگان مختلف تولید می‌شوند که از بین آنها انواع مخصوصی به‌اندازه و طرح‌های لازم را مصرف‌کنندگان متعدد انتخاب می‌کنند. هرگاه بخواهند باری را به‌قلاب جراثقالی آویزان کنند، اگر اندازه و وزن بار اجازه چنین عملی را بدهد، می‌توان مطابق شکل ۲ ـ ۲۹ آن را به‌وسیله حلقه‌ای از طناب فلزی به‌قلاب آویزان کرد. طناب اصلی از یک قطعه طناب با طول مناسب که هر دو انتهای آن را به‌صورت حلقه کوچکی در آورده‌اند، تشکیل می‌شود. این طناب را دور قطعه به‌گونه‌ای که یکی از دو سر طناب از حلقه‌ی کوچک سر دیگر آن بگذرد، مهار می‌کنند.

میله اهرم، اسباب کشش، تخماق برای جفت کردن و رسانیدن قطعه به‌وضعیت مورد دلخواه آن برای اتصال به‌کار می‌روند. از پین و آچار کج برای همسو کردن سوراخ‌های قطعات استفاده می‌شود (شکل ۲ ـ ۲۹ ـ پ).



الف ـ روش آویزان کردن قطعات فلزی



ب ـ انواع حلقه‌های متداول طناب‌های فلزی

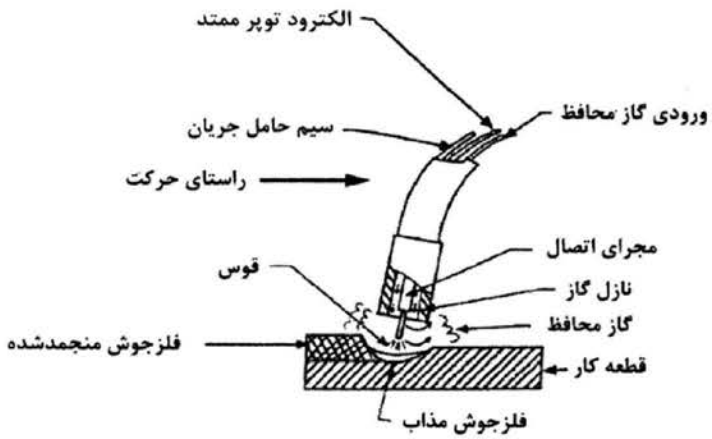
پ ـ ابزار کشش و جفت کردن قطعات فولادی

شکل ۲ ـ ۲۹ ابزار نصب سازه‌های فولادی.

۲ ـ ۱۵ تجهیزات جوشکاری تحت حفاظت گاز

۲ ـ ۱۵ ـ ۱ انبر جوشکاری تحت حفاظت گاز و سایر متعلقات

کار اصلی انبر جوشکاری تحت حفاظت گاز (شکل ۲ ـ ۳۰) هدایت الکترود و گاز محافظ در منطقه جوش و انتقال انرژی الکتریکی به‌الکترود می‌باشد. صرف‌نظر از نوع کاربرد و برای ایجاد حداکثر کاربری، انواع مختلف انبر جوشکاری تحت حفاظت گاز طراحی و تولید شده است: انبرهای سنگین مخصوص کار با جریان بالا و انبرهای سبک برای کار با جریان ضعیف و جوشکاری در مکان نامناسب.



شکل ۲ ـ ۳۰ فرآیند جوشکاری تحت حفاظت گاز.

موارد ذیل اجزای اصلی انبر جوشکاری تحت حفاظت گاز می‌باشند:

- مجرای اتصال
- نازل گاز
- مجرای سیم‌جوش (فنر تورچ)
- شلنگ سیم‌جوش
- شلنگ آب (برای انبرهای آب خنک)
- کابل انتقال جریان
- سوئیچ کنترل

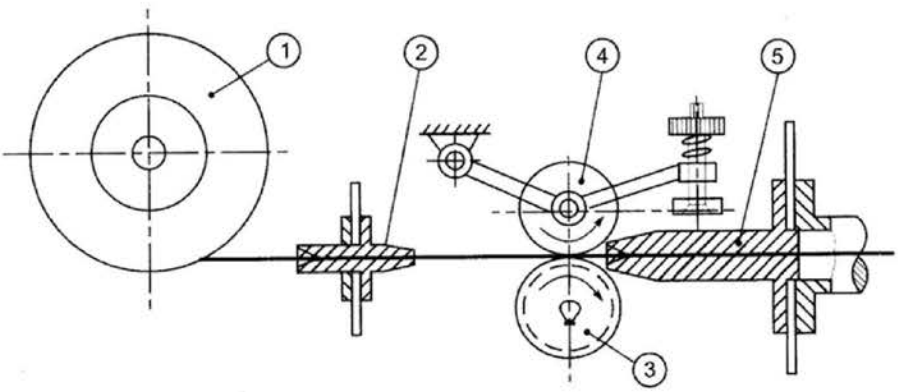
از مجرای اتصال که معمولاً از جنس مس یا آلیاژ مس است برای انتقال انرژی الکتریکی به‌سیم‌جوش و هدایت سیم‌جوش به‌سمت قطعه کار استفاده می‌شود. مجرای اتصال از طریق کابل جریان به‌منبع تغذیه متصل است. سطح داخلی مجرای اتصال بسیار مهم است، چرا که ضمن ایجاد تماس الکتریکی خوب، سیم‌جوش نیز باید به‌راحتی از

طریق آن تغذیه شود. با توجه به‌سایز سیم‌جوش و مواد جوشکاری، سایز مناسب مجرای اتصال انتخاب می‌شود. مجرای اتصال باید در جای خود کاملاً محکم و دقیقاً در مرکز نازل گاز محافظ قرار گرفته باشد.

نازل گاز، ستونی است که یک جریان یکنواخت از گاز محافظ را به‌منطقه جوش هدایت می‌کند، این جریان یکنواخت اهمیت بسیاری در ایجاد محافظت کافی از فلز جوش مذاب در مقابل آلودگی هوا دارد.

۲ ـ ۱۵ ـ ۲ موتور تغذیه سیم جوش

موتور تغذیه، سیم جوش را در طول انبر جوشکاری تحت حفاظت گاز به‌سمت قطعه کار هدایت می‌کند. تغذیه‌کننده‌های «نیمه‌خودکار ـ سرعت ثابت» دارای کنترل‌کننده‌های الکترونیکی هستند که موجبات استارت منظم فرآیند، تنظیم خودکار نوسانات ولتاژ و واکنش‌های لحظه‌ای به‌سرعت تغذیه سیم جوش را فراهم می‌کند. در تغذیه‌کننده‌های مختلف معمولاً سرعت بین ۱/۹ تا ۲/۵ متر در دقیقه می‌باشد (شکل ۲ ـ ۳۱).

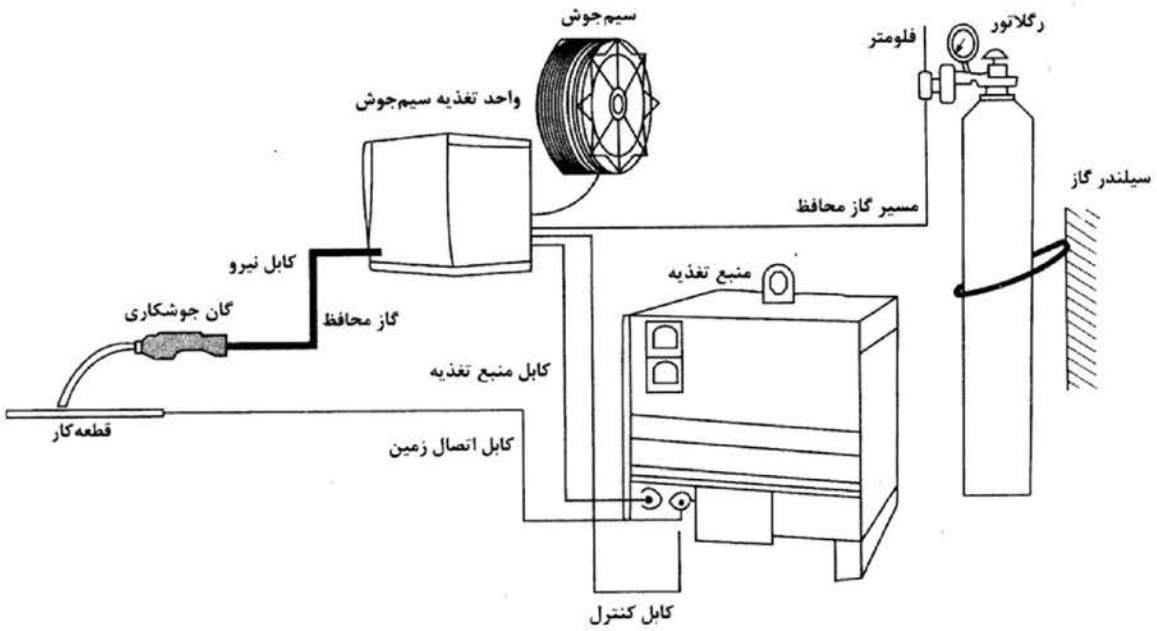


1. حلقه سیم‌جوش
2. هدایت‌کننده سیم‌جوش
3. غلتک تغذیه سیم‌جوش
4. غلتک فشاری
5. هدایت سیم‌جوش در نازل

شکل ۲ ـ ۳۱ واحد تغذیه سیم.

۲ ـ ۱۵ ـ ۳ کنترل جوشکاری

در فرآیندهای نیمه خودکار، کنترل جوشکاری و موتور تغذیه سیم جوش در یک جعبه واحد قرار دارند (شکل ۲ ـ ۳۲). وظیفه اصلی کنترل جوشکاری تنظیم سرعت موتور تغذیه سیم جوش از طریق استفاده از سیستم کنترل الکترونیکی می‌باشد. سرعت موتور به‌صورت دستی قابل تنظیم است و می‌توان آن را در سرعت‌های متنوعی قرار داد که با یک منبع تغذیه ولتاژ ثابت منجر به‌ایجاد جریان‌های الکتریکی متفاوت می‌شوند. با استفاده از سلنوئیدها، جریان گاز و آب نیز همزمان با آغاز و پایان جوشکاری تنظیم می‌شود. کنترل همچنین می‌تواند ضمن تنظیم توان آغاز و پایان جریان، جهت حفاظت از حوضچه جوش مذاب، مقدار کمی گاز به‌عنوان گاز بعد از جریان اعمال نماید.



شکل ۲ ـ ۳۲ فرآیند نیمه‌خودکار.

۲ ـ ۱۵ ـ ۴ رگلاتورهای گاز محافظ

برای نگه داشتن سرعت جریان و فشار گاز محافظ در طول جوشکاری به‌یک سیستم تنظیم‌کننده نیاز است. رگلاتور، فشار مخزن گاز را تا رسیدن به‌یک فشار ثابت کاهش می‌دهد. رگلاتورها دومرحله‌ای یا تک‌مرحله‌ای می‌باشند و می‌توان جریان‌سنج را روی خود رگلاتور نصب نمود. فشار در رگلاتورهای دومرحله‌ای، ثبات بیشتری نسبت به رگلاتورهای تک‌مرحله‌ای دارد (شکل ۲ ـ ۳۳).

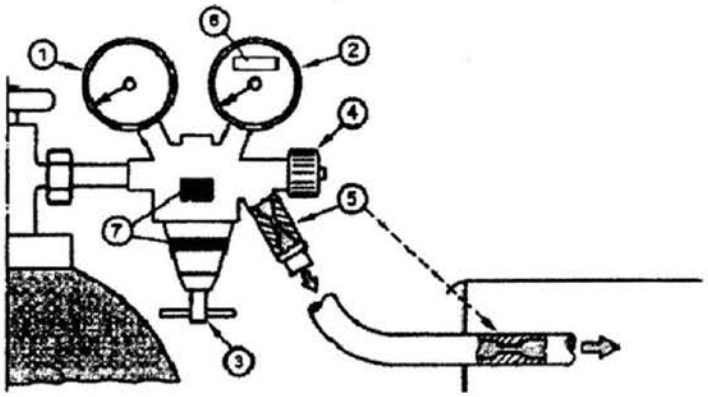
۲ ـ ۱۵ ـ ۵ منبع تغذیه

منبع تغذیه، انرژی الکتریکی را برای ایجاد قوس بین سیم‌جوش و قطعه کار تأمین می‌کند. در اکثریت قریب به‌اتفاق کاربردهای GMAW، از جریان مستقیم ـ قطبیت مثبت استفاده می‌شود. بنابراین کابل مثبت به‌انبر و کابل منفی به‌قطعه کار متصل می‌شود.

انواع اصلی منابع تغذیه جریان مستقیم عبارتند از:

۱ ـ موتور ـ ژنراتور (چرخشی)

۲ ـ ترانسفورماتور ـ رکتیفایر (استاتیک)



شکل ۲ ـ ۳۳ انواع رگلاتورهای گاز محافظ با نمایشگر نوع گاز.

معمولاً در کاربردهای کارگاهی که منبع انرژی الکتریکی در دسترس قرار دارد، ترانسفورماتور ـ رکتیفایر ترجیح داده می‌شود، در حالی که از موتور ـ ژنراتور در کاربردهایی استفاده می‌شود که منبع الکتریکی در دسترس نمی‌باشد. با افزایش کاربردهای GMAW، این نکته روشن شده که ماشین‌های ولتاژ ثابت دارای عملکرد بهتری، مخصوصاً در مورد مواد آهنی می‌باشند.

استفاده از منبع تغذیه ولتاژ ثابت، به‌همراه یک تغذیه سیم جوش سرعت ثابت باعث ایجاد ولتاژ ثابت در طول جوشکاری می‌شود. دلیل اصلی انتخاب منابع ولتاژ ثابت، به‌علت خودکار بودن تنظیم طول قوس در سیستم می‌باشد.

۲ ـ ۱۶ تجهیزات جوشکاری قوسی زیرپودری

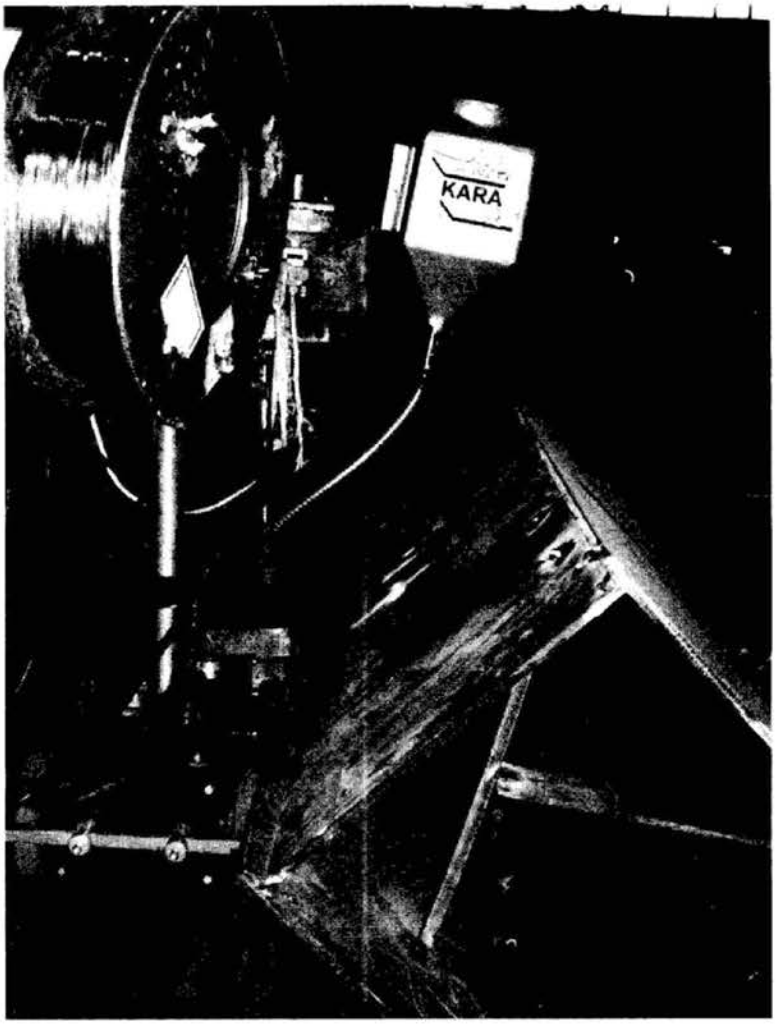
تجهیزات مورد نیاز در روش جوشکاری قوس زیرپودری عبارتند از:

۱ ـ منبع نیرو؛
۲ ـ سیستم تغذیه الکترود؛
۳ ـ سیستم توزیع پودر؛
۴ ـ سیستم تنظیم حرکت؛
۵ ـ سیستم کنترل فرآیند.

سیستم بازیابی پودر ذوب‌نشده نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از تجهیزات جانبی مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲ ـ ۳۴).

۲ ـ ۱۶ ـ ۱ منبع تغذیه

منبع تغذیه مورد استفاده در جوشکاری قوسی زیرپودری، نقش مهمی را ایفا می‌کند. انواع مختلفی از منابع تغذیه



شکل ۲ ـ ۳۴ تجهیزات جوش زیرپودری.

برای کاربرد در روش جوشکاری قوس زیرپودری مناسب هستند. منبع نیروی جریان مستقیم می‌تواند یک ترانسفورماتور ـ رکتیفایر یا یک موتور ژنراتور با ولتاژ ثابت یا جریان ثابت و یا خروجی انتخابی باشد. منابع نیروی جریان متناوب معمولاً از نوع ترانسفورماتور هستند و قادر به‌ایجاد موج خروجی جریان ثابت یا ولتاژ ثابت می‌باشند. از آنجا که جوشکاری قوس زیرپودری، به‌طور کلی فرآیندی با جریان بالا و چرخه کارکرد بالا است، استفاده از منبع نیرو با توانایی ایجاد شدت جریان بالا در ۱۰۰٪ چرخه کارکرد پیشنهاد می‌شود.

۲ ـ ۱۶ ـ ۲ سیستم کنترل

سیستم‌های کنترلی که در روش جوشکاری قوس زیرپودی نیمه‌خودکار به‌کار می‌روند، کنترل‌کننده‌های ساده سرعت تغذیه سیم جوش می‌باشند. کنترل‌کننده‌های به‌کار رفته در منابع نیروی ولتاژ ثابت، سرعت تغذیه سیم را ثابت نگاه

می‌دارند و کنترل‌کننده‌های به‌کار رفته در منابع جریان ثابت، ولتاژ قوس را بررسی می‌کنند و سرعت تغذیه سیم را برای نگهداشتن ولتاژ تغییر می‌دهند.

ساده‌ترین سیستم‌های تغذیه سیم جوش دارای یک کنترل آنالوگ هستند که با یک کلید، سرعت تغذیه سیم جوش را ثابت نگه می‌دارند. جدیدترین سیستم‌های تغذیه سیم جوش که در روش جوشکاری قوس زیرپودری خودکار به‌کار گرفته می‌شوند، دارای کنترل‌های دیجیتالی ریزپردازنده‌ای هستند. این کنترل‌کننده‌ها ولتاژ جوش و سرعت تغذیه سیم جوش را در مقدار اولیه خود حفظ می‌کنند. مزیت بزرگ کنترل‌کننده‌های دیجیتال، کنترل دقیق فرآیند جوشکاری است و محدودیت آنها این است که با برخی از انواع منابع نیرو قابل استفاده نیستند و قابلیت انعطاف کمتری نسبت به‌اکثر کنترل‌کننده‌های آنالوگ دارند.

کنترل‌کننده‌های دیجیتالی در حال حاضر فقط برای استفاده در منابع نیروی ولتاژ ثابت موجود می‌باشند. این کنترل‌کننده‌ها دارای تنظیم سرعت تغذیه سیم جوش (کنترل ولتاژ)، شروع و پایان جوشکاری، روشن و خاموش کردن حرکت خودکار یا دستی، تغذیه یا عدم تغذیه سیم جوش، کنترل پر کردن چاله جوش و روشن ـ خاموش کردن تغذیه پودر هستند.

۲ ـ ۱۶ ـ ۳ سری و انبر جوشکاری

سری جوش[۲۲] در جوشکاری قوس زیرپودری از قسمت‌های مختلف شامل موتور تغذیه سیم جوش، مجموعه کلاف تغذیه، مجموعه مشعل، نوک اتصال‌دهنده جریان[۲۳] و تجهیزاتی برای نصب و نگهداری سری تشکیل شده است. یک نازل پودر بر روی سری جوش تعبیه می‌شود تا پودر را در قسمت مورد نیاز بریزد.

موتورهای تغذیه سیم جوش، معمولاً موتورهای با طول عمر بالا[۲۴] از نوع مغناطیسی به‌همراه جعبه دنده هستند که سرعت تغذیه سیم توسط آنها ۲۳۵ mm/s - ۸ می‌باشد. در برخی موارد که سیم جوش از طریق یک لوله وارد می‌شود، با استفاده از غلتک‌هایی با شیار V شکل بر روی آن، تغذیه یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند. طرح‌های مشعل بسیار متنوع هستند، اما نقش آنها همواره یکسان می‌باشد. مشعل سیم جوش را به‌قسمت اتصال در محل جوش هدایت می‌کند و جریان الکتریکی را به‌سیم جوش انتقال می‌دهد.

۲ ـ ۱۶ ـ ۴ تجهیزات کمکی

تجهیزات کمکی متداول در روش زیرپودری عبارتند از: تجهیزات حرکتی، واحدهای بازیابی پودر، تجهیزات تثبیت‌کننده قطعات و نگهدارنده‌ها.

22. *Head Welding*
23. *Contact Tip*
24. *Heavy-duty*

واحدهای بازیابی پودر

واحدهای بازیابی پودر برای استفاده حداکثر از پودر و به‌حداقل رساندن تمیزکاری دستی به‌کار می‌روند. واحدهای بازیابی پودر قادر به‌انجام یک یا چند کار از موارد زیر می‌باشند:

۱ ـ حذف پودر مصرف‌نشده و سرباره تشکیل‌شده بر روی درز جوش.

۲ ـ جدا کردن سرباره ذوب‌شده و سایر مواد با اندازه بزرگ از پودر ذوب‌نشده.

۳ ـ حذف ذرات مغناطیسی.

۴ ـ حذف ذرات ریز.

۵ ـ برگرداندن پودر به‌قیف برای مصرف مجدد.

۶ ـ گرم کردن پودر در قیف برای خشک نگه داشتن آن.

تغذیه پودر به‌صورت بادی (پنوماتیک)، معمولاً در روش جوشکاری قوس زیرپودری نیمه‌خودکار و گاهی خودکار به‌کار می‌رود.

۳ الکترود

۳ـ۱ معرفی ۷۹
۳ـ۲ تعاریف عمومی ۷۹
۳ـ۳ الکترود روکش‌دار ۸۰
۳ـ۴ روکش الکترود ۸۰
۳ـ۵ طبقه‌بندی و شماره‌گذاری الکترودها طبق AWS ۸۵
۳ـ۶ انتخاب نوع و قطر الکترود ۸۷
۳ـ۷ مشخصه‌های کاربردی الکترودها ۸۸
۳ـ۸ فلز پایه ۹۰
۳ـ۹ جریان جوشکاری ۹۰
۳ـ۱۰ ضخامت و شکل فلزات مورد جوشکاری ۹۰
۳ـ۱۱ وضعیت جوشکاری ۹۱
۳ـ۱۲ معرفی الکترودهای متعارف و کاربرد آنها ۹۱
۳ـ۱۳ نگهداری الکترودهای روکش‌دار ۹۵
۳ـ۱۴ خشک‌کن الکترود ۹۸
۳ـ۱۵ بسته‌بندی الکترودها ۹۹
۳ـ۱۶ ضوابط بازرسی ظاهری الکترودها ۱۰۰

۳ الکترود

۳ ـ ۱ معرفی

جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود روکش‌دار (SMAW) که در این متن اغلب تحت عنوان جوشکاری قوسی و در کارگاه توسط جوشکاران تحت عنوان جوشکاری دستی با الکترود نامیده می‌شود، دارای یکی از وسیع‌ترین کاربردها در ساخت، مونتاژ و تعمیر و تقویت سازه‌های فولادی است. این مقبولیت به‌لحاظ گسترش الکترودهای روکش‌دار است که توانایی ایجاد جوش با خواص مکانیکی معادل و یا حتی بهتر از خواص فلز مورد جوشکاری را دارا می‌باشند.

در این فصل بعد از آشنایی با خواص عمومی الکترودها، مشخصات خصوصی آن دسته از الکترودها که دارای کاربرد وسیع در صنعت ساختمان هستند، مورد توجه قرار می‌گیرد.

هدف این است که قادر باشیم تا آنجا که *اخواص* الکترود اجازه می‌دهد، جوشی ایجاد نماییم که دارای مطلوب‌ترین خواص فیزیکی و شیمیایی، سلامت و ظاهر باشد. بعد از آشنایی با خواص الکترودهای شرح داده شده در این قسمت، برای کسب اطلاعات مربوط به‌الکترودهای خاص، باید به‌کاتالوگ‌های تهیه شده توسط کارخانه سازنده مراجعه نمایید.

۳ ـ ۲ تعاریف عمومی

الکترود جوشکاری قوسی: فلز پُرکننده به‌شکل مفتول با روکش یا بدون روکش که جریان الکتریکی توسط آن بین انبر الکترود و قوس الکتریکی منتقل می‌شود.

الکترود مداوم: الکترود لخت پیوسته که به‌دور قرقره پیچیده شده و در جوشکاری خودکار یا نیمه‌خودکار زیرپودری تحت حفاظت گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الکترود مغزه‌دار: یک نوع الکترود مداوم (پیوسته) که پودر جوشکاری در مغزه آن قرار دارد و در جوشکاری خودکار و نیمه‌خودکار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الکترود روکش‌دار: الکترود فلزی با طول محدود (استیک) و روکش نسبتاً ضخیمی از موادی که دو هدف را برآورده می‌کند: (۱) تثبیت قوس الکتریکی ؛ (۲) بهبود خواص فلز جوش.

الکترودها در پنج گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

۱ ـ الکترود فولاد نرمه
۲ ـ الکترود فولاد پُرکربن
۳ ـ الکترود فولادهای آلیاژی خاص
۴ ـ الکترود چدن
۵ ـ انواع الکترودهای غیرآهنی

۳ ـ ۳ الکترود روکش‌دار

وجود روکش در روی مفتول فولادی الکترود، قوس الکتریکی و فلز جوش را در حین عملیات جوشکاری از مرحله ذوب تا انجماد از هوای اطراف محافظت می‌کند. حاصل این محافظت، فلز جوشی است که دارای خواص قابل مقایسه با فلز پایه می‌باشد.

۳ ـ ۴ روکش الکترود

۳ ـ ۴ ـ ۱ جایگزینی یا بهبود فلز پایه

روکش الکترود در حد وسیعی ترکیب فلز جوش را تنظیم می‌کند، خواه از طریق حفظ ترکیب اصلی مفتول الکترود یا با اضافه کردن عناصر دیگر. در این روش عناصر آلیاژی به‌فلز جوش اضافه شده و یا عناصر قبلی اصلاح می‌شوند.

یکی از شیوه‌های نسبتاً جدید، اضافه کردن پودر آهن به‌روکش الکترود می‌باشد. در حرارت شدید قوس الکتریکی، پودر آهن به‌فولاد تبدیل شده و به‌ترسیب جوش روی فلز مبنا کمک می‌کند.

با افزایش مقداری پودر آهن به‌مواد روکش، بازده جوشکاری افزایش یافته و ظاهر جوش بهبود می‌یابد. به‌الکترودهایی که دارای پودر آهن هستند، الکترودهای پُر بازده می‌گویند. بازده جوش چنین الکترودهایی زیاد بوده و معمولاً از آنها در حالت تخت استفاده می‌شود.

ورود الکترودهای کم‌هیدروژن به‌صنعت جوشکاری، اصلاح و بهبود خواص جوشکاری فولادهای پُرکربن، فولاد آلیاژی، فولاد پُرگوگرد و فولادهای فسفردار را به‌دنبال داشت. بعضی از فولادها تمایل به‌تخلخل و ترک در زیر نوار جوش را دارند که کاهش مقدار هیدروژن در جوشکاری، این خواص مضر را برطرف می‌کند.

۳ ـ ۴ ـ ۲ کنترل خصوصیات قوس الکتریکی

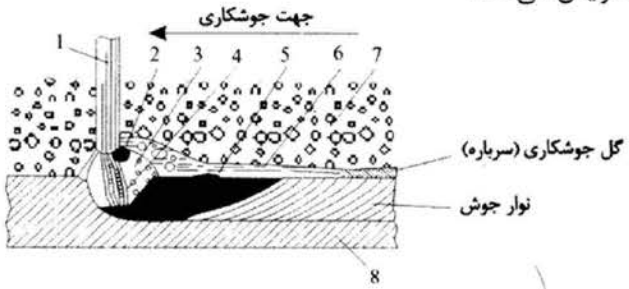
روکش الکترود باعث سهولت تشکیل قوس در آغاز عملیات جوشکاری و حفظ پایداری و تثبیت قوس در حین

پیشرفت عملیات جوشکاری می‌گردد. همچنین این روکش مانند عایق روی مفتول الکترود عمل می‌کند. تمایل به‌امتزاج با فلز پایه در الکترودهای روکش‌دار نسبت به‌الکترودهای بدون روکش کمتر است و این الکترودها اجازه رواداری بیشتری را در طول قوس می‌دهند. کنترل دقیق‌تر و بهتر قوس الکتریکی، اجازه استفاده از شدت جریان بیشتر و الکترودهای ضخیم‌تری را می‌دهد.

۳ ـ ۴ ـ ۳ وظایف روکش الکترود یا پودر در جوش زیرپودری

روکش الکترود دارای عملکردهای زیر است:

- تأمین حفاظ گازی در مقابل ورود اکسیژن و ازت به‌حوضچه مذاب و ایجاد پوششی از سرباره مذاب روی فلز مذاب جوشکاری (شکل ۳ ـ ۱).
- مشابه یک نظافتچی در زدودن اکسیدها و آلودگی‌ها عمل می‌کند.
- نرخ سرد شدن فلز جوش را کاهش می‌دهد و به‌تبع از آن جوش با شکل‌پذیری زیاد ایجاد می‌کند.
- باعث سهولت شروع عملیات جوشکاری، تثبیت قوس و کاهش میزان پاشیدگی جوش می‌گردد.
- باعث نفوذ بهتر و ذوب کامل‌تر فلز مبنا می‌گردد.
- شکل ظاهری نوار جوش را کنترل می‌کند.
- سرعت جوشکاری را افزایش می‌دهد.



۱ ـ الکترود
۲ ـ قطرات ذوب‌شده الکترود
۳ ـ حباب‌های گازی
۴ ـ قوس الکتریکی
۵ ـ حوضچه مذاب (یک‌کوره ذوب بسیار کوچک‌می‌باشد)
۶ ـ گل جوش مذاب
۷ ـ پودر جوشکاری ذوب‌نشده (مواد گدازآور)
۸ ـ قطعه مورد جوش

شکل ۳ ـ ۱ مقطع عرضی از عمل قوس، حفاظ گاز و جریان فلز مذاب در خلال جوشکاری زیرپودری.

۳ ـ ۴ ـ ۴ مواد تشکیل‌دهنده روکش الکترود

نوع روکش الکترود، روی طول قوس و ولتاژ جوشکاری و همچنین موقعیت جوشکاری که این الکترود برای آن شرایط قابل استفاده است، مؤثر می‌باشد. جنس و ترکیب داخلی روکش بسیار مهم بوده و عامل تفاوت میان الکترودهاست.

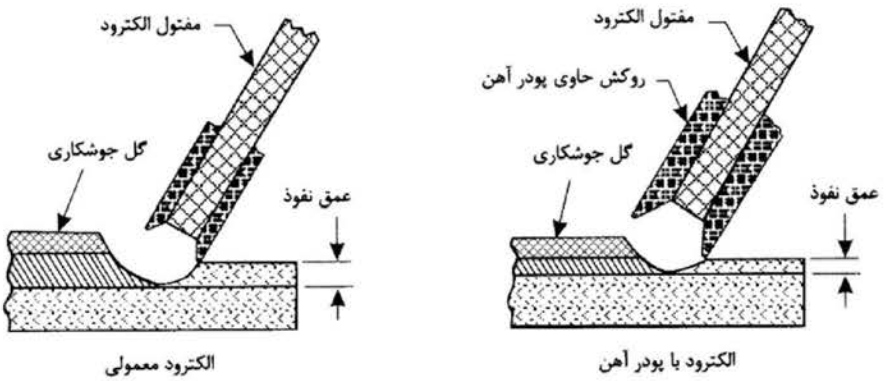
در روکش الکترود سیلیکات سدیم و پتاسیم عموماً به‌عنوان حامل (ملات)[1] به‌کار می‌روند. بعضی از چسب‌های گیاهی نیز دارای کاربردهای محدودی در این زمینه هستند. آلیاژها و فلزات خالص به‌عنوان عناصر احیاکننده و عناصر

1. *Binder*

آلیاژی به‌کار می‌روند. فلزات قلیایی خاکی بهترین تثبیت‌کننده قوس الکتریکی هستند. خاک‌اره، خمیر چوب، سلولز، کتان، نشاسته، شکر و مواد گیاهی دیگر حفاظی در مقابل گازهای اتمسفر و آلودگی هوا ایجاد می‌کنند. عناصر گدازآور و سرباره‌ساز شامل سیلیکا، آلومینا، رس، سنگ معدن آهن، روتیل، سنگ آهک، مگنزیت، پنبه‌نسوز و میکا و بسیاری مواد معدنی دیگر می‌باشند. در ضمن بعضی از مواد مصنوعی مانند تیتانات پتاسیم و دی‌اکسید تیتانیوم نیز عملکردی مشابه مواد معدنی فوق‌الذکر را دارند.

پودر آهن

پودر آهن به‌روکش بسیاری از انواع الکترودها اضافه می‌شود. در حرارت شدید قوس الکتریکی، پودر آن به‌فولاد تبدیل شده و بر فلز جوش می‌افزاید. هنگامی که پودر آهن به‌مقدار نسبتاً زیادی (حدود ۳۰ درصد یا بیشتر) به‌ترکیب روکش الکترود اضافه می‌شود، سرعت جوشکاری به‌طور محسوسی افزایش یافته، قوس تثبیت‌شده و پاشیدگی جوش کاهش می‌یابد و گِل جوش به‌راحتی جدا می‌شود (شکل ۳ ـ ۲). سطح جوش انجام شده با این الکترودها بسیار صاف است (جوش‌های H و I در شکل ۳ ـ ۴).



شکل ۳ ـ ۲ روکش ضخیم‌تر حاوی پودر آهن، اثر بوته‌ای در انتهای الکترود ایجاد می‌کند که موجب افزایش بازده انرژی حاصل از قوس الکتریکی می‌گردد.

روکش‌های کم‌هیدروژن

الکترودهای کم‌هیدروژن نتیجه تحقیقات در خلال جنگ دوم جهانی می‌باشند. موضوع این تحقیقات یافتن الکترودی برای جوشکاری ورق‌های ضخیم زرهی (مورد استفاده در زره‌پوش‌ها یا تانک‌ها) بود.

این نام‌گذاری از آنجا ریشه می‌گیرد که ترکیب اجزای روکش این الکترود فاقد مواد مصرفی و هیدروژن می‌باشد. فقدان هیدروژن خاصیت مهمی است، زیرا هیدروژن باعث ایجاد ترک مجاور نوار جوش در فولادهای کربن‌دار و فولاد آلیاژی می‌گردد. با حذف هیدروژن، از ایجاد ترک‌های زیر و مجاور نوار جوش جلوگیری شده و فولادهای ضخیم و سخت می‌توانند بدون عملیات پیش‌گرمایش و یا با پیش‌گرمایش کم جوش داده شوند. به‌علاوه، این الکترودها در فولادهای پُرگوگرد تولید نوار جوش غیرمتخلخل کرده و از ایجاد انقباض‌های بعد از جوش در فولاد فسفردار جلوگیری می‌کنند. اضافه کردن پودر آهن به‌روکش الکترود، نرخ ترسیب جوش مذاب را افزایش می‌دهد.

در عمل، این الکترودها نباید در هوای مرطوب قرار گیرند زیرا تمایل به‌جذب مقدار قابل ملاحظه‌ای از رطوبت هوا را داشته و جذب این رطوبت روی خواص آنها تأثیرگذار است.

تأمین محدوده وسیعی از خواص موردنظر جوشکاری با اضافه کردن تعدادی عناصر آلیاژی نظیر کلوئید کربن، منگنز، کروم، نیکل، مولیبدنیم و وانادیم به‌ترکیب ساختمانی روکش این نوع الکترود امکان‌پذیر است.

قوس ایجادشده با این نوع الکترود تند و شدید نبوده و دارای نفوذ متوسطی است. گل ایجادشده ضخیم و تُرد بوده و به‌راحتی تمیز می‌شود. در جوشکاری با این نوع الکترود باید از قوس کوتاه استفاده کرد. قوس بلند باعث مکش هیدروژن (افزایش رطوبت) شده که موجب تخلخل و دخول سرباره در نوار جوش می‌شود.

با استفاده از تکنیک‌های صحیح جوشکاری، تأمین جوشی با کیفیت خوب و جوابگوی آزمایش رادیوگرافی امکان‌پذیر است.

۳ ـ ۴ ـ ۵ تأثیر روکش بر قطبیت[۲]

ترکیب روکش در انتخاب قطبیت در جوشکاری با جریان یکسو، نقش اساسی دارد. بعضی از روکش‌ها با قطبیت مستقیم (الکترود منفی) بازده بیشتری داشته و روکش‌های دیگر بازده الکترود را با قطبیت معکوس (الکترود مثبت) افزایش می‌دهند. هر دو نوع روکش‌های فوق مزایایی دارند که آنها را برای کاربرد مشخصی قابل استفاده می‌سازد. امروزه ساخت روکش‌هایی در حال توسعه است که عملکرد آنها در مقابل هر دو نوع قطبیت مستقیم و معکوس یکسان بوده و در جریان متناوب نیز قابل استفاده هستند.

جدول ۳ ـ ۱ تأثیر وجود روکش را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی فلز جوش شرح می‌دهد.
خواص مختلف الکترودها را که در جدول ۳ ـ ۲ ارائه شده با دقت مطالعه کنید. از جدول ۳ ـ ۳ نیز شدت جریان متناسب با هر الکترود استخراج می‌شود.

جدول ۳ ـ ۱ مقایسه خواص فیزیکی و مکانیکی فلز جوش حاصل از الکترود روکش‌دار و بدون روکش

	فلز جوش با الکترود لخت	فلز جوش با الکترود روکش‌دار	فلز پایه
مقاومت نهایی $f_u(kg/cm^2)$	۳۵۰۰ ـ ۴۲۰۰	۴۲۰۰ ـ ۵۲۵۰	۳۸۰۰ ـ ۴۹۰۰
تنش تسلیم $f_y(kg/cm^2)$	۲۶۶۰ ـ ۳۱۵۰	۳۱۵۰ ـ ۴۲۰۰	۲۱۰۰ ـ ۲۲۴۰
افزایش طول در ۵ سانتی‌متر (درصد)	۵ ـ ۱۰	۲۰ ـ ۴۰	۳۰ ـ ۴۰
افزایش طول در خم آزاد (درصد)	۱۰ ـ ۲۰	۳۵ ـ ۶۰	—
کاهش سطح مقطع (درصد)	۸ ـ ۲۰	۳۵ ـ ۶۵	۶۰ ـ ۷۰
چگالی	۷/۵ ـ ۷/۷	۷/۸۰ ـ ۷/۸۵	۷/۸۵
مقاومت خستگی (حد دوام) kg/cm^2	۸۴۰ ـ ۱۲۶۰	۱۸۲۰ ـ ۲۱۰۰	۱۸۲۰ ـ ۲۱۰۰
آزمایش ضربهٔ ایزود (kg/m)	۳/۵ ـ ۱۰/۵	۲۸ ـ ۴۹	۳۵ ـ ۵۶

2. *Polarity*

جدول ۳ـ۲ خصوصیات جوشکاری با الکترودهای فولاد نرمه

ازدیاد طول نسبی در ۵۰ میلی‌متر	نقطهٔ تسلیم kg/cm^2	حداقل مقاومت کششی kg/cm^2	جدا شدن سرباره (گل)	پاشیدگی	ظاهر نوارجوش	سرعت حرکت	نفوذ	نوع جریان	وضعیت جوشکاری	نوع روکش	
٪۲۲	۳۵۰۰	۴۳۴۰	تقریباً آسان	متوسط	موجدار و تخت	متوسط	عمیق	DCRP	تمام‌وضعیت‌ها	پر سلولز ـ سدیمی	E6010
٪۲۲	۳۵۰۰	۴۳۴۰	تقریباً آسان	متوسط	موجدار و تخت	متوسط	عمیق	DCRP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	پرسلولز ـ پتاسیمی	E6011
٪۱۷	۳۸۵۰	۴۶۹۰	آسان	کم	صاف و محدب	خوب	متوسط	DCSP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	روتیلی* ـ سدیمی	E6012
٪۱۷	۳۸۵۰	۴۶۹۰	آسان	کم	صاف و تخت تا محدب	خوب	کم	DCRP, DCSP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	روتیلی ـ پتاسیمی	E6013
٪۱۷	۴۲۰۰	۴۹۰۰	آسان	کم	صاف و تخت تا محدب	زیاد	متوسط	DCRP, DCSP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	روتیلی ـ پودر آهن	E7014
٪۲۲	۴۲۰۰	۴۹۰۰	تقریباً آسان	کم	صاف و محدب	خوب	کم تا متوسط	DCRP	تمام‌وضعیت‌ها	کم‌هیدروژن سدیمی	E7015
٪۲۲	۴۲۰۰	۴۹۰۰	خیلی آسان	کم	صاف و محدب	خوب	کم تا متوسط	DCRP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	کم‌هیدروژن پتاسیمی	E7016
٪۲۵	۳۵۰۰	۴۳۴۰	خیلی آسان	کم	صاف و تخت تا مقعر	زیاد	عمیق	تخت:d.c., a.c. افقی DCSP, a.c.	تخت ـ افقی	اکسید آهن	E6020
٪۱۷	۴۲۰۰	۵۰۴۰	آسان	کم	صاف و کمی محدب	خیلی‌زیاد	کم	DCSP, DCRP, a.c.	تخت ـ افقی	روتیل ـ پودر آهن	E7024
٪۲۵	۳۵۰۰	۴۳۴۰	آسان	کم	تخت تا مقعر	خیلی‌زیاد	متوسط	تخت:d.c., a.c. افقی DCSP, a.c.	تخت ـ افقی	پودر آهن ـ اکسید آهن	E6027
٪۲۲	۴۲۰۰	۵۰۴۰	خیلی آسان	کم	صاف و تخت تا محدب	زیاد	کم	DCRP, a.c.	تمام‌وضعیت‌ها	پودر آهن ـ کم‌هیدروژن	E7018
٪۲۲	۴۲۰۰	۵۰۴۰	خیلی آسان	کم	صاف و کمی محدب	خیلی‌زیاد	کم	DCRP, a.c.	تخت ـ افقی	پودر آهن ـ کم‌هیدروژن	E7028

a.c.= جریان متناوب ؛ d.c.= جریان مستقیم ؛ DCRP= جریان یکسو با قطبیت معکوس (الکترود مثبت) ؛ DCSP= جریان یکسو با قطبیت مستقیم (الکترود منفی) .

* روتیل اکسید تیتان می‌باشد.

جدول ۳ ـ ۳ دامنه شدت جریان الکتریکی برای جوشکاری با الکترودهای فولاد نرمه و فولاد کم‌آلیاژ

قطر الکترود اینچ (میلی‌متر)	دامنهٔ شدت جریان (آمپر)								
	نوع الکترود								
	E6010, E6011	E6012	E6013	E6020	E6027	E6014	E7015, E7016	E7018,	E7024, E7028
$\frac{1}{16}$ (۱/۶)	—	۲۰ ـ ۴۰	۲۰ ـ ۴۰	—	—	—	—	—	—
$\frac{5}{64}$ (۲)	—	۲۵ ـ ۶۰	۲۵ ـ ۶۰	—	—	—	—	—	—
$\frac{3}{32}$ (۲/۴)	۴۰ ـ ۸۰	۳۵ ـ ۸۵	۴۵ ـ ۹۰	—	—	۸۰ ـ ۱۲۵	۸۰ ـ ۱۲۵	۷۰ ـ ۱۰۰	۱۰۰ ـ ۱۴۵
$\frac{1}{8}$ (۳/۲)	۷۵ ـ ۱۲۵	۸۰ ـ ۱۴۰	۸۰ ـ ۱۳۰	۱۰۰ ـ ۱۵۰	۱۲۵ ـ ۱۸۵	۱۱۰ ـ ۱۶۰	۱۰۰ ـ ۱۵۰	۱۱۵ ـ ۱۶۵	۱۴۰ ـ ۱۹۰
$\frac{5}{32}$ (۴)	۱۱۰ ـ ۱۷۰	۱۱۰ ـ ۱۹۰	۱۰۵ ـ ۱۸۰	۱۳۰ ـ ۱۹۰	۱۶۰ ـ ۲۴۰	۱۵۰ ـ ۲۱۰	۱۴۰ ـ ۲۰۰	۱۵۰ ـ ۲۲۰	۱۸۰ ـ ۲۵۰
$\frac{3}{16}$ (۴/۸)	۱۴۰ ـ ۲۱۵	۱۴۰ ـ ۲۴۰	۱۵۰ ـ ۲۳۰	۱۷۵ ـ ۲۵۰	۲۱۰ ـ ۳۰۰	۲۰۰ ـ ۲۷۵	۱۸۰ ـ ۲۵۵	۲۰۰ ـ ۲۷۵	۲۳۰ ـ ۳۰۵
$\frac{7}{32}$ (۵/۶)	۱۷۰ـ۲۵۰	۲۰۰ـ۳۲۰	۲۱۰ ـ ۳۰۰	۲۲۵ـ۳۱۰	۲۵۰ ـ۳۵۰	۲۶۰ ـ ۴۰	۲۴۰ ـ۳۲۰	۲۶۰ ـ۳۴۰	۲۷۵ ـ۳۶۵
$\frac{1}{4}$ (۶/۴)	۲۱۰ـ۳۲۰	۲۵۰ـ۴۰۰	۲۵۰ ـ ۳۵۰	۲۷۵ـ۳۷۵	۳۰۰ ـ۴۲۰	۳۳۰ـ۴۱۵	۳۹۰ ـ۳۰۰	۳۱۵ـ۴۰۰	۳۳۵ ـ۴۳۰
$\frac{5}{16}$ (۸)	۷۵ ـ ۴۲۵	۳۰۰ـ۵۰۰	۳۲۰ ـ ۴۳۰	۳۴۰ـ۴۵۰	۳۷۵ ـ۴۷۵	۳۹۰ـ۵۰۰	۳۷۵ ـ۴۷۵	۳۷۵ـ۴۷۰	۴۰۰ ـ۵۲۵

شکل ۳ ـ ۳ محل شماره طبقه‌بندی الکترود برای الکترود روکش‌دار با محل گیره انتهایی (ته‌گیر).

۳ ـ ۵ طبقه‌بندی و شماره‌گذاری الکترودها طبق AWS

الکترودها برحسب خواص مکانیکی مفتول فولادی، نوع پوشش، و وضعیت جوشکاری طبقه‌بندی و برای شناسایی شماره‌گذاری می‌شوند.

سیستم شماره‌گذاری براساس AWS ، یک عدد چهار یا پنج رقمی می‌باشد که به‌دنبال حرف E قرار می‌گیرند. حرف E مخفف کلمه الکترود است. اولین دو رقم سمت چپ (یا سه رقم اول در سیستم پنج رقمی) حداقل مقاومت کششی مفتول الکترود را برحسب کیلوپوند (هزار پوند) بر اینچ مربع نشان می‌دهد (اگر این عدد در ۷۰ ضرب شود،

مقاومت برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌دست می‌آید). برای مثال مقاومت کششی الکترود E6010 ، مساوی (۴۲۰۰kg/cm^2) ۶۰۰۰۰ Psi، و الکترود E7010 مساوی (۴۹۰۰kg/cm^2) ۷۰۰۰۰Psi و الکترود E10010 مساوی (۷۰۰۰kg/cm^2) ۱۰۰۰۰۰Psi است. رقم سوم موقعیت جوشکاری را توصیف می‌کند. برای مثال عدد یک در E6010 نشان می‌دهد جوشکاری با این نوع الکترود در همه موقعیت‌ها اعم از تخت، افقی، سربالا و سقفی می‌تواند انجام شود. عدد ۲ از E7020 نشان می‌دهد که این الکترود تنها در جوشکاری درزهای تخت و افقی به‌کار می‌رود. عدد ۳ نشان می‌دهد که الکترود باید تنها در موقعیت جوشکاری تخت به‌کار رود. آخرین رقم نوع جریان و نوع روکش الکترود را تعیین می‌کند. توضیح بیشتر در مورد این سیستم طبقه‌بندی شماره‌ای در جدول‌های ۳ ـ ۴ و ۳ ـ ۵ آمده است.

شکل ۳ ـ ۳ محل مهر زدن یا چک کردن شماره طبقه‌بندی الکترود بر روی پوشش آن را نشان می‌دهد.

جدول ۳ ـ ۴ سیستم طبقه‌بندی الکترودها به‌روش AWS

رقم	مفهوم	مثال
۲ یا ۳ رقم اول	حداقل مقاومت کششی	$E-60XX = 4200\ kg/cm^2$ $E-110XX = 7700\ kg/cm^2$
رقم بعدی	وضعیت جوشکاری	تمام وضعیت‌ها $E-XX1X =$ تخت و افقی $E-XX2X =$ تخت $E-XX3X =$
رقم آخر	نوع جریان، نوع سرباره، نوع قوس، عمق نفوذ، وجود پودر آهن و هیدروژن در روکش	به‌جدول ۳ ـ ۵ مراجعه شود

جدول ۳ ـ ۵ مفهوم رقم آخر در نام‌گذاری الکترود به‌روش AWS

نوع پوشش	نوع قوس	جریان	رقم آخر
آلی	قوس نفوذی	فقط DCRP	0
آلی	قوس نفوذی	A.C. یا DCRP	1
روتیلی (اکسید تیتان)	قوس متوسط	A.C. یا DCRP	2
روتیل	قوس نرم	A.C. یا D.C قطب آزاد	3
روتیل با پودر آهن (حدود ۳۰٪)	قوس نرم	A.C. یا D.C قطب آزاد	4
کم هیدروژن	—	فقط DCRP	5
کم هیدروژن	قوس متوسط	A.C. یا DCRP	6
پودر آهن	—	A.C. یا D.C	7
کم‌هیدروژن ـ قوس‌آهن	—	A.C. یا DCRP	8

علامت شناسایی الکترود

● DCSP= جریان یکسو ـ قطبیت مستقیم ● DCRP= جریان یکسو ـ قطبیت معکوس ● A.C.= جریان متناوب

۳ ـ ۶ انتخاب نوع و قطر الکترود

خواص فلز جوش ترسیب‌شده در درز و مناسب بودن آن به‌عنوان مصالح اتصال‌دهنده قطعاتی که به‌هم جوش می‌شوند، به‌انتخاب صحیح الکترود بستگی دارد. باید توجه داشت که بسیاری از الکترودهایی که در رده‌های مختلف قرار دارند، از نظر مفتول فولادی یکسان هستند. تفاوت در مشخصه‌های کاربردی و خصوصیات شیمیایی و مکانیکی فلز جوش رسوبی، غالباً توسط مواد تشکیل‌دهنده روکش الکترود تعیین می‌شود.

با توجه به‌مطالب ارائه‌شده، اهمیت شناخت کامل مشخصه‌های الکترودهای پایه، روشن است. شناخت کامل از رده‌های الکترودها، نه تنها در انتخاب صحیح الکترود برای یک کار خاص به‌شما کمک می‌کند، بلکه در به‌دست آوردن مهارت فنی لازم جهت عملیات جوشکاری نیز مؤثر است.

انتخاب اندازه صحیح الکترود برای استفاده در یک کار مشخص، دارای اهمیتی به‌اندازه انتخاب رده مناسب الکترود است. نکات زیر در هنگام انتخاب الکترود باید مورد توجه قرار گیرد:

- **هندسه درز:** جوش گوشه می‌تواند با الکترود بزرگتری نسبت به‌آنچه که در جوش لب به‌لب مورد نیاز است، انجام شود.
- **ضخامت فلز پایه :** واضح است که با افزایش ضخامت فلز مورد جوش، الکترود با قطر بزرگتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
- **ضخامت لایه جوش:** ضخامت قطعات مورد جوشکاری و همچنین موقعیت انجام جوشکاری دو عامل دخیل در این مورد هستند. در جوشکاری تخت و افقی، ضخامت فلز جوش رسوب کرده، نسبت به‌جوشکاری سربالا یا سقفی بیشتر است.
- **موقعیت جوشکاری:** در جوشکاری تخت و افقی می‌توان از الکترود با قطر بزرگتری نسبت به‌موقعیت سربالا یا سقفی استفاده کرد.
- **نوع و شدت جریان:** با افزایش شدت جریان جوشکاری، الکترود بزرگتری مورد نیاز است.
- **مهارت جوشکار:** بعضی از جوشکاران دارای مهارت فنی زیادی بوده، بنابراین می‌توانند از الکترودهای بزرگتری در جوشکاری سربالا یا سقفی استفاده کنند.
- **شرایط بهره‌برداری:** مقاومت کششی، شکل‌پذیری، مقاومت خستگی و مقاومت در مقابل خوردگی خصوصیات مهم جوش هستند که توجه به‌آن‌ها به‌انتخاب صحیح الکترود کمک می‌کند.

۳ ـ ۷ مشخصه‌های کاربردی الکترودها

جنس مواد مصرفی در روکش یک الکترود نه تنها مشخصات مکانیکی و شیمیایی فلز جوش را تعیین می‌کند، بلکه ویژگی‌های کاربردی الکترود را نیز مشخص می‌کند. استفاده از الکترودهای مختلف مستلزم استفاده از تکنیک‌های مختلف جوشکاری است. بنابراین الکترودها با توجه به‌ویژگی‌های کاربردی و نوع درز اتصال به‌سه گروه تقسیم می‌شوند: الکترودهای پُرجوش[3] (پُربازده)، الکترودهای زودجوش[4] (نفوذی)، و الکترودهای پُر و زودجوش[5] (زودرو).

۳ ـ ۷ ـ ۱ الکترودهای پُر بازده (پُرجوش)

الکترود پُربازده، درز را زود پُر می‌کند. این خاصیت نقطه مقابل الکترودهای نفوذی است. الکترودهای پُر بازده، دارای روکش ضخیم محتوی پودر آهن می‌باشند که کاربرد وسیعی در جوشکاری گوشه و جوش شیاری عمیق دارد. در این نوع الکترود، میزان رسوب زیاد بوده و پاک کردن سرباره آن به‌راحتی انجام می‌شود. بریدگی لبه درز جوش نیز کم می‌باشد. این نوع الکترود با قوس سبک و ملایم می‌سوزد و عمق نفوذ آن زیاد نیست و در نتیجه امتزاج فلز جوش و فلز پایه کم است. ظاهر جوش بسیار صاف و سطح جوش تخت تا کمی محدب می‌باشد و در اطراف آن مقداری ترشح جوش وجود دارد (جوش‌های H و I در شکل ۳ ـ ۴).

در رده الکترودهای پُر بازده، الکترودهای EXX14، EXX24، EXX27 و EXX28 در جوش‌های شیاری در وضعیت تخت و افقی به‌کار می‌روند (شکل ۳ ـ ۴ ـ F).

در این حالت اگر در دستورالعمل جوشکاری، جریان یکسو ذکر شده باشد، استفاده از جریان متناوب امکان‌پذیر است، که باعث کاهش پدیده انحراف قوس می‌شود.

۳ ـ ۷ ـ ۲ الکترودهای نفوذی (زودجوش)

الکترودهای نفوذی دارای قابلیت انجماد سریع فلز جوش می‌باشند. این خاصیت در مواردی که پاشیدگی گل‌جوش و یا فلز جوشکاری به‌خارج از درز جوش وجود دارد و یا در جوشکاری‌های سربالا و سقفی، بسیار مهم است.

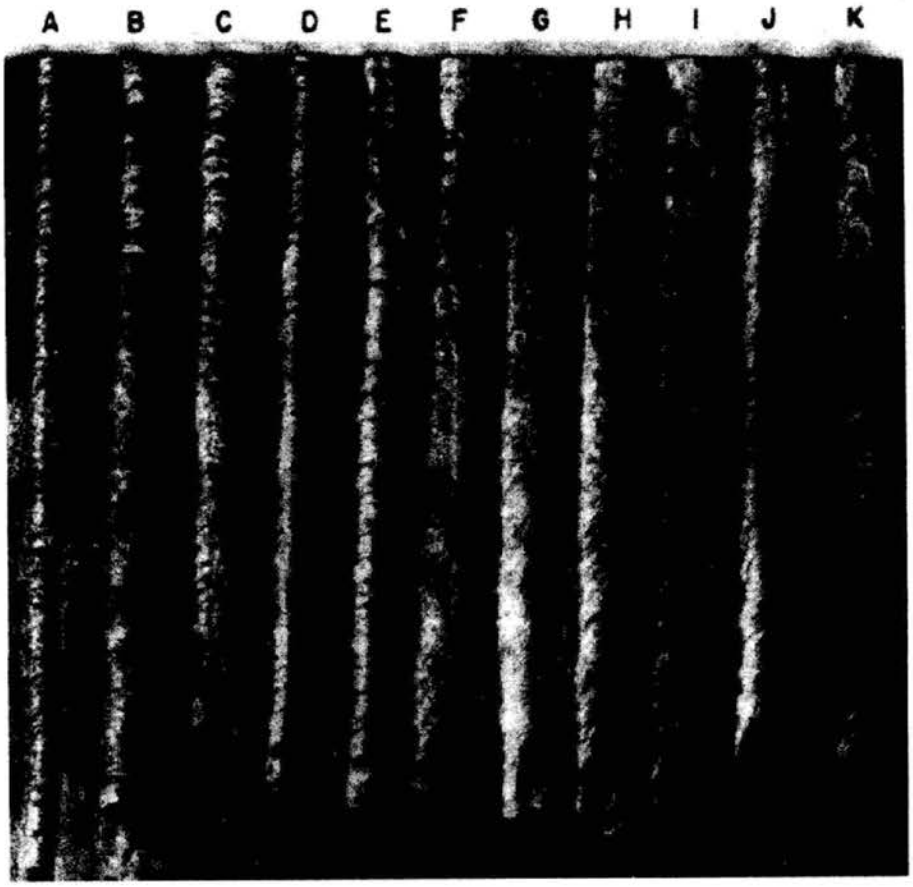
این الکترودها دارای قوسی قوی و نفوذی بوده و عموماً با جریان یکسو با قطبیت معکوس به‌کار می‌روند، هرچند ممکن است با جریان متناوب نیز به‌کار روند. الکترودهای نفوذی دارای سرباره کمی بوده و خط جوش تخت تولید می‌کنند (شکل ۳ ـ ۴ جوش‌های B و C). با گذشت از موارد استثنا، خط جوش حاصل، جوابگوی آزمون پرتونگاری بوده و مورد استفاده آنها در جوشکاری لوله‌ها و مخازن تحت فشار است. این الکترودها به‌طور وسیعی برای همه موقعیت‌های جوشکاری و در هر نوع عملیات ساخت کارخانه‌ای و کارهای تعمیری مورد استفاده می‌باشند. الکترودهای E6010 با جریان مستقیم و E6011 با جریان متناوب، مثال‌هایی از این نوع الکترود می‌باشند.

---

3. Fast fill

4. Fast freeze

5. Fill Freeze



شکل ۳ ـ ۴ مقایسه ظاهر نوارجوش‌های انجام شده با انواع مختلف الکترودها.

۳ ـ ۷ ـ ۳ الکترودهای ترکیبی

در بعضی درزها، نیاز به‌هر دو خصوصیت پُر بازدهی و نفوذی بودن است. هنگامی که الکترود نفوذی مورد نیاز است، بهترین انتخاب رده EXX10 و EXX11 می‌باشد. الکترودی که دارای هر دو خاصیت پُر بازدهی و نفوذی بودن است، الکترود EXX14 با روکش حاوی پودر آهن می‌باشد که در همه وضعیت‌ها قابل استفاده است (تمام وضعیت). این الکترود دارای خاصیت زود پُرکنندگی به‌میزان نوع EXX24 نبوده و سرعت انجماد آن نیز به‌اندازه EXX10 نمی‌باشد، ولیکن خواص آن در حد واسطه این رده می‌باشد.

۳ ـ ۷ ـ ۴ الکترودهای کم‌هیدروژن[6]

الکترودهای کم‌هیدروژن دارای پوششی هستند که عملاً فاقد هیدروژن می‌باشد. این الکترودها، جوشی عاری از ترک،

6. *Low hydrogen electrode*

زیرترک[7] و ریزترک[8] تولید می‌کنند و جوش حاصل دارای شکل‌پذیری استثنایی است (جوش F و K در شکل ۳ ـ ۴).

زیرترک غالباً دارای علایم خاصی نیست و در منطقه تفتیده[9] (HAZ) در فلز پایه به‌وجود می‌آید و عامل آن نفوذ هیدروژن از فلز جوش یا سرد شدن سریع است.

این الکترودها تخلخل حاصل از جوشکاری فولادهای گوگرددار را برطرف کرده و جوش حاصل جوابگوی آزمایش پرتونگاری می‌باشد. به‌علت کاهش نیاز به‌عملیات پیش‌گرمایش با این نوع الکترود، کاربرد ویژه آنها در جوشکاری فولادهای سخت‌جوش و فولادهای آلیاژدار پُرمقاومت می‌باشد. مثال‌هایی از این نوع الکترود EXX18 و EXX28 می‌باشد. این نوع الکترودها ممکن است با جریان مستقیم با قطبیت معکوس (DCRP) یا جریان متناوب به‌کار روند.

۳ ـ ۸ فلز پایه

جنس مصالح پایه که به‌یکدیگر جوش می‌شوند، در درجه اول اهمیت قرار دارد. اگر فلز جوش، کیفیت و خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه با فلز پایه مورد جوش را نداشته باشد، جوش رضایت‌بخش ایجاد نمی‌گردد. الکترود مصرفی باید با فلز پایه سازگار[10] باشد، یعنی علاوه بر خواص شیمیایی هم ارز با فلز پایه، باید مقاومت نهایی فلز الکترود بیش از مقاومت نهایی فلز پایه باشد.

۳ ـ ۹ جریان جوشکاری

دستگاه‌های جوشکاری دو نوع جریان تولید می‌کنند. جریان یکسو و جریان متناوب. جریان یکسو دارای دو نوع قطبیت می‌باشد؛ قطبیت مستقیم و قطبیت معکوس. نوع جریان جوشکاری قابل دسترسی بر روی انتخاب نوع الکترود مصرفی تأثیرگذار است. بعضی از الکترودها با جریان یکسو و بعضی با جریان متناوب دارای عملکرد بهتری می‌باشند.

۳ ـ ۱۰ ضخامت و شکل فلزات مورد جوشکاری

ضخامت فلز مورد جوشکاری خواه ضخیم و یا نازک، تعیین‌کننده اندازه الکترود مصرفی است. طبق یک قانون عمومی، هرگز از الکترودی که قطر آن بزرگتر از ضخامت فلز مورد جوشکاری است، استفاده نمی‌شود.

---

7. *Under bead crack*
8. *Micro crack*
9. *Heat affected zone*
10. *Match*

۳ ـ ۱۱ وضعیت جوشکاری

وضعیت جوشکاری عامل بسیار مهم در انتخاب الکترود مصرفی است. بعضی از الکترودها تنها در وضعیت جوشکاری تخت قابل استفاده بود و بعضی دیگر در همه وضعیت‌ها به‌خوبی قابل استفاده می‌باشند. وضعیت جوشکاری روی هزینه‌ها تأثیرگذار است. جوشکاری تخت اقتصادی‌ترین نوع جوشکاری بوده و پس از آن به‌ترتیب جوشکاری افقی، قائم و سقفی قرار دارند که جوشکاری سقفی گرانترین نوع است.

اندازه الکترود مصرفی شدیداً متأثر از وضعیت جوشکاری است. در سری‌کاری‌ها، بزرگترین الکترودی که قابل کار کردن و کنترل دستی است باید به‌کار رود. این کار اجازه استفاده از شدت جریان بیشتری را داده و به‌تبع از آن باعث افزایش سرعت جوشکاری خواهد شد.

اگر جوشکاری باید در موقعیت سقفی و یا قائم انجام گیرد، الکترودهای 28 ، 27 ، 24 ، EXX20 قابل استفاده نیستند و انتخاب الکترود مصرفی باید از میان الکترودهای باقیمانده صورت گیرد. حرکت و کنترل EXX16 و EXX18 که در طبقه الکترودهای قابل استفاده برای همه موقعیت‌ها قرار دارند، در جوشکاری‌های قائم و سقفی قدری مشکل است.

به‌طور کلی جوشکاران دریافته‌اند که الکترودهای قرار گرفته در طبقه 28 ، 27 ، 24 ، 20 ، 13 ، EXX12 دارای کنترل آسان در موقعیت‌های افقی و تخت می‌باشند و جوشکاری قائم و سقفی با الکترودهای EXX10 , EXX11 EXX16 آسان‌تر است. خصوصاً سهولت استفاده از الکترودهای EXX12 و EXX13 در جوشکاری قائم رو به‌پایین بیشتر است.

۳ ـ ۱۲ معرفی الکترودهای متعارف و کاربرد آنها

E6010: الکترود همه وضعیت با جریان یکسو و قطبیت مثبت (از نوع الکترودهای نفوذی)

این الکترودها یکی از بهترین انواع الکترود روکش دار جهت جوشکاری‌های قائم و سقفی هستند. به‌همین دلیل دارای بیشترین کاربرد در جوشکاری سازه‌های فلزی با موقعیت غیرتخت و جوشکاری قائم و سقفی با پاس‌های متعدد می‌باشند. با اینکه اکثر کاربرد این نوع الکترود در جوشکاری فولاد نرمه است، لیکن می‌توانند در جوشکاری ورق‌های گالوانیزه یا بعضی از فولادهای کم‌آلیاژ به‌کار روند. در جوشکاری فولاد گالوانیزه، قوس قوی موجب خراشیدن رویه گالوانیزه شده و گِل سبک آن، کاهش حباب‌زایی[11] و کاهش تخلخل جوش را به‌دنبال خواهد داشت. کاربردهای مختلف این نوع الکترود در جوشکاری بدنه کشتی، جوشکاری ساختمان‌ها و پل‌ها، مخازن ذخیره، لوله‌ها و مخازن معمولی و تحت فشار بخصوص در پاس (عبور) ریشه می‌باشد. به‌خاطر خشک بودن حوضچه، اجرای جوش با این الکترود نیاز به‌مهارت بیشتری دارد. (جوش B شکل ۳ ـ ۴).

- قوس قوی و نفوذی؛
- انجماد مناسب و یک‌دست فلز جوش؛

11. Bubbling

- گِل کم‌ضخامت با چگالی و درجه ذوب پایین؛
- ایجاد پوشش گازی جهت حفاظت فلز مذاب حوضچهٔ جوشکاری در حین عملیات جوشکاری.

الکترود E6010 به‌خاطر وجود سلولز در ترکیب روکش خود، در رده الکترودهای سلولزی قرار می‌گیرد.

E6011: الکترود همه وضعیت با جریان متناوب و یکسو با قطبیت مثبت (از نوع نفوذی)

ویژگی‌های عملی، خواص مکانیکی و موارد کاربرد الکترود E6011 مشابه E6010 می‌باشد، با این اختلاف که الکترود E6011 با جریان متناوب هم استفاده می‌شود، هرچند ممکن است با جریان یکسو و قطبیت معکوس نیز به‌کار رود ولی در این صورت بسیاری از ویژگی‌های مفید خود را از دست می‌دهد.

E6012: الکترود همه وضعیت با جریان متناوب و یکسو با قطبیت منفی (از نوع نفوذی و پُر بازده)

الکترود E6012 می‌تواند با جریان یکسو و قطبیت مستقیم و یا جریان متناوب به‌کار رود. این نوع اغلب برای درزهایی که به‌طور مناسب جفت نشده‌اند به‌کار می‌رود و این به‌خاطر قابلیت پل‌زنی این نوع الکترود در درزهای عریض است. این نوع الکترود سازگاری مناسبی برای جوشکاری صفحات تک با جوش گوشه افقی دارد. E6012 به‌خاطر اقتصادی بودن، سهولت کاربرد و سرعت بالای جوشکاری کاربرد وسیعی در کارهای فلزی کارخانه‌ای دارد. شکل‌پذیری فلز جوش ترسیب شده حاصل از الکترود E6012 نسبت به E6010 و E6011 کمتر بوده و مقاومت تسلیم آن بیشتر است.

این الکترود مناسب برای کاربرد با جریان یکسو و قطبیت مستقیم (الکترود منفی) و یا قطبیت معکوس (الکترود مثبت) و همچنین جریان متناوب می‌باشد. در این مورد استفاده از قطبیت مستقیم به‌خاطر تشکیل قوس مستقیم پایدار ارجح است. در صورت استفاده از الکترودهای با قطر بزرگتر، جریان متناوب به‌خاطر عاری بودن از پدیده انحراف قوس ارجح است.

الکترود E6012 نفوذ کافی تا انتهای ریشه جوش گوشه و سایر درزها را ایجاد می‌کند ولی عمق نفوذ آن به‌میزان الکترود E6010 نیست. الکترودهای با قطر کوچک (۲ میلی‌متر و کمتر) دارای خصوصیات مناسب جوشکاری ورق‌های نازک می‌باشند چرا که موجب سوختگی ورق نمی‌گردند.

گل حاصل از این جوش خیلی زیاد است و قسمت بیشتری از فلز مذاب را نسبت به‌الکترود E6010 می‌پوشاند. ولیکن سرباره تولیدشده به‌روانی سرباره حاصل از الکترودهای E6020 و E6030 نمی‌باشد. گل حاصل از الکترود E6012 بسیار سریع و در دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد فلز می‌بندد. گِل جوشکاری سخت بوده و اغلب به‌نوار جوش می‌چسبد.

فلز مذاب حاصل از این نوع الکترود دارای روانی بیشتری نسبت به‌الکترود E6010 می‌باشد ولی نه در حدی که قابلیت استفاده از آن را در همه وضعیت‌ها از بین ببرد. ترکیب فلز مذاب و گل مذاب شکل جوش ترسیب‌شده را کنترل می‌کند (جوش D ، شکل ۳ ـ ۴). بنابراین E6012 خصوصاً مناسب جوشکاری گوشه در حالت افقی می‌باشد به‌گونه‌ای که یک جوش تخت با تحدب کم و بدون بریدگی کناره جوش ایجاد می‌کند. الکترودهای E6012 مناسب جوشکاری قائم رو به‌پایین هستند، هرچند در بعضی موارد میزان و ضخامت گلوگاه مورد نظر تأمین نمی‌شود.

E6013: الکترود همه وضعیت با جریان یکسو و متناوب و با قطبیت مستقیم (از نوع نفوذی و پُر بازده)

این نوع به‌طور تقریبی مشابه الکترود E6012 می‌باشد ولی در چند مورد مهم با هم اختلاف دارند. تمیز کردن گِل (گل‌زنی) راحت‌تر و تثبیت قوس با سهولت بیشتری انجام می‌شود. این مورد خصوصاً در مورد الکترودهای با قطر کم (۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر) صحت دارد. در نتیجه امکان انجام جوشکاری با ولتاژ کمتری فراهم می‌شود. عموماً این الکترودها برای جوشکاری صفحات نازک و جوشکاری‌های قائم رو به‌پایین طراحی شده‌اند. اندازه‌های بزرگتر این نوع الکترود برای کلیه کاربردهایی که در توصیف E6012 ذکر شد، مورد استفاده است. رده‌های E6012 و E6013 از لحاظ عملکرد و ظاهر فلز جوش در یک طبقه هستند (جوش E در شکل ۳ ـ ۴). در جوشکاری با الکترود E6013، عمل قوس آرام‌تر و سطح جوش صاف با موج‌های (فلس) ریز و ملایم است. این الکترودها برای جوشکاری گوشه و جوش لب با ظاهر تخت تا کمی محدب مناسب هستند. این الکترودها در رده الکترودهای روتیلی قرار دارد.

E7015: الکترود همه وضعیت، جریان یکسو با قطبیت مثبت (از نوع کم‌هیدروژن)

مقدار کلسیم موجود در ترکیب روکش این الکترود زیاد و مقدار هیدروژن، کربن، منگنز، گوگرد و فسفر آن پایین است. این نوع روکش دارای مقداری سیلیکون نیز می‌باشد. این الکترود به‌نام الکترود کم‌هیدروژن سدیم‌دار معروف است، زیرا قشری از سیلیکات سدیم بر روی روکش این الکترود به‌کار می‌رود.

میزان نفوذ آن متوسط و گل آن ضخیم و تُرد بوده و به‌راحتی پاک می‌شود. نوار جوش تخت بوده و در بعضی موارد ممکن است محدب باشد. جوشکاری با قوس کوتاه جهت افزایش کیفیت فلز جوش در الکترودهای کم‌هیدروژن ضروری است. با استفاده از الکترودهای تا قطر ۴ میلی‌متر جوشکاری در همه وضعیت‌ها امکان‌پذیر است. الکترودهای بزرگتر می‌توانند در موقعیت‌های افقی و تخت مورد استفاده قرار گیرند. این الکترود برای جوشکاری فولاد آلیاژی، فولاد پرکربن، فولاد گوگرددار، آهن چکش‌خوار، فولادهای لعاب‌دار، فولاد فنری و جوشکاری صفحات روکش‌شده با فولاد نرمه توصیه شده است. در بسیاری از موارد استفاده از این نوع الکترود نیاز به‌عملیات پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش را منتفی می‌سازد.

E7016: الکترود همه وضعیت، جریان متناوب یا یکسو با قطبیت مثبت (از نوع کم‌هیدروژن)

الکترود E7016 حاوی کلیه ویژگی‌های الکترود E7015 می‌باشد. مزیت اضافی، امکان کاربرد آن با جریان جوشکاری یکسو یا متناوب می‌باشد. سیم داخلی و ترکیب روکش آن نیز مشابه الکترود E7015 می‌باشد. جز اینکه این نوع دارای مقداری سیلیکات پتاسیم و یا نمک‌های دیگر پتاسیم می‌باشد، اضافه کردن نمک‌های پتاسیم، این الکترود را برای جریان متناوب قابل استفاده می‌سازد. یک نوع از جوش انجام‌شده با این الکترود در شکل ۳ ـ ۴، جوش J، نشان داده شده است.

E7018: الکترود همه وضعیت با جریان متناوب و یکسو با قطبیت مثبت (از نوع کم‌هیدروژن)

روکش این الکترود حاوی درصد زیادی پودر آهن (بین ۲۵ تا ۴۰ درصد) در ترکیب با مقدار کمی هیدروژن می‌باشد. روکش الکترود E7018 دقیقاً مشابه ترکیب الکترود E7015 و E7016 ولی ضخیم‌تر از آنها می‌باشد. گل حاصل ضخیم

و تُرد بوده و پاک کردن آن راحت است. نوار جوش تخت بوده و ظاهر آن نسبت به‌جوش حاصل از E7015 بهتر است (جوش K در شکل ۳ ـ ۴). نوار جوش ممکن است در جوش‌های گوشه و یا شیاری کمی تحدب داشته باشد. جوش حاصل جوابگوی آزمایش پرتونگاری خواهد بود. این نوع الکترود در جوشکاری لوله‌ها، مخازن و کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با استفاده از الکترودهای تا قطر ۴ میلی‌متر امکان جوشکاری در همه وضعیت‌ها وجود دارد. قطرهای بزرگتر برای جوش گوشه و شیاری در موقعیت افقی و یا تخت به‌کار می‌روند. در تمام مدت جوشکاری، باید قوس کوتاه اعمال شود. در جوشکاری قائم رو به‌بالا باید دقت خاصی مبذول داشت تا پوشش الکترود در تماس دائم با حوضچه مذاب جوشکاری باشد. در ضمن قوس بلند باعث ایجاد تخلخل در نوار جوش خواهد شد. نرخ رسوب جوش در E7018 در بعضی موارد بالاتر از الکترودهای E7015 می‌باشد.

اصلاح و بهبود خواص فلز ترسیب با اضافه کردن آلیاژهای معینی به‌ترکیب روکش الکترود و یا تعویض و تغییر در جنس سیم مغزه الکترود امکان‌پذیر است. اضافه کردن عناصر آلیاژی به‌روکش الکترود راه اقتصادی‌تری بوده و کنترل آن راحت‌تر است. این الکترودها در طبقه E8018 تا E12018 قرار می‌گیرند (مقاومت کششی آنها بین kg/cm^2 ۵۶۰۰ تا ۸۴۰۰ می‌باشد).

E7028: قابل استفاده در وضعیت افقی و تخت، با جریان متناوب و یکسو با قطبیت مثبت (از نوع کم‌هیدروژن و حاوی پودر آهن)

این الکترود مشابه الکترودهای E7018 با کمی اختلاف است. الکترود E7028 تنها مناسب جوشکاری در موقعیت افقی و تخت می‌باشد در حالی که E7018 قابل استفاده در همه وضعیت‌هاست. روکش این نوع الکترود حاوی درصد زیادتری از پودر آهن (معادل ۵۰ درصد) نسبت به E7018 می‌باشد که باعث افزایش ضخامت و وزن آن شده است. همچنین نرخ رسوب جوش در E7028 نسبت به E7018 بالاتر است.

نفوذ جوش زیاد نیست و ظاهر جوش، تخت تا کمی مقعر با فلس‌های ریز و صاف می‌باشد (جوش F در شکل ۳ ـ ۴). گل حاصل ضخیم بوده و به‌راحتی پاک می‌شود. این الکترود دارای ویژگی الکترودهای پرجوش می‌باشد.

E7024: برای جوشکاری گوشه در موقعیت افقی و تخت؛ جریان متناوب و یکسو با هر دو نوع قطبیت (روکش آن از جنس تیتانیوم و پودر آهن)

الکترود E7024 دارای روکشی با درصد زیاد پودر آهن (حدود ۵۰ درصد وزن روکش الکترود) می‌باشد. الکترود E7024 در مواردی که برای کاربرد الکترودهای E6012 و E6013 ذکر شد، ممکن است به‌کار رود.

E7024 گاهی به‌نام الکترودهای تماسی نیز خوانده می‌شود، چرا که الکترود ممکن است در هنگام جوشکاری کاملاً بر روی سطوح درز اتصال قرار گیرد. در خلال جوشکاری واقعی، الکترود بر روی قطعه کشیده می‌شود که نتیجه آن ایجاد یک پوشش حفاظتی مؤثر بر روی فلز مذاب در مقابل آلودگی اتمسفر است. بسیاری از جوشکاران استفاده از قوس کوتاه را ترجیح می‌دهند.

علاوه بر ذوب مفتول الکترود و فلز پایه، حرارت حاصل از قوس، گردآهن موجود در ترکیب روکش الکترود را ذوب می‌کند تا ترسیب بیشتری حاصل شود. بنابراین افزایش سرعت جوشکاری ممکن می‌گردد. براساس محاسبات انجام‌شده $\frac{۱}{۳}$ فلز جوش رسوب کرده، حاصل از روکش الکترود است.

الکترودهای E7024 جوشی با پاشیدگی کم، مقدار نیتروژن پایین، بدون نقص و با ظاهری صاف تولید می‌کنند. این الکترودها برای جوشکاری گوشه فولاد نرمه مناسب می‌باشند. جوش تولید شده دارای تحدب کمی در مقطع عرضی می‌باشد. جوش حاصل دارای سطحی بسیار صاف با فلس‌های ریز و ملایم می‌باشد به‌گونه‌ای که تقریباً معادل سطح جوش‌های ماشینی است. این الکترود با قوسی ملایم، نفوذ کم و یک جوش عاری از عیب و نقص توصیف می‌شود. این نوع می‌تواند با سرعت عمودی زیادی مورد استفاده قرار گیرد. اغلب، برای جوشکاری فولاد کم‌آلیاژ و فولاد با کربن متوسط تا زیاد به‌کار می‌رود. این نوع الکترودها با هر دو نوع جریان متناوب و یکسو و با هر دو نوع قطبیت به‌کار می‌روند، هرچند در عمل جریان متناوب ترجیح داده می‌شود.

۳ ـ ۱۳ نگهداری الکترودهای روکش‌دار

نگهداری صحیح از الکترودهای روکش‌دار نه‌تنها سبب بهبود کیفیت جوش و افزایش بازدهی آن می‌گردد، بلکه کاهش هزینه‌های ناشی از دور ریز الکترود و تأخیرات مربوط به‌آن را نیز به‌همراه دارد. بنابراین توجه به‌توصیه‌های مهم برای انبارداری و نگهداری الکترودها، بسیار ضروری است.

نگهداری الکترودهای روکش‌دار به‌دلیل وجود رطوبت موجود در هوا، عناصر موجود در روکش و جذب رطوبت توسط آنها، همواره یک عامل مشکل ساز به‌شمار می‌رود. به‌طور کلی، معایب زیر همواره الکترودهای روکش‌دار را تهدید می‌نماید.

۳ ـ ۱۳ ـ ۱ خسارت مکانیکی

هر چند روکش الکترودها به‌میزان قابل توجهی در برابر عوامل تخریب مکانیکی خارجی مقاوم هستند، اما نباید فراموش کرد که الکترودهایی که با بی‌احتیاطی جابه‌جا می‌شوند، همیشه در معرض عوامل مخرب مکانیکی ناشی از ضربه، سایش، خراش و غیره می‌باشند. پوشش الکترودها از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار نبوده و مقاومت به‌ضربه پایینی دارند. از این‌رو در هنگام بارگیری، تخلیه و تغییرمکان، جعبه‌های الکترود را نباید با ضربه جابه‌جا کرد و یا به‌اطراف پرتاب کرد. همچنین باید از قرار دادن تعداد زیادی جعبه روی هم خودداری گردد.

روکش برخی از الکترودهای خاص مانند الکترودهای قلیایی خشک، در مقایسه با الکترودهای معمولی، بسیار شکننده‌تر بوده که در جابه‌جایی و حمل و نقل مستلزم دقت بیشتری هستند.

۳ ـ ۱۳ ـ ۲ جذب رطوبت

جذب رطوبت با درصد بالا، در پوشش الکترودها بسیار خطرناک است. مشکل بیشتر از آنجا ناشی می‌گردد، که مقدار رطوبت تا پیش از انجام جوشکاری قابل تشخیص نبوده و فقط پس از بازرسی‌های چشمی یا آزمایش‌های غیرمخرب با ملاحظه تخلخل‌ها و سایر نقایص مشخص می‌شود.

توجه به‌این نکته ضروری است که، با وجود اینکه اغلب الکترودها هنگامی که مقدار رطوبت روکش آنها حداقل باشد، بهترین عملکرد جوشکاری را نشان می‌دهند، اما این موضوع در مورد الکترودهای سلولزی مصداق ندارد و رطوبت در روکش این نوع الکترودها عملکرد جوشکاری را بهبود می‌بخشد. به‌همین دلیل، الکترودهای سلولزی را در قوطی‌های فلزی دربسته، نگهداری کرده، و چنانچه درب قوطی باز شود نباید مدت طولانی بدون استفاده باقی بماند، زیرا روکش آنها خشک می‌شود.

به‌طور کلی الکترودها در هر شرایطی آمادگی جذب رطوبت را دارند. در رطوبت نسبی ۹۰ درصد محیط، روکش الکترودها به‌سرعت رطوبت هوا را جذب کرده و در کمتر از یک روز غیرقابل استفاده می‌شوند. در رطوبت نسبی ۷۰ درصد، روکش الکترودها حداکثر یک هفته مقاومت می‌نمایند و پس از آن جوش حاصل کاملاً معیوب خواهد شد. تنها در شرایطی که مقدرا رطوبت نسبی محیط، کمتر از ۴۰ درصد باشد، می‌توان الکترود را برای مدت نسبتاً طولانی در مجاورت هوا و در خارج از بسته‌بندی نگهداری کرد.

مقدار رطوبت موجود در روکش انواع الکترودها (به‌جز الکترودهای قلیایی کم هیدروژن) را می‌توان با توزین حدود ۱ گرم از نمونه روکش قبل و بعد از خشک کردن در کوره به‌مدت یک ساعت در درجه حرارت $۱۰۰^{\circ}C$ تعیین کرد. کاهش وزن نمونه، معرف درصد حضور رطوبت در روکش الکترود خواهد بود.

مقدار رطوبت روکش الکترودهای قلیایی کم هیدروژن معمولاً در دمای $۹۰-۱۰۰^{\circ}C$ با وسایل خاصی تعیین می‌شود. هر چند تشخیص مقدار رطوبت، بدون امکانات آزمایشگاهی کار چندان ساده‌ای نیست، اما می‌توان از روش‌های ساده‌ای برای تشخیص مرطوب بودن الکترودها استفاده کرد.

یکی از این روش‌ها این است که یکی از بسته‌های الکترود که ۵ یا ۶ شاخه از الکترودهای آن را برداشته‌اید، بین شست و چهار انگشت هر دو دست نگه داشته و به‌آرامی بلرزانید. اگر الکترودها خشک و یا مقدار رطوبت مجاز باشند، صدای واضح و تیز فلزی به‌گوش می‌رسد، و اگر مرطوب باشند صدای خفه و بم تولید خواهند کرد. برای آشنا شدن با نوع این دو صدا، می‌توان آزمایش را ابتدا بین دو بسته الکترودی که به‌خشک و مرطوب بودن هر یک اطمینان هست انجام داد.

یکی دیگر از راه‌های تشخیص الکترود مرطوب، جوشکاری با آنها است. وقتی با یک الکترود مرطوب جوشکاری شده و پس از استفاده از نیمی از طول الکترود، جوشکاری متوقف گردد، اولاً روی پوشش الکترود شعله‌ای که از نوک الکترود باقی مانده و به‌طرف بالا زبانه می‌کشد دیده خواهد شد، ثانیاً ترک‌هایی طولی در روکش الکترود (از سمت نوک به‌طرف بالا) مشاهده می‌گردد.

بنابراین باید الکترودها را همواره از مرطوب شدن محافظت کرد. این ضرورت، به‌طور معمول از طریق بسته‌بندی رعایت می‌شود. الکترودهای قلیایی که به‌طور مخصوص خشک شده‌اند، در جعبه‌های مقاوم در برابر رطوبت یا در

پاکت‌های ضخیم پلاستیکی عرضه می‌شوند. تا هنگامی که از الکترودها استفاده نمی‌گردد، نباید پوشش پلاستیکی آنها باز شود و حتی پس از باز کردن و برداشتن الکترود، تا حد امکان باید آن را دوباره به‌شکلی بست که کوچکترین منفذ عبور هوا در آن وجود نداشته باشد.

الکترودهای اسیدی چندان حساسیتی به‌جذب رطوبت ندارند و الکترودهای روتیلی می‌توانند بالاترین درصد رطوبت را تحمل نمایند.

باید توجه داشت که نه تنها جذب رطوبت از هوا به‌الکترود خسارت می‌زند، بلکه تبدیل این رطوبت در اثر تقطیر نیز با تولید آب، موجب تخریب روکش الکترود خواهد شد. با توجه به‌وجود اختلاف دمای بین روز و شب، همان‌طور که مشخص است در طی روز دمای محیط به‌سرعت بالا می‌رود اما مغزی الکترود که در کارتن‌های مقوایی عایق قرار دارد، به‌آرامی گرم می‌شود؛ با کاهش دما در شب، بخشی از رطوبت جذب روکش الکترودها می‌شود. مسأله ایجاد قطرات شبنم به‌ویژه در زمان‌های قبل از تخلیه کانتینرهای حمل بار که در محل‌های سرد نگهداری می‌شوند، باید مورد توجه قرار گیرد.

بنابراین باید بسته‌های الکترود، پیش از استفاده، به‌مدت کافی در محلی نگهداری شوند تا به‌دمای محیط برسند، هر چند که جذب رطوبت ممکن است در مدتی کوتاه صورت گرفته باشد.

۳ ـ ۱۳ ـ ۳ فاسد شدن روکش الکترود

روی سطح الکترودهایی که تاریخ مصرف آنها گذشته باشد، کریستال‌ها یا پوسته‌های سفیدی (Fur) دیده می‌شود که ناشی از خروج سیلیکات سدیم از پوشش الکترود بوده و هر چند خود برای جوشکاری مضر نیستند، اما به‌خوبی نشان می‌دهند که عمر مفید الکترود به‌پایان رسیده و نباید در کارهای حساس از آن استفاده کرد.

الکترودهایی که در ترکیب روکش خود مقادیر زیادی پودر آهن دارند، اگر برای مدتی بدون محافظ در معرض رطوبت قرار گیرند، روی پوشش آنها آثار اکسید شدن مشاهده می‌شود. این امر، به‌طور معمول سبب افزایش اکسیژن جذب‌شده در جوش و در نهایت افزایش مقدار هیدروژن جذب‌شده در جوش می‌گردد، بنابراین چنین الکترودهایی باید کاملاً دور ریخته شوند زیرا اصلاً قابلیت استفاده و دوباره خشک کردن را ندارند. در برخی مواقع زنگ آهن حتی تا مغزی الکترود نیز نفوذ می‌کند.

توجه به‌این نکته ضروری است که استفاده از الکترودهای معیوب می‌تواند معایبی را در جوش باعث شود که مهمترین آنها از این قرار است:

۱ ـ ایجاد قوس الکتریکی شعله‌ور
۲ ـ افزایش مقدار و مسافت پاشش جرقه‌های جوش
۳ ـ ایجاد آخال و حفرات در فلز جوش
۴ ـ پودر شدن پوشش الکترود
۵ ـ تاول زدن پوشش الکترود
۶ ـ احتیاج به‌ولتاژ بالا برای انجام جوشکاری

۷ ـ افزایش احتمال ورود هیدروژن به‌فلز جوش به‌ویژه در فولادهای سختی‌پذیر و افزایش سختی و تُردی فلز جوش
۸ ـ ایجاد کریستال سفید رنگ (Fur) روی پوشش الکترود فاسد
۹ ـ عدم پایداری قوس و خاموش و روشن شدن آن
۱۰ ـ ظاهر نامناسب مهره‌های جوش و کاهش اندازه و ابعاد آنها
۱۱ ـ بروز سوختگی‌های (بریدگی) کناره جوش
۱۲ ـ باقی ماندن سرباره در داخل فلز جوش
۱۳ ـ ترک‌های زیاد در منطقه HAZ

۳ ـ ۱۴ خشک‌کن الکترود[۱۲]

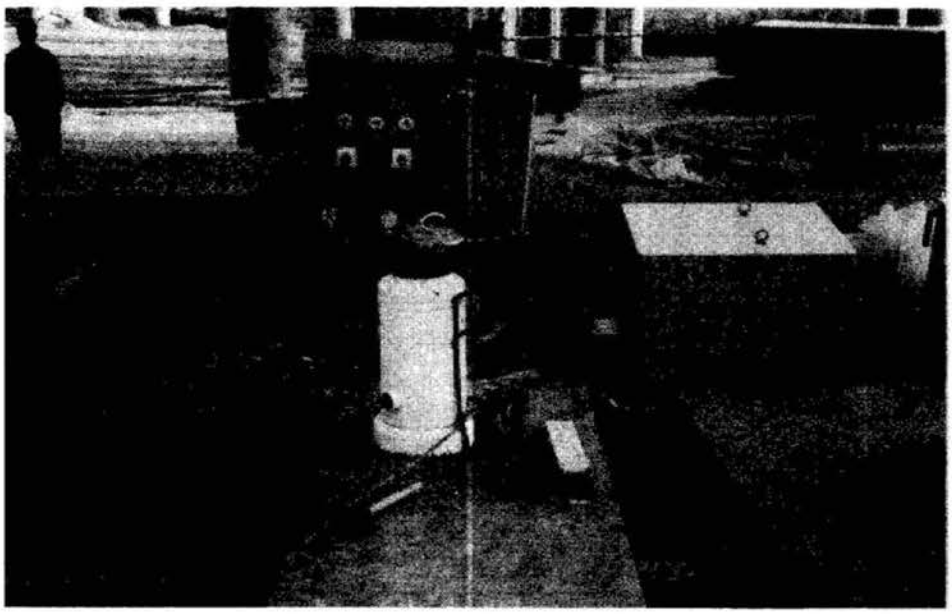
سازندگان الکترود استفاده از انبارهای خشک‌کن را برای حفظ و نگهداری کیفیت اولیه الکترودها توصیه می‌کنند. استفاده از خشک‌کن تنها یک توصیه نیست و خصوصاً برای الکترودهای کم‌هیدروژن، و سایر الکترودهای خاصی که دارای عناصر زیر هستند، اجباری است:

- پودر آهن
- فولاد ضدزنگ
- آلومینیوم
- اینکنل
- مونل
- برنج
- برنز

خشک‌کن‌های الکترود دارای ظرفیتی بین ۱۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم می‌باشند و درجه حرارت آنها تا ۴۵۰ درجه سلسیوس قابل تنظیم است. خشک‌کن‌های کوچکتر قابل حمل و نقل و جابه‌جایی هستند که این امر آنها را برای کارگاه‌های کوچک و جوشکاری روی زمین مناسب می‌سازد. خشک‌کن‌های بزرگتر ممکن است برای انبار مرکزی و گرم کردن (پختن) الکترودهای کل کارگاه مورد استفاده قرار گیرند.

افزایش استفاده از فرآیند جوشکاری زیرپودری مشکل رطوبت پودر جوشکاری را در پی دارد. پودرهای جوشکاری که حفاظت نشده‌اند، رطوبت محیط را به‌خود می‌گیرند که موجب ورود هیدروژن به‌داخل جوش می‌گردد. شکل ۳ ـ ۵ یک نوع از خشک‌کن‌های قابل حمل را نشان می‌دهد که می‌تواند جهت نگهداری پودر جوشکاری و یا مفتول روکش‌شده با این مواد، به‌کار رود.

12. *Oven*



شکل ۳ ـ ۵ خشک‌کن.

بعضی جوشکاران الکترودهای خود را در داخل یک کیسه چرمی که آن را با استفاده از بند یا تسمه به‌کمر خود می‌بندند، نگهداری و محافظت می‌کنند. این کیسه‌های چرمی محافظ ضعیفی در مقابل رطوبت می‌باشند و به‌هیچ‌وجه برای الکترودهای حساس به‌رطوبت، مناسب نیستند.

۳ ـ ۱۵ بسته‌بندی الکترودها

۳ ـ ۱۵ ـ ۱ اندازه (قطر) و طول استاندارد

طول و قطر استاندارد برای الکترودها در جدول ۳ ـ ۶ نشان داده شده است. در بعضی شرایط خاص الکترودهایی با طول ۹۰۰ میلی‌متر نیز در دسترس هستند. در همه حالات، منظور از قطر (اندازه) استاندارد الکترود، قطر مفتول داخلی است که محصور در روکش الکترود می‌باشد.

در طول‌های مختلف الکترود، طول گیر انتهای الکترود (در داخل فک انبر الکترود) برای همه طول‌ها استاندارد است.

۳ ـ ۱۵ ـ ۲ بسته‌بندی و دسته‌بندی

به‌منظور جلوگیری از صدمه رسیدن به‌الکترود در حین حمل و نقل، توصیه می‌شود وزن دسته و بسته‌های الکترود در حدود زیر باشد:

- وزن بسته‌های الکترود حدود ۴ کیلوگرم
- وزن جعبه‌ها حدود ۲۰ تا ۳۰کیلوگرم
- وزن خالص حلقه و قرقره به‌طور تقریب بین ۶۵ تا ۹۰ کیلوگرم

جدول ۳ ـ ۶ قطر و طول الکترود

طول استاندارد (mm)	قطر استاندارد مفتول الکترود (mm)
۲۲۵	۱/۵
۲۲۵ ـ ۳۰۰	۲
۳۰۰	۲
۳۵۰	۳
۳۵۰	۴
۳۵۰	۴/۵
۳۳۰ ـ ۴۵	۵/۵
۴۵۰	۶
۴۵۰	۸
۴۵۰	۱۰

۳ ـ ۱۵ ـ ۳ علامت‌گذاری

کلیه دسته‌ها، بسته‌ها، جعبه‌ها، حلقه‌ها و قرقره‌های الکترود باید شامل اطلاعات زیر باشند:

- طبقه‌بندی الکترود
- نام سازنده یا علامت تجاری آن
- طول و قطر استاندارد (در حلقه و قرقره‌ها، وزن جایگزین طول می‌گردد)
- مدت زمان تضمین

۳ ـ ۱۶ ضوابط بازرسی ظاهری الکترودها

الکترودهایی که داری نوع و قطر یکسان بوده و روش ساخت واحدی داشته و یک جا عرضه می‌شوند «پارتی» نام دارند. برای الکترودهای مخصوص جوشکاری فولادهای ساختمانی حداکثر وزن پارتی ۲۰ تن و برای الکترودهای جوشکاری فولادهای ویژه حداکثر وزن هر پارتی ۵ تن می‌باشد.

ـ بازدید ظاهری و اندازه‌گیری باید با برداشتن تا ۰/۵ درصد الکترودها از محل‌های مختلف هر پارتی (که از ۱۰ عدد الکترود کمتر نباشد) و بررسی آنها صورت پذیرد.

ـ بازدید ظاهری الکترودها بدون استفاده از وسایل بزرگ‌نما انجام می‌شود.

ـ از هر تن الکترود حداقل ۳ الکترود برای هر یک از موارد کنترل ظاهری (استحکام روکش ـ وضعیت ظاهری، مقاومت در مقابل رطوبت و هم‌مرکز نبودن) انتخاب می‌شود.
ـ برای کنترل کیفیت جوشکاری و آزمایش‌های مکانیکی و غیره به‌تعداد لازم نسبت به‌قطر الکترود و حجم آزمایش نمونه‌گیری انجام می‌شود.

۳ ـ ۱۶ ـ ۱ بازدید ظاهری روکش

روکش الکترود باید محکم، بادوام، بدون ترک و یکنواخت باشد.
در بازدید ظاهری موارد ذیل مورد توجه قرار می‌گیرد:
الف: لخت بودن الکترود روکش‌دار تا قطر ۶ میلی‌متر، حداکثر تا نصف قطر و برای الکترود بزرگتر، حداکثر ۳ میلی‌متر از سَر الکترود مجاز است.
ب: برجستگی‌ها و سوراخ‌های تکی به‌اندازه حداکثر یک چهارم ضخامت روکش مجاز است.
پ: فرورفتگی ناحیه‌ای نباید تعدادشان بیش از سه و طول‌شان بیش از ۲ میلی‌متر و عمق‌شان بیش از نصف ضخامت روکش باشد.
ت: منفذها نباید تعدادشان بیش از سه عدد در هر ۱۰ میلی‌متر طول روکش بوده و قطر هر منفذ بیش از ۲ میلی‌متر و عمق آن از نصف ضخامت روکش بیشتر باشد.
ث: روکش نباید بیش از ۲ ترک مویی و به‌طول بیشتر از ۱۲ میلی‌متر داشته باشد.

۳ ـ ۱۶ ـ ۲ استحکام روکش

طبق استاندارد روسیه برای پی بردن به‌استحکام الکترود آزمایش زیر را انجام می‌دهند:
الف: الکترودهای تا قطر ۳ میلی‌متر را از فاصله یک متری آزادانه و به‌طور افقی بر روی صفحه فولادی رها می‌کنند.
ب: الکترودهای با قطر بزرگتر از ۳ میلی‌متر را از نیم متری آزادانه و به‌طور افقی بر روی صفحه فولادی رها می‌کنند.

روکش این الکترود نباید در این سقوط آسیب ببیند.

۳ ـ ۱۶ ـ ۳ مقاومت روکش در مقابل رطوبت

روکش الکترود باید در مقابل رطوبت مقاومت کند و پس از آنکه به‌مدت ۲۴ ساعت در آب ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفت علامت خرابی در آن پدیدار نگردد و چسبندگی خود را از دست ندهد.

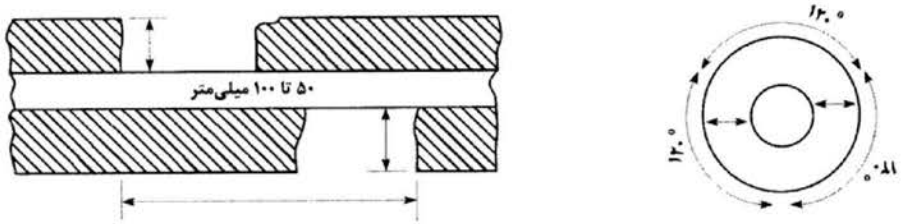
۳ ـ ۱۶ ـ ۴ هم مرکز بودن روکش

روکش الکترود باید با میله الکترود هم مرکز باشد و به‌طور یکنواخت میله را پوشانده باشد.

اختلاف ضخامت روکش $e = S_1 - S_0$ بسته به‌قطر میله الکترود نباید از مندرجات جدول ۳ ـ ۷ تجاوز نماید.
برای تعیین یکنواختی ضخامت روکش باید در سه محل که نسبت به‌هم تحت زاویه ۱۲۰ درجه قرار داده شده و به‌فاصله ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر از هم باشند، ضخامت روکش اندازه‌گیری شود (شکل ۳ ـ ۶).
ضخامت روکش باید با میکرومتر و با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر کنترل شود.
کنترل ضخامت هم مرکز بودن روکش را می‌توان با دستگاه‌های مخصوص (مغناطیسی و غیره) بدون تخریب روکش انجام داد.

جدول ۳ ـ ۷ اختلاف ضخامت مجاز

اختلاف مجاز ضخامت روکش (میلی‌متر) $e = S_1 - S_0$	قطر میلهٔ الکترود (میلی‌متر)
۰/۰۵	۱/۶
۰/۰۸	۲
۰/۱۰	۲/۵
۰/۱۵	۳
۰/۲۰	۴
۰/۲۵	۵
۰/۳۰	۶



شکل ۳ ـ ۶ تعیین یکنواختی روکش.

۳ ـ ۱۶ ـ ۵ کیفیت اجرای جوشکاری

جوشکاری الکترود باید خصوصیات ذیل را داشته باشد:

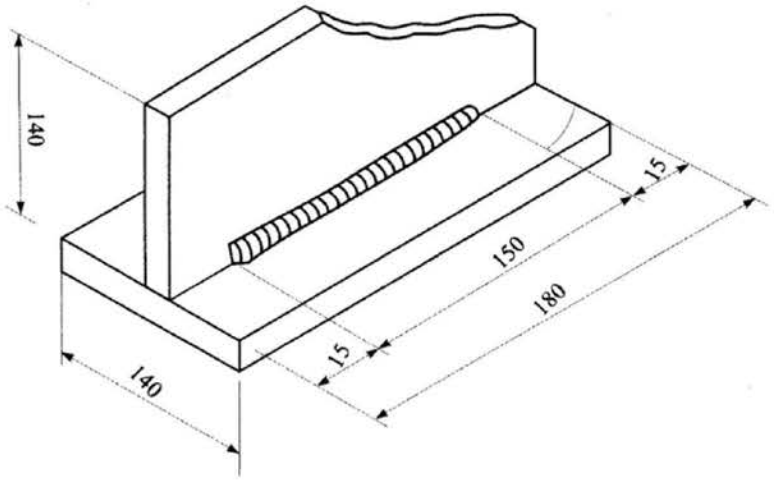
الف: قوس باید به‌آسانی روشن شده و پایدار باشد. نوع جریان برق و شدت جریان جوشکاری طبق توصیه سازنده الکترود انتخاب می‌شود.

ب: روکش باید به‌طور مناسب با میله مغزه ذوب شده تا در انتهای الکترود، روکش به‌صورت لوله یا شاخک باقی نمانده و مانع ذوب مداوم الکترود نشود.

پ: روی گرده جوش باید سرباره محافظ تشکیل شود که پس از سرد شدن به‌راحتی برداشته شود.

ت: فلز درز جوش و فلز مبنا نباید حاوی ترک باشد.

ث: سطح مقطع شکست جوش گوشه از لحاظ وجود تخلخل، ترک و نفوذ مورد ارزیابی چشمی قرار گیرد (شکل ۳ ـ ۷).



شکل ۳ ـ ۷

۴ طراحی درز جوش

۴ـ۱ معرفی ۱۰۷
۴ـ۲ انواع اتصال ۱۰۷
۴ـ۳ انواع جوش ۱۰۸
۴ـ۴ انواع درز ۱۱۰
۴ـ۵ دهانه یا بازشدگی ریشه (R) ۱۱۳
۴ـ۶ تسمه‌های پشت‌بند ۱۱۵
۴ـ۷ گرده جوش ۱۱۶
۴ـ۸ ضخامت ریشه ۱۱۶
۴ـ۹ سنگ زدن ریشه از پشت (شیارزنی پشت) ۱۱۸

۴ طراحی درز جوش

۴ـ۱ معرفی

فصل مشترک دو قطعه که مصالح جوش در امتداد آن رسوب می‌نمایند، درز[1] جوش نامیده می‌شود. هندسه درز، از عوامل مهم و تأثیرگذار بر اقتصاد و کیفیت جوش است. هندسه درز با سه پارامتر زیر تعریف می‌شود:

الف) زاویه پخی لبه

ب) بازشدگی یا دهانه ریشه (R)

پ) پیشانی یا ضخامت ریشه

در این فصل به‌بحث در مورد تأثیر سه عامل فوق در انتخاب هندسه مناسب درز پرداخته می‌شود. آغازگر این بحث، ارایه تعاریف عمومی می‌باشد.

۴ـ۲ انواع اتصال

به‌نحوه قرار گرفتن قطعات و ورق‌ها در کنار یکدیگر، نوع اتصال گفته می‌شود. انواع اتصال به‌قرار زیر است (شکل ۴ـ۱):

۱ ـ اتصال لب به‌لب[2]

۲ ـ اتصال سپری (T)[3]

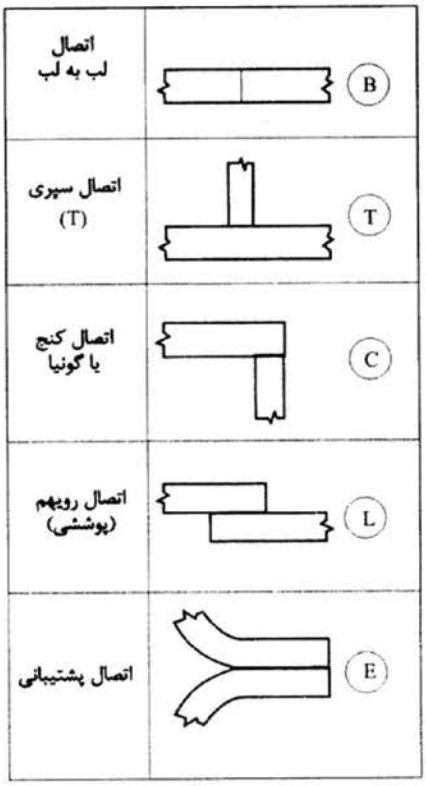
۳ ـ اتصال کنج یا گونیا[4]

۴ ـ اتصال رویهم (پوششی)[5]

۵ ـ اتصال پیشانی[6]

---

1. *Joint*
2. *Butt*
3. *Tee*
4. *Corner*
5. *Overlap*
6. *Edge*



شکل ۴ ـ ۱ انواع اتصال.

۴ ـ ۳ انواع جوش

به‌منظور برقراری اتصالات فوق، انواع مختلف جوش به‌شرح زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۴ ـ ۲):

۱ ـ **جوش گوشه**[7]: جوشی است که بر وجوه جانبی دو قطعه مجاور هم رسوب می‌کند (۴ ـ ۲ ـ الف).

۲ ـ **جوش شیاری**[8]: جوشی است که در درز بین دو قطعه رسوب می‌کند و در دو نوع با نفوذ کامل و با نفوذ نسبی اجرا می‌شود (شکل ۴ ـ ۲ ـ ب).

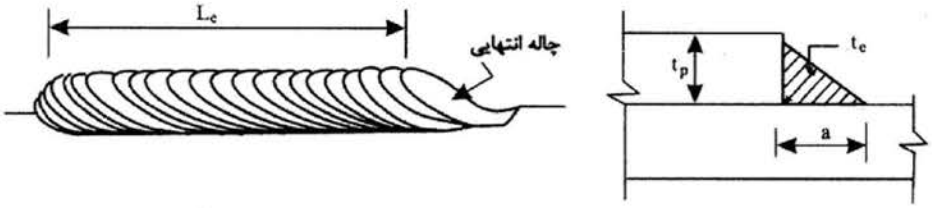
۳ ـ **جوش انگشتانه**[9]: جوشی است که درون یک سوراخ به‌صورت توپر داده می‌شود (شکل ۴ ـ ۲ ـ پ).

۴ ـ **جوش کام**[10]: جوشی است که درون یک شکاف به‌صورت توپر داده می‌شود (شکل ۴ ـ ۲ ـ ت).

۵ ـ **جوش در حفره و شیار**: جوش گوشه‌ای است که در پیرامون یک سوراخ یا شکاف اجرا می‌شود.

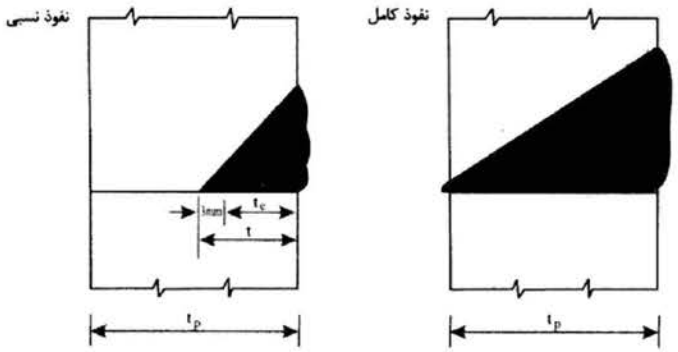
---

7. *Fillet*
8. *Groove*
9. *Pluge*
10. *Slot*



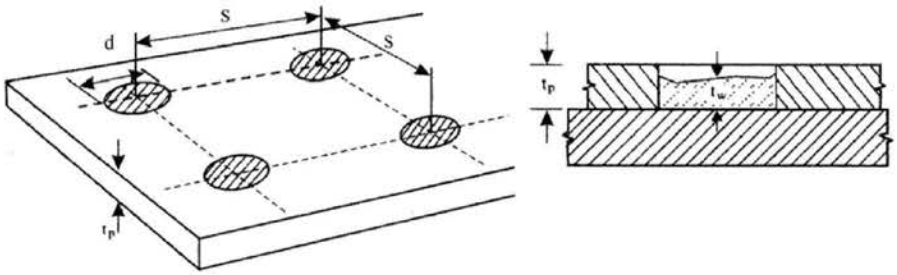
a= ساق جوش
L_e= طول مؤثر جوش
t_e= گلوی مؤثر جوش گوشه
t_p= ضخامت ورق
d= فاصلهٔ آزاد بین قطعات جوش

(الف) جوش گوشه



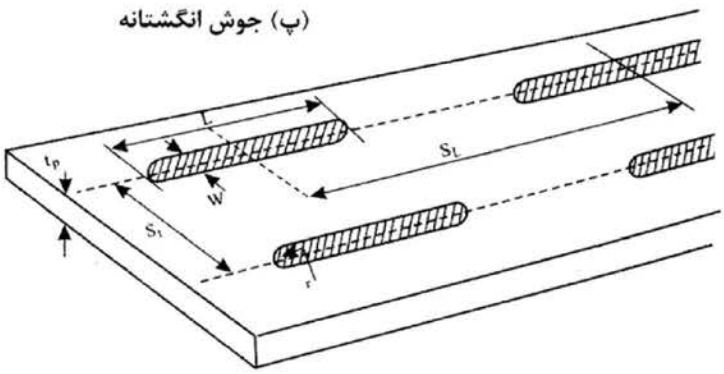
t_e= ضخامت مؤثر جوش شیاری با نفوذ نسبی
t_p= ضخامت ورق
L_e= طول مؤثر جوش
A_e= سطح مقطع مؤثر جوش
t= عمق شیار جوش

(ب) جوش شیاری



t_w= ضخامت جوش t_p= ضخامت ورق d= قطر سوراخ انگشتانه s= فواصل سوراخ (گام طولی و عرضی)

(پ) جوش انگشتانه



t_w= ضخامت جوش t_p= ضخامت ورق L= طول جوش کام W= عرض شکاف S_L= گام طولی S_t= گام عرضی

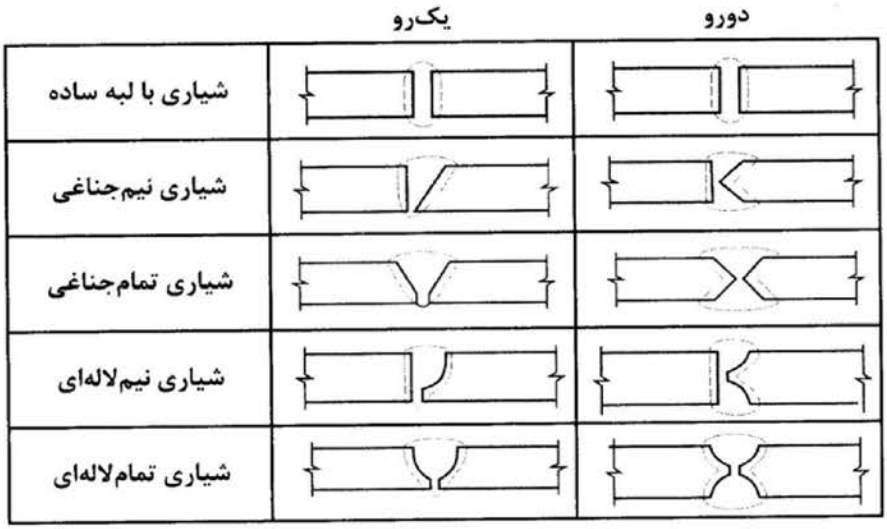
(ت) جوش کام

شکل ۴ ـ ۲ انواع جوش.

۴ ـ ۴ انواع درز[11]

برای اینکه جوش شیاری در درز بین دو قطعه رسوب کند، برحسب ضخامت و سهولت کار، باید به‌لبه، هندسه خاصی داد. این عمل را آماده‌سازی گویند. برحسب نوع هندسه، انواع درز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (شکل ۴ ـ ۳):

۱ ـ ساده
۲ ـ جناغی (یک‌رو و دو رو)
۳ ـ نیم‌جناغی (یک‌رو و دو رو)
۴ ـ لاله‌ای (یک‌رو و دو رو)
۵ ـ نیم‌لاله‌ای (یک‌رو و دو رو)



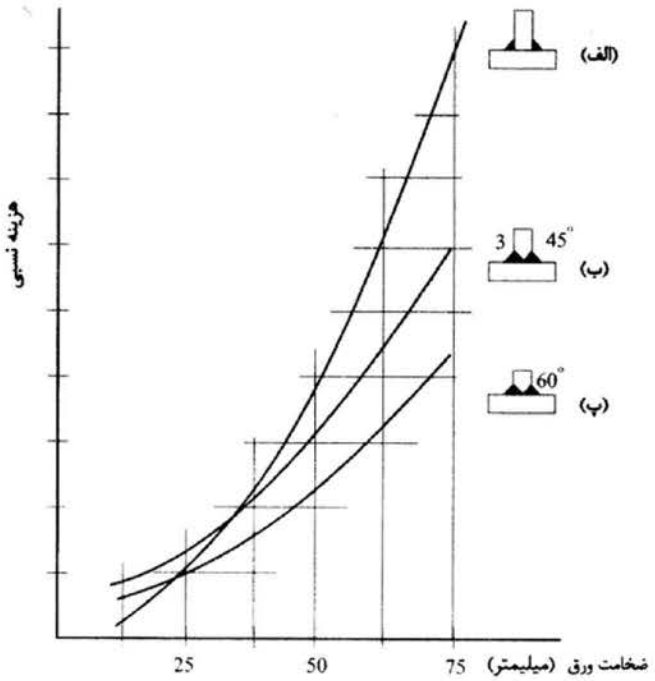
شکل ۴ ـ ۳ انواع درز.

انتخاب نوع جوش و لبه، همیشه بستگی به‌مسائل طراحی ندارد، بلکه این انتخاب، تأثیر مستقیم بر هزینه جوش نیز دارد. شکل ۴ ـ ۴ این تأثیر را برای جوش گوشه و دو نوع جوش شیاری در یک اتصال سپری نشان می‌دهد.

جوش الف: برای یک جوش صددرصد (تمام قدرت) اندازه ساق جوش باید در حدود ۷۵٪ ضخامت ورق باشد.

جوش ب: همین جوش صددرصد را می‌توان به‌صورت جوش شیاری با نفوذ کامل با نیم‌جناغی کردن دو طرف لبه ورق تحت زاویه ۴۵ درجه و در نظر گرفتن دهانه ریشه برابر با ۳ میلی‌متر (برای نفوذ کامل) به‌دست آورد. مقدار فلز جوش لازم در این حالت برای ورق ۲۵ میلی‌متر، ۷۵٪ و برای ورق ۱۰۰ میلی‌متر، ۵۶٪ حالت الف می‌باشد. برای ورق‌ها با

11. Joint



شکل ۴ ـ ۴ نمودار هزینه نسبی برای انواع مختلف جوش که مقاومتی برابر با مقاومت کامل ورق دارند.

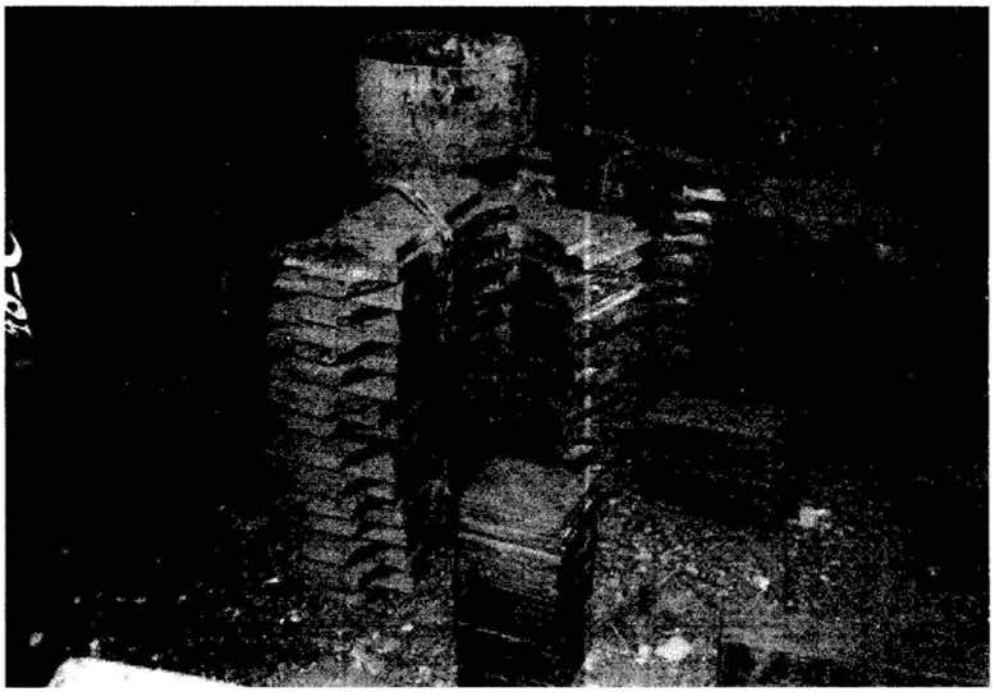
ضخامت کمتر از ۴۰ میلی‌متر، مخارج لازم برای پخ زدن لبه‌ها بیش از قیمت مصالح صرفه‌جویی شده است. اما برای ورق‌های ضخیم‌تر از ۴۰ میلی‌متر، قیمت مصالح صرفه‌جویی مخارج لازم برای پخ زدن لبه‌ها را جبران می‌نماید.

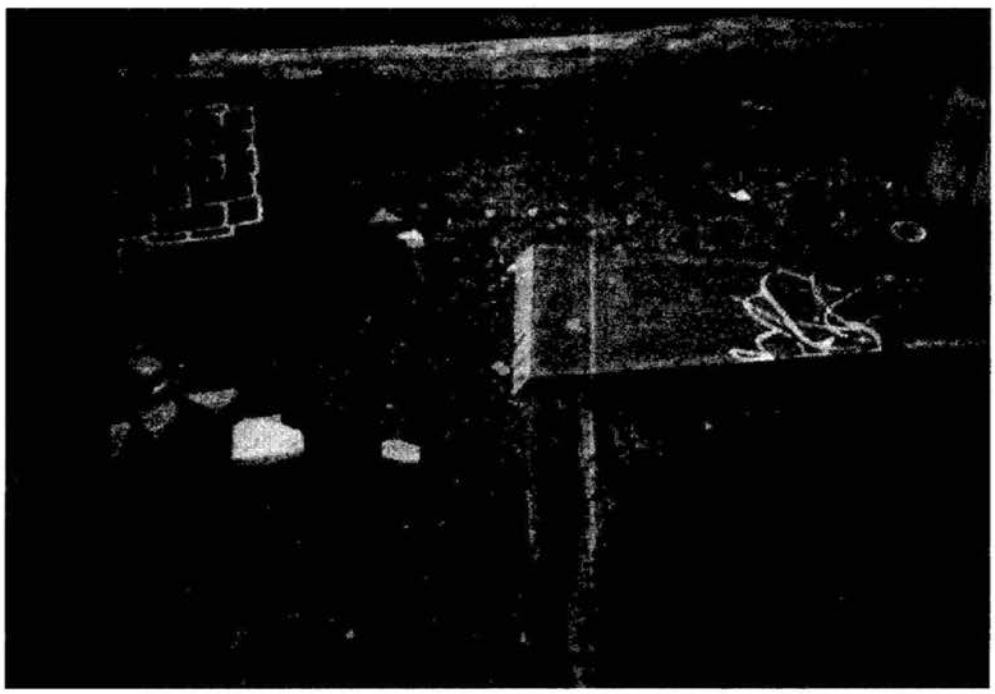
جوش پ: جوش صددرصد را می‌توان به‌صورت جوش شیاری با نفوذ نسبی با پخ زدن لبه تحت زاویه ۶۰ درجه نیز به‌دست آورد. روش جوشکاری در این حالت این‌طور خواهد بود که ابتدا شیار ایجاد شده در ضخامت ورق را با جوش پُر کرده و سپس یک جوش گوشه ۶۰ درجه در خارج از ضخامت انجام می‌دهند. ارتفاع حداقل ناحیه پخ شده و همچنین ساق اضافی جوش گوشه، هر دو ۲۹٪ ضخامت ورق می‌باشند. مقدار مصالح مصرف شده در این شیوه برای تمام ضخامت‌ها تقریباً ۵۰٪ مصالح مصرفی در حالت الف است.

تمام این مقایسه‌ها در شکل ۴ ـ ۴ انجام گرفته است. محل تقاطع منحنی مربوط به‌حالت جوش گوشه (الف) با منحنی جوش شیاری (ب) در حدود ضخامت ۳۵ میلی‌متر می‌باشد.

جوش نوع (پ) برای ضخامت‌های بیش از ۲۵ میلی‌متر ارزان‌ترین قیمت را دارد. البته محل نسبی این منحنی‌ها با توجه به‌قیمت روز برش و جوشکاری تغییر پیدا می‌کند.

در شرکت‌های جوشکاری بهتر است چنین منحنی‌هایی رسم شده و به‌مهندس طراح آن شرکت به‌منظور انتخاب اقتصادی‌ترین حالت جوش ارایه گردد.





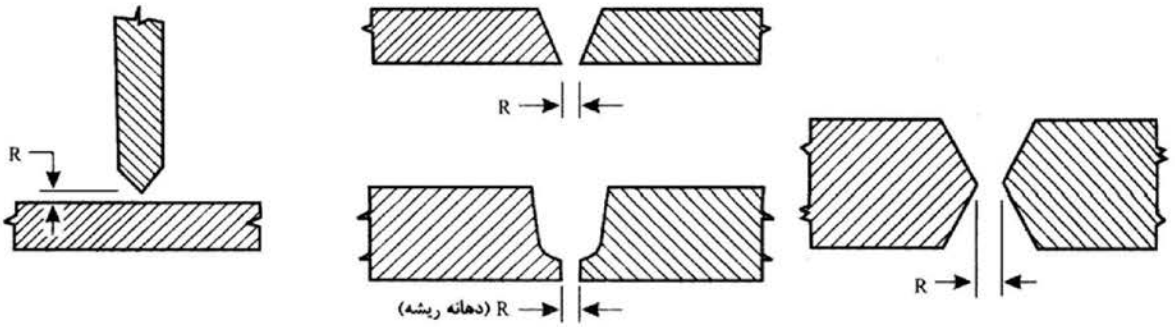
شکل ۴ ـ ۵ پخ زدن لبه ورق روسری برای استفاده در اتصال صلب تیر به ستون.

۴ ـ ۵ دهانه یا بازشدگی ریشه (R)

در شکل ۴ ـ ۶ دهانه ریشه (R) که همان فاصله بین دو لبه در محل ریشه درز می‌باشد، نشان داده شده است. دهانه ریشه برای این منظور به‌کار می‌رود که الکترود بتواند به‌ریشه جوش برسد. هرقدر که زاویه پخی لبه‌ها کم باشد، برای اینکه یک ریشه خوب به‌دست آید، باید دهانه ریشه (R) را بیشتر در نظر گرفت.

اگر دهانه ریشه خیلی کوچک باشد جوش ریشه خیلی مشکل خواهد بود و باید از الکترودهای نازک استفاده شود و استفاده از الکترودهای نازک باعث کندی کار خواهد شد.

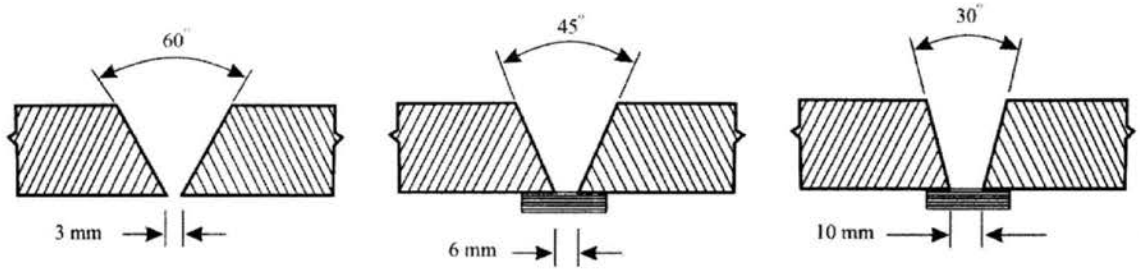
دهانه ریشه خیلی بزرگ بر کیفیت جوش اثری ندارد، ولی مصرف مصالح جوش را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش هزینه جوشکاری و اعوجاج حاصل از جوشکاری است.



شکل ۴ ـ ۶ دهانه یا بازشدگی ریشه.

شکل ۴ ـ ۷ نشان می‌دهد که چگونه وقتی زاویه پخی لبه کم میشود، دهانه ریشه باید افزایش یابد. وقتی که دهانه ریشه زیاد می‌گردد، باید از تسمه پشت‌بند استفاده شود. هر سه وضعیت نشان داده شده در شکل ۴ ـ ۷ قابل قبول هستند و هر سه برای یک جوشکاری خوب مساعد می‌باشند. ترجیح یکی بر دو تای دیگر فقط بر مبنای مقایسه اقتصادی خواهد بود.

آماده کردن لبه‌ها برای جوشکاری و دهانه ریشه هر دو تأثیر مستقیم بر هزینه جوشکاری (میزان مصرف مصالح) دارند. منظور از آماده کردن لبه جوش، پخ زدن لبه‌ها به‌شکل دلخواه قبل از جوشکاری می‌باشد.

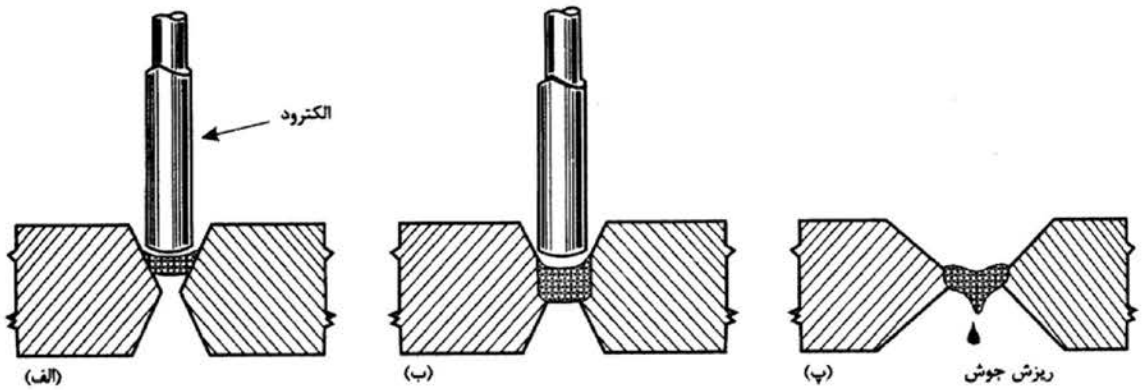


شکل ۴ ـ ۷ تسمه پشت‌بند.

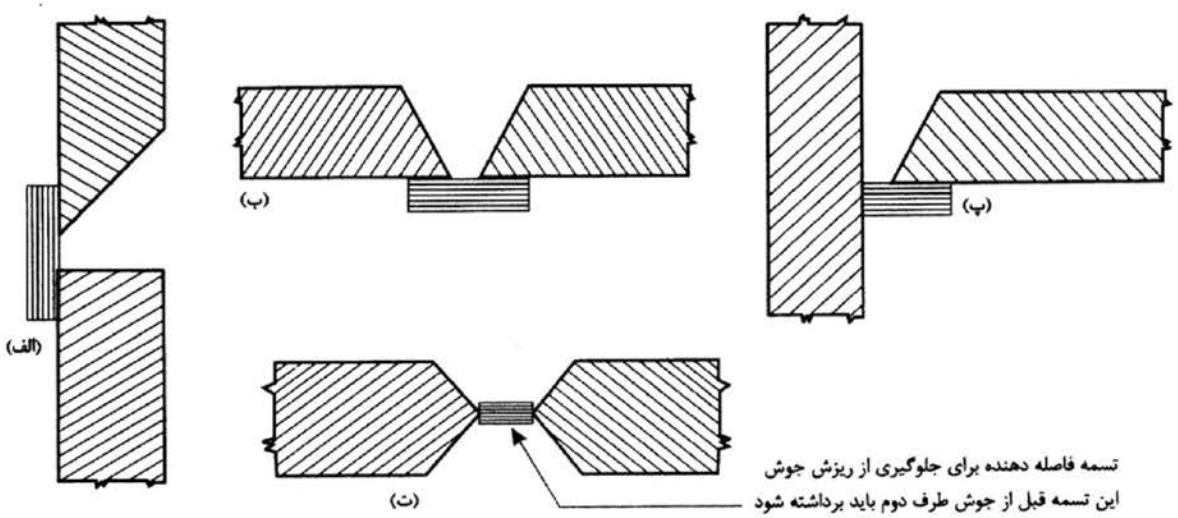
شکل ۴ ـ ۸ ـ الف، حالتی را نشان می‌دهد که فاصله لبه دو قطعه و همچنین زاویه پخی لبه‌ها کم می‌باشد. این حالت برای جوشکاری خوب نیست، زیرا جوش بین دو لبه پل زده، تفاله و خاکستر جوشکاری پس از انجام عملیات جوشکاری در محل ریشه اتصال باقی می‌ماند و حذف آنها از روی جوش برای جوش طرف دوم وقت‌گیر خواهد بود.

شکل ۴ ـ ۸ ـ ب، نشان‌دهنده فرم صحیح لبه‌ها قبل از شروع به‌جوشکاری می‌باشد. این جوش باعث امتزاج و ترکیب خوب مصالح در ریشه خواهد شد. تولید خاکستر جوشکاری در این حالت به‌حداقل مقدار خود خواهد رسید.

شکل ۴ ـ ۸ ـ پ، نشان می‌دهد که چگونه فاصله زیاد لبه‌ها در هنگام جوشکاری باعث ریزش جوش از زیر آن می‌گردد. در کارخانه‌ها برای اینکه از ریزش جوش جلوگیری کنند از تسمه‌های فاصله‌دهنده با اندازه معین استفاده می‌کنند.



شکل ۴ ـ ۸



شکل ۴ ـ ۹

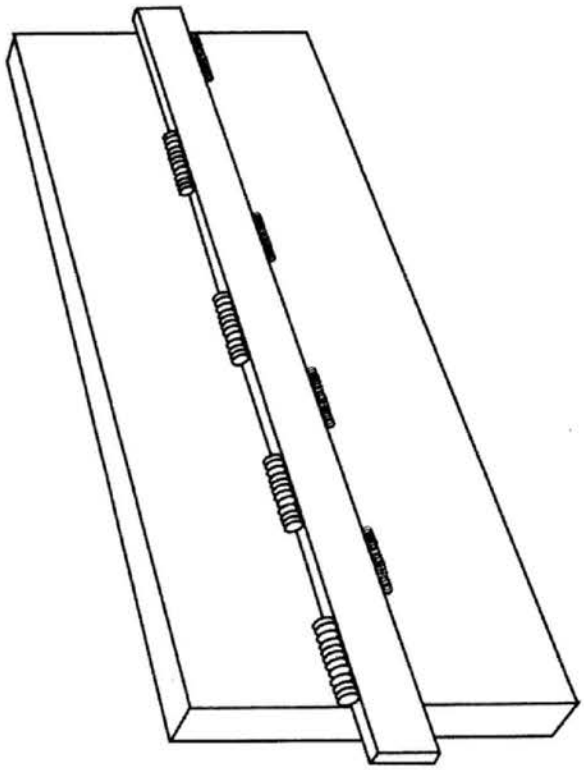
۴ ـ ۶ تسمه‌های پشت‌بند

وقتی که جوشکاری از یک طرف بوده و فاصله لبه‌ها نیز زیاد باشد، از تسمه‌های پشت‌بند استفاده می‌شود. تسمه‌های پشت‌بند در شکل‌های ۴ ـ ۹ ـ الف، ب و پ نشان داده شده‌اند. این تسمه‌ها پس از انجام عملیات جوشکاری در جای خود باقی می‌مانند و جزیی از اتصال می‌شوند.*

تسمه‌های فاصله‌دهنده اغلب در درزهای جناغی دورو (X) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت قبل از جوشکاری طرف دوم، نیاز به‌سنگ زدن ریشه می‌باشد.

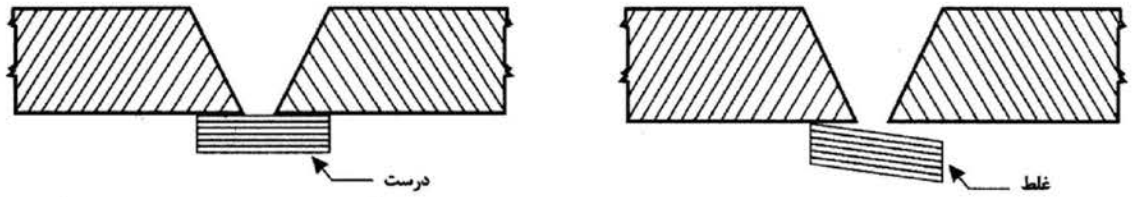
جنس تسمه‌های پشت‌بند باید با مصالح اصلی سازگار باشد. برای تثبیت این تسمه‌ها، قبل از انجام عمل جوشکاری از خال‌جوش‌های متناوب استفاده می‌شود. این خال‌جوش‌ها در هر دو طرف تسمه پشت‌بند به‌صورت چپ و راست داده می‌شوند تا ایجاد تنش‌های اضافی نکنند. در ضمن، این خال‌جوش‌ها نباید درست مقابل یکدیگر قرار گیرند (شکل ۴ ـ ۱۰).

تسمه‌های پشت‌بند باید کاملاً به‌زیر ورق بچسبند وگرنه باعث به‌وجود آمدن تفاله جوشکاری در ناحیه ریشه جوش می‌شوند (شکل ۴ ـ ۱۱). جوش ریشه (پاس اول) باید بتواند امتزاج کامل در محل ریشه به‌وجود آورد.



شکل ۴ ـ ۱۰ اجرای خال‌جوش‌های متناوب برای اتصال تسمه پشت‌بند.

** امروزه ثابت شده است که در جوش‌های شیاری با بارگذاری عرضی، تسمه‌های پشت‌بند باعث تمرکز تنش می‌گردند و بهتر است بعد از جوشکاری حذف شوند.*

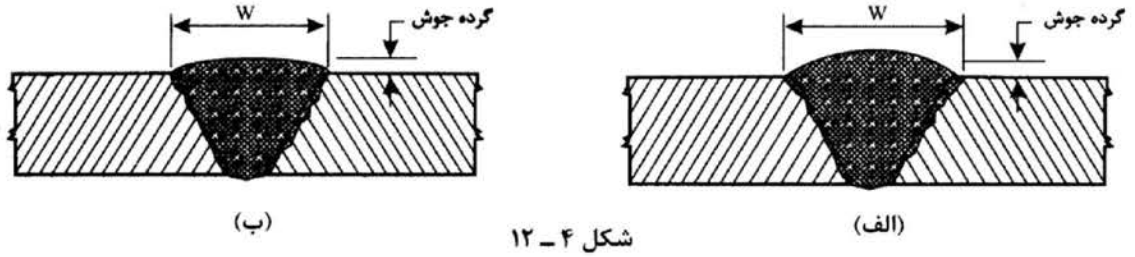


شکل ۴ ـ ۱۱

۴ ـ ۷ گرده جوش[12]

در درزهای لب به‌لب، تحدب اسمی (تقریباً ۱/۵ میلی‌متر بالای سطح تراز) لازم است (شکل ۴ ـ ۱۲ ـ ب).

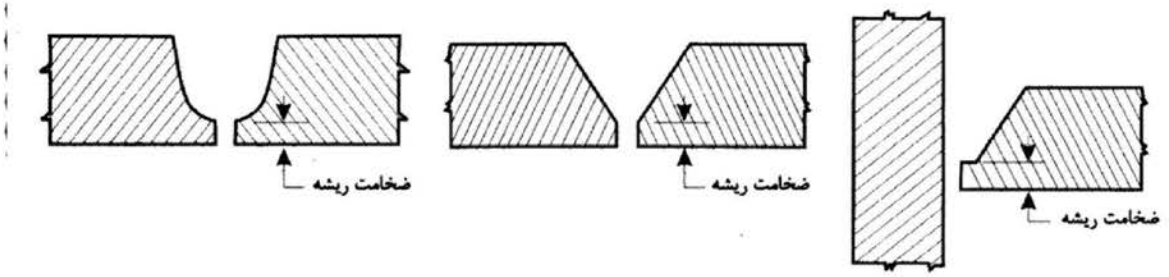
مقدار زیاد این تحدب فایده‌ای ندارد و باعث افزایش تمرکز تنش و هزینه جوشکاری می‌شود (شکل ۴ ـ ۱۲ ـ الف). باید دقت شود که هم ارتفاع و هم پهنای گرده حداقل گردد.



شکل ۴ ـ ۱۲

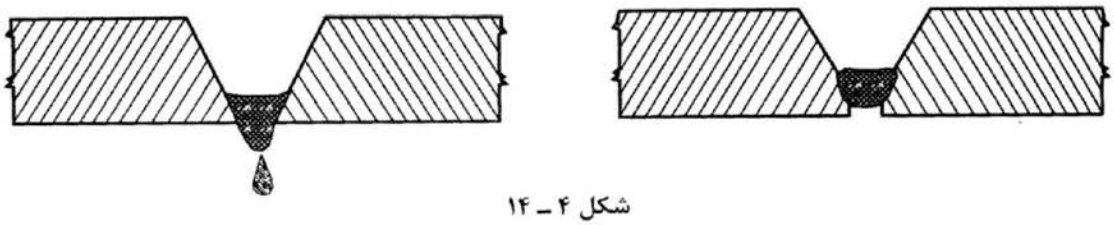
۴ ـ ۸ ضخامت ریشه (پیشانی)

برای اینکه از سوختن ریشه جوش و همچنین از ریزش جوش جلوگیری شود، به‌جای اینکه لبه جوش در محل ریشه به‌صورت تیز باشد، ضخامتی برای آن قائل می‌شوند که آن را ضخامت ریشه یا پیشانی می‌نامند (شکل ۴ ـ ۱۳). اگر لبه درز در محل ریشه تیز باشد، برای سوختن و ریزش خیلی مستعد است، مخصوصاً اگر فاصله لبه نیز مقداری زیاد باشد (شکل ۴ ـ ۱۴).



شکل ۴ ـ ۱۳ ضخامت ریشه.

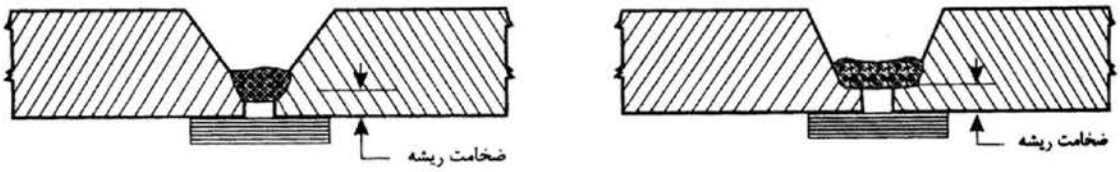
12. *Weld reinforcement*



شکل ۴ ـ ۱۴

اجرای پیشانی ریشه در عمل وقت‌گیر و پُرکار است و به‌دو برش و یا یک برش و یا سنگ زدن نیاز دارد. وقتی منظور به‌دست آوردن جوش صددرصد (تمام قدرت) بوده و لبه نیز دارای پیشانی ریشه باشد، قبل از جوش روی دوم (پشت کار) احتیاج به‌سنگ زدن ریشه است.

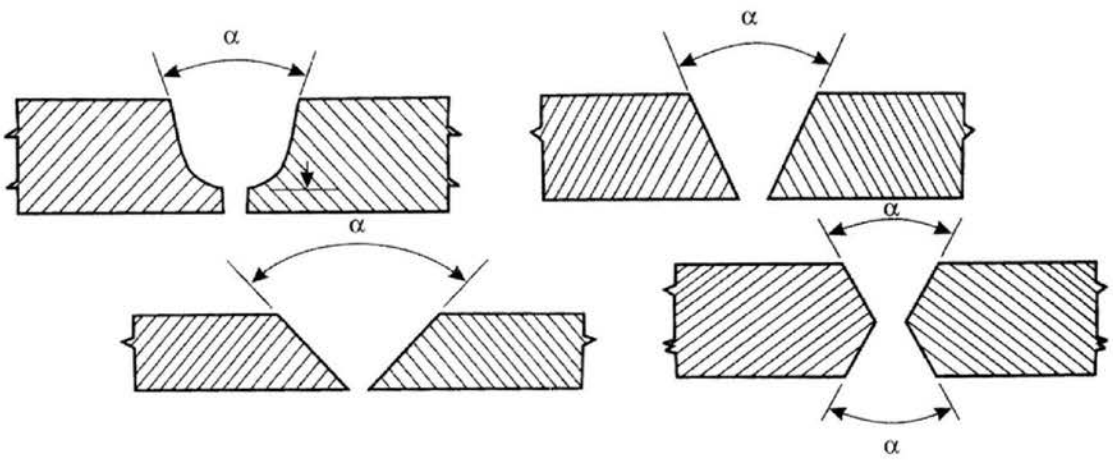
وقتی که از تسمه‌های پشت‌بند استفاده می‌شود، دیگر نباید ضخامتی برای ریشه در نظر گرفت (شکل ۴ ـ ۱۵). زیرا در این حالت یک فضای خالی پیدا می‌شود که در هنگام جوشکاری درون آن پُر از گاز می‌گردد.



شکل ۴ ـ ۱۵

فلسفهٔ اصلی پخ زدن لبه، ایجاد دسترسی برای جوشکاری در تمام ضخامت و همچنین مطمئن شدن از ذوب و امتزاج کامل در تمام سطح مقطع می‌باشد. دسترسی خوب، با افزایش زاویه پخی، و افزایش دهانه ریشه به‌دست می‌آید که همیشه ترکیبی از آنها یک راه‌حل خوب به‌دست می‌دهد (شکل ۴ ـ ۱۶).

زاویه پخی بستگی به‌محل کار و زاویه‌ای که الکترود در محل کار می‌تواند داشته باشد، دارد (شکل۴ ـ ۱۷). همان‌طوری که در شکل ۴ ـ ۱۷ نشان داده شده، زاویه پخی حداقل برابر با ۴۵ درجه توصیه می‌شود.



شکل ۴ ـ۱۶ زاویه پخی.

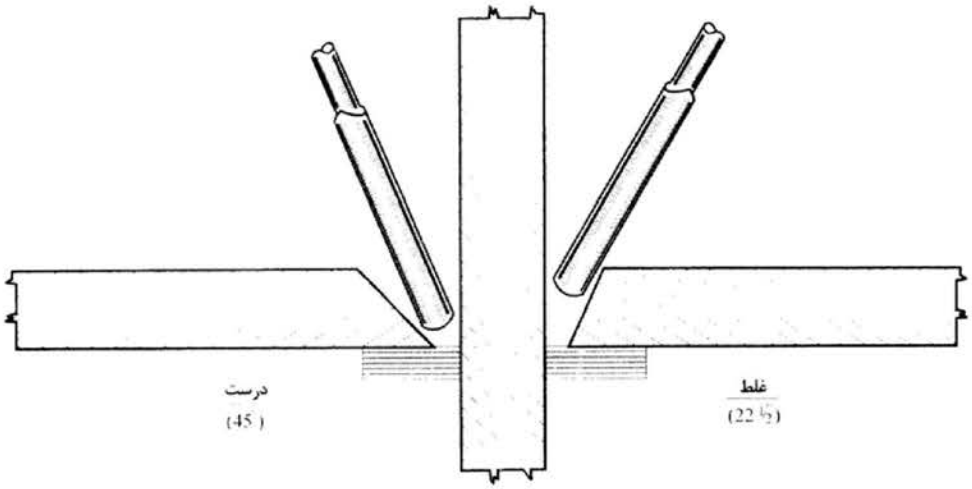
درزهای لاله‌ای (U) و نیم‌لاله‌ای (J)

درزهای لاله‌ای و نیم‌لاله‌ای برای جوشکاری بسیار عالی هستند ولی هزینهٔ ساخت آنها گران تمام می‌شود (شکل ۴ ـ ۱۸). این شکل‌ها نیز احتیاج به‌ضخامت ریشه و در نتیجه سنگ زدن ریشه از پشت دارند.

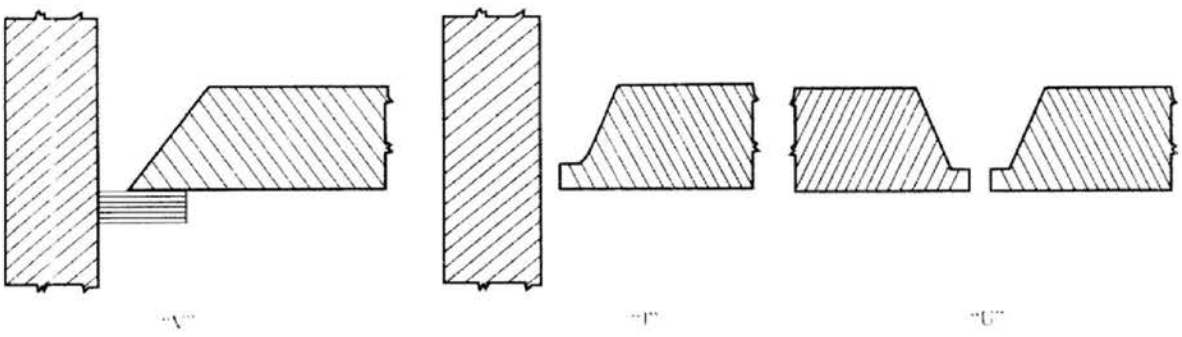
۴ ـ ۹ سنگ زدن ریشه از پشت (شیارزنی پشت)

برای دستیابی به‌ذوب و امتزاج کامل در تمام مقطع جوش و در نتیجه یک جوش صددرصد (تمام قدرت) لازم است در تمام انواع درزها طرف دوم یا پشت کار نیز جوش شود. قبل از جوش پشت کار باید ریشه جوش برداشته شود، این کار به‌وسیلهٔ الکترود گوج یا سنگ زدن صورت می‌گیرد. بدون سنگ زدن ریشه جوش، جوش طرف دوم نفوذ کامل نخواهد داشت (شکل ۴ ـ ۱۹).

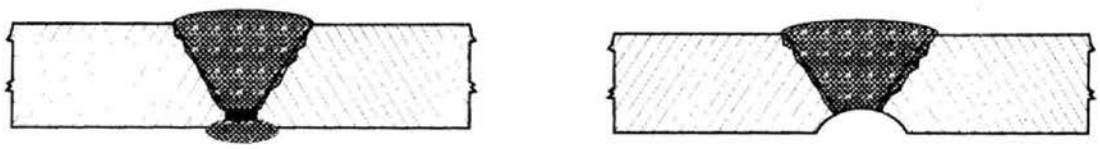
میزان سنگ زدن ریشه آنقدر باید عمیق باشد تا مصالح اصلی جوش طرف اول ظاهر گردند. شکل شیار پشت باید طوری باشد که الکترود برای جوشکاری بتواند داخل آن گردد (شکل ۴ ـ ۲۰).



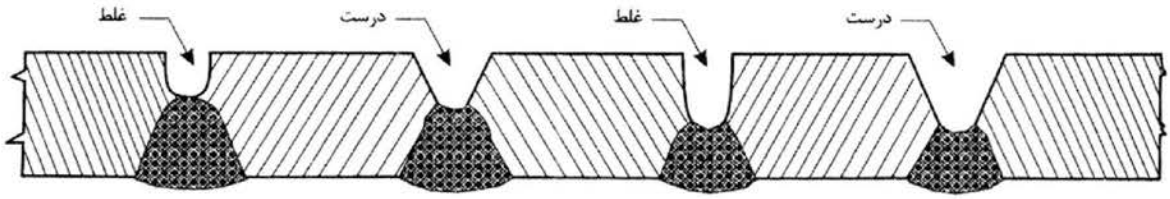
شکل ۴ ـ ۱۷



شکل ۴ ـ ۱۸



شکل ۴ ـ ۱۹ شیارزنی از پشت.



شکل ۴ ـ ۲۰ نحوهٔ صحیح شیارزنی پشت جوش.

۵ عیب‌های جوش

۵ـ۱ عیب‌های اصلی جوش ۱۲۳
۵ـ۲ عیوب جوش در جوشکاری تحت حفاظت گاز ۱۳۷
۵ـ۳ عیوب جوش در فرآیند جوشکاری با قوس زیرپودری ۱۴۰
۵ـ۴ ترک‌خوردگی جوش ۱۴۱

عیب‌های جوش ۵

۵ـ۱ عیب‌های اصلی جوش

هر جوشکار باید با معایب اصلی جوشکاری که به‌گسیختگی اتصال جوش‌شده کمک می‌کند، آشنا باشد. این آشنایی در تولید جوشی با کیفیت مقبول کمک کرده و مدت زمان بازرسی جوش را کاهش می‌دهد. این کار اغلب مشکلات موجود در هنگام بازبینی نهایی کار توسط ناظر و یا بازرس جوش را منتفی می‌سازد. مصالحی که به‌یکدیگر جوش می‌شوند (ورق یا لوله) باید از لحاظ وجود معایب سطحی با دقت بازرسی شوند.

در صورتی که روش‌ها و فنون صحیح جوشکاری به‌کار گرفته نشود، ممکن است معایبی در سطح یا داخل فلز جوش به‌وجود آید. بعضی از این معایب رایج عبارتند از:

- ذوب ناقص (Lack of Fusion-LOF)
- نفوذ ناقص (Lack of Penetration-LOP)
- تخلخل (Porosity)
- بریدگی کناره جوش(Undercut)
- ناخالصی‌های حبس شده (Slag Inclusion)
- سر رفتن جوش روی فلز پایه، لوچه (Overlap)
- گرده اضافی در جوش (Excess Weld)
- لکه قوس (Arc Strike)
- انواع ترک‌ها(Cracks)
- عدم پرشدگی شیار(Under fill)
- جرقه و پاشش(Spatter)

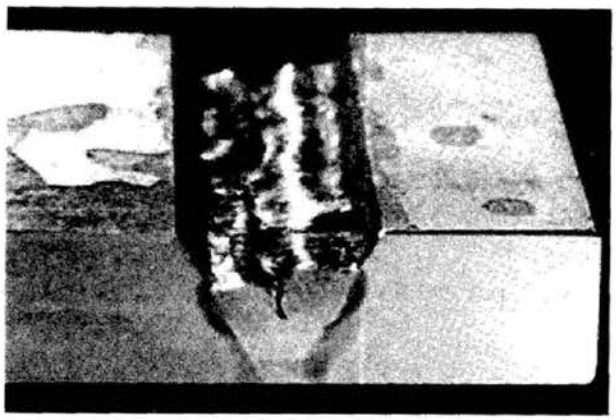
شکل ۵ ـ ۱ کیفیت نامناسب جوش و گسیختگی مقاطع در زلزله بم.

۵ ـ ۱ ـ ۱ ذوب ناقص

ذوب ناقص عبارت است از عدم امتزاج کامل فلز پایه و فلز جوش مجاور آن. این عیب ممکن است در اثر تمیز نبودن سطوحی که باید به‌یکدیگر متصل گردند و پوشیده بودن آنها از گرد و خاک، گل جوش، زنگ‌زدگی یا هر عامل خارجی دیگری اتفاق بیفتد (شکل ۵ ـ ۲).

دلایل امتزاج ناقص به‌شرح زیر است:

- کافی نبودن حرارت ورودی
- انتخاب نادرست قطبیت جریان و گاز محافظ
- طرح اتصال نامناسب
- سطح آلوده ورق
- نوع یا اندازهٔ نامناسب الکترود
- تنظیم نادرست جریان و سرعت جوشکاری



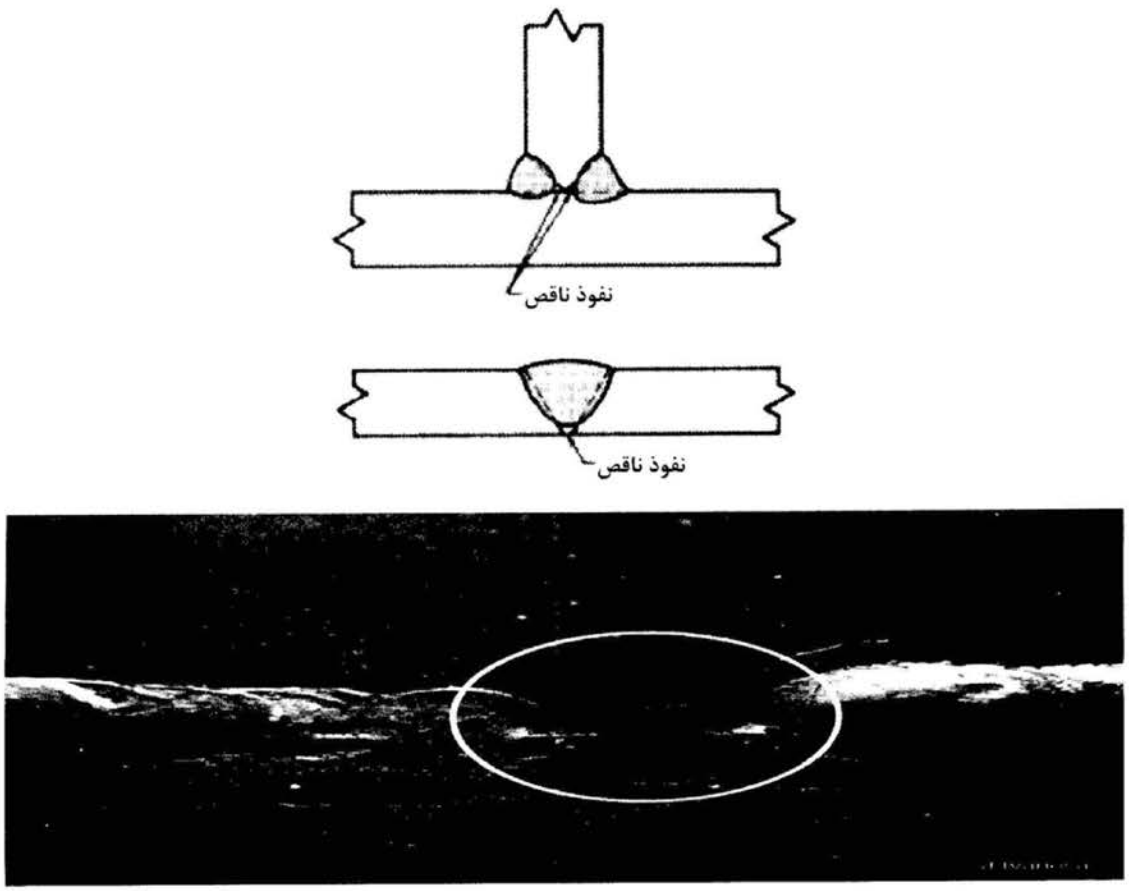
شکل ۵ ـ ۲ ذوب ناقص در پاس‌رویی جوش.

۵ ـ ۱ ـ ۲ نفوذ ناقص

نفوذ ناکافی بدین معنی است که فلز جوش تا عمق کمتری از آنچه در طراحی در نظر گرفته شده است در داخل درز یا شیار نفوذ می‌نماید. نفوذ ناقص تنها هنگامی که در دستورالعمل‌ها چنین مشخص گردیده، مورد قبول است (شکل ۵ ـ ۳).

این عیب که عمدتاً به‌جوش‌های شیاری نفوذی مربوط می‌گردد، تحت شرایط زیر اتفاق می‌افتد:

- ضخامت پیشانی ریشه بیش از نیاز دهانه ریشه است.
- دهانه ریشه خیلی کوچک است.
- زوایه پخی شیار V شکل خیلی کوچک است.
- اندازه الکترود خیلی بزرگ است.
- سرعت حرکت الکترود خیلی زیاد است.
- شدت جریان جوشکاری خیلی پایین است.



شکل ۵ ـ ۳ نفوذ ناقص در جوش.

۵ ـ ۱ ـ ۳ تخلخل

تخلخل در صورت ایجاد حفره‌های خالی یا محبوس شدن گازها در فلز جوش هنگام سرد شدن آن اتفاق می‌افتد. این عیب در صورت استفاده از شدت جریان‌های خیلی زیاد یا طول قوس خیلی بلند ایجاد می‌شود. تخلخل ممکن است به‌طور یکنواخت در طول جوش پراکنده گردد یا ممکن است به‌صورت یک حفره بزرگ در ریشه جوش گوشه یا ریشه جوش شیاری در مجاورت تسمه پشت‌بند متمرکز گردد. حالت اخیر به‌دلیل روش جوشکاری نامناسب و استفاده غیرصحیح از تسمه‌های پشت‌بند اتفاق می‌افتد. وجود رطوبت، وزش باد در سطح جوش و کاربرد الکترود نامرغوب از دلایل ایجاد تخلخل در جوش می‌باشد (شکل ۵ ـ ۴).

(الف) تخلخل ردیف‌شده

(ب) حفرات گازی خطی شده که از طریق ترک به هم متصل شده‌اند

(پ) حفرات لوله‌ای شکل در سطح شکست

شکل ۵ ـ ۴ تخلخل در جوش.

تخلخل سطحی، تأثیر مستقیم و مضری در مقاومت خستگی فلز جوش دارد. حفرات سطحی بسیار خطرناک‌تر از حفراتی با همان اندازه در عمق جوش هستند.

با توجه به‌موارد زیر می‌توان از بروز تخلخل به‌خوبی جلوگیری کرد:

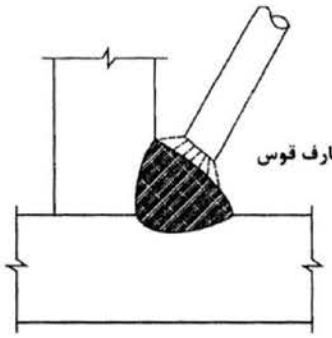
- خشک کردن الکترود در خشک‌کن قبل از مصرف
- تنظیم شدت جریان جوشکاری
- تنظیم طول قوس
- عدم جوشکاری در شرایط جوی نامناسب

۵ ـ ۱ ـ ۴ بریدگی کناره جوش

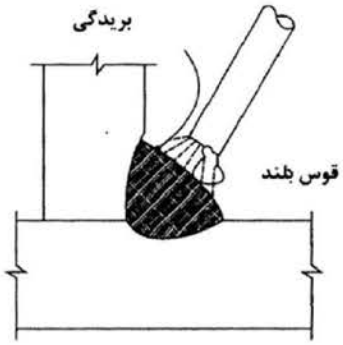
بریدگی یا سوختگی به‌معنای شیار ذوب‌شده‌ای در فلز مبنا می‌باشد که در انتهای ساق جوش قرار گرفته و به‌وسیله فلز جوش پر نشده است. استفاده از جریان قوی یا طول قوس زیاد ممکن است فلز مبنا را بسوزاند یا قسمتی از آن را از جای خود جدا کرده و شیاری به‌جای گذارد. این عیب به‌راحتی با چشم قابل تشخیص است و می‌توان آن را با جوشکاری مجدد ناحیه بریدگی، با الکترودهای نمره پایین‌تر از فلز جوش پُر نمود (شکل ۵ ـ ۵).

شکل ۵ ـ ۵ بریدگی کنار جوش.

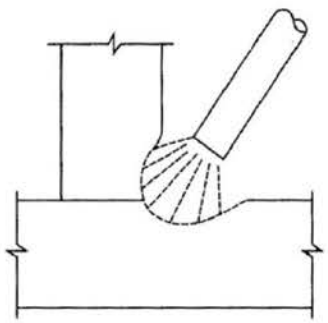
در جوش‌های شیاری، سوختگی کنار جوش ممکن است هم روی سطح و هم در ریشه اتصال ایجاد شود. دلایل بروز سوختگی کنار جوش عبارت است از: تکنیک جوشکاری نامناسب، سرعت جوشکاری زیاد و استفاده از شدت جریان بیش از اندازه و طول قوس بلند (شکل ۵ ـ ۶).



(الف) بر اثر دمیدن قوس قسمتی از فلز مبنا ذوب می‌شود.



(ب) اگر قوس خیلی بلند باشد، فلز جوش مذاب حاصل از انتهای الکترود ممکن است کم بیاید و به‌طور کامل این منطقه ذوب‌شده را پُر نکند، بنابراین در طول ساق فوقانی جوش، بریدگی به‌جا می‌ماند.



(پ) اگر طول قوس به‌اندازهٔ صحیح کوتاه شود، فلزجوش مذاب از انتهای الکترود به‌طور کامل این منطقه ذوب‌شده را پُر خواهد کرد و بریدگی به‌جای نخواهد گذاشت.

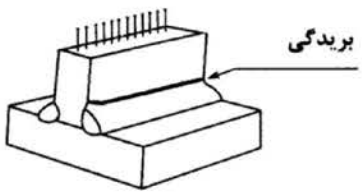
شکل ۵ ـ ۶ اثر طول قوس بر ایجاد بریدگی لبه جوش.

با روش مناسب جوشکاری بریدگی کنار جوش حذف می‌شود و نیازی به‌تعمیر مجدد ندارد.

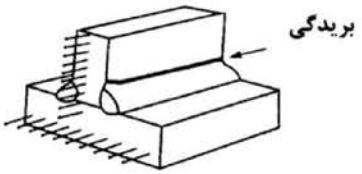
بنابراین چنانچه بریدگی ایجاد شد، این سؤال مطرح می‌شود که آیا این بریدگی مضر است و نیاز به‌تعمیر دارد یا خیر؟

۱ ـ اگر بریدگی باعث تقلیل قابل ملاحظه‌ای در مقطع شود، مجاز نمی‌باشد؛ که این مقدار در جدول حدود پذیرش بازرسی چشمی بیان شده است.

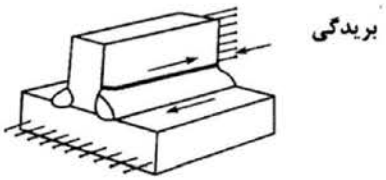
۲ ـ ثانیاً اگر نیروی مورد انتقال، عمود بر محور بریدگی باشد، آنگاه بریدگی به‌عنوان نقطه ضعیفی برای افزایش خستگی به‌حساب می‌آید (شکل ۵ ـ ۷).



(الف) در اینجا نیروی کششی اعمال شده عمود بر بریدگی است و افزاینده خستگی محسوب می‌شود که ممکن است مضر باشد.



(ب) در اینجا خستگی‌های کششی محوری اعمال‌شده موازی با بریدگی هستند و افزاینده خستگی محسوب نمی‌شود و مضر نخواهد بود.

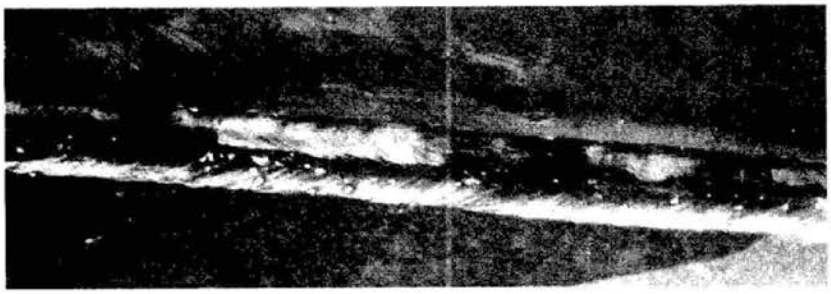


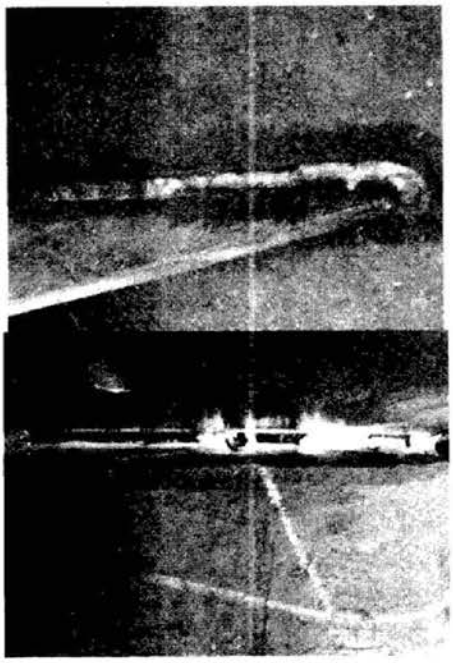
(پ) در اینجا نیروی برشی اعمال‌شده موازی با بریدگی است و افزاینده خستگی به‌حساب نمی‌آید و مضر نمی‌باشد.

شکل ۵ ـ ۷ رابطه جهت بارگذاری نسبت به‌جهت بریدگی لبهٔ جوش.

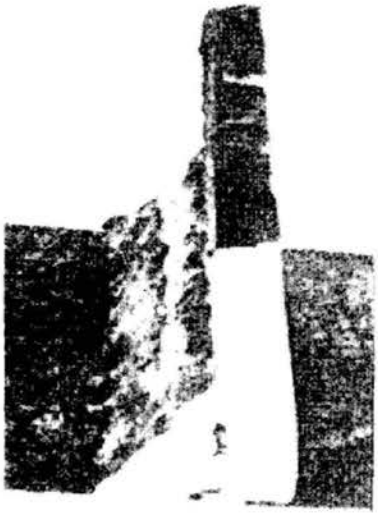
۵ ـ ۱ ـ ۵ حبس سرباره

گل‌جوش در حین عملیات جوشکاری در نتیجهٔ ذوب روکش الکترود تشکیل می‌گردد و مخلوطی از اکسید فلزات و ترکیبات دیگر می‌باشد. به‌دلیل وزن مخصوص کمتر، گل جوشکاری اغلب به‌سطح حوضچه مذاب می‌آید و وقتی جوش سرد شد به‌راحتی توسط چکش جوش کنده می‌شود. سرد شدن سریع جوش ممکن است گل‌جوش را قبل از رسیدن به‌سطح، به‌دام بیندازد. جوش‌های سقفی بیشتر در معرض تداخل گل‌جوش قرار دارند و باید به‌دقت بازرسی شوند. وقتی که برای تأمین اندازه جوش مشخص احتیاج به‌چند بار عبور (pass) الکترود باشد، باید بین هر دو عبور، جوشکار گل‌جوش مرحله قبل را بردارد. عدم دقت در انجام صحیح این عمل یکی از دلایل عمده تداخل گل جوشکاری است. (شکل‌های ۵ ـ ۸ و ۵ ـ ۹).





شکل ۵ ـ ۸ گل‌جوش (سرباره) حبس‌شده.



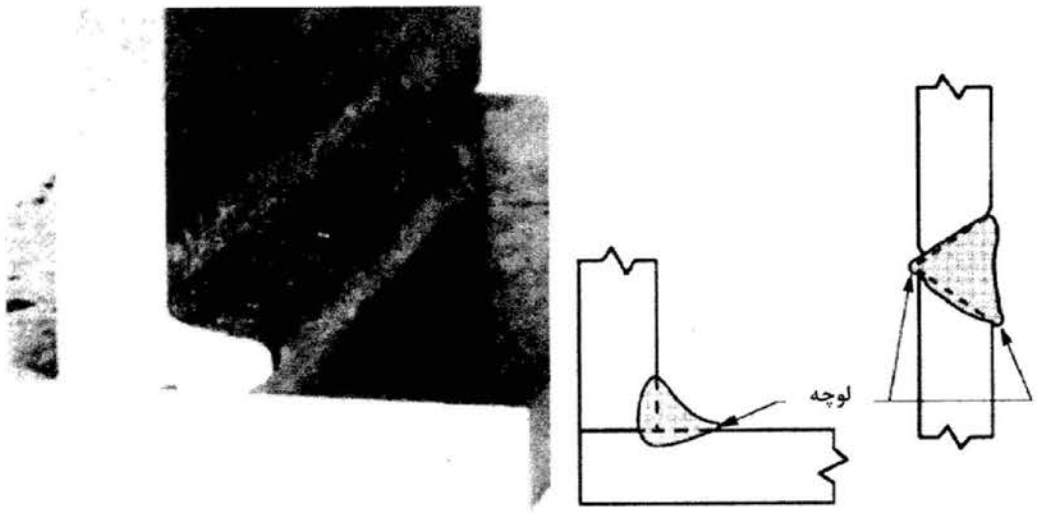
شکل ۵ ـ ۹

۵ ـ ۱ ـ ۶ سر رفتن جوش روی فلز پایه، (لوچه)

یکی دیگر از ناپیوستگی‌های سطحی که مربوط به‌بکارگیری تکنیک نامناسب جوشکاری است، سر رفتن مذاب یا لوچه نام دارد. لوچه، عبارت است از جاری شدن فلز جوش روی فلز پایه، بدون ذوب نمودن کامل آن (شکل ۵ ـ ۱۰).

سر رفتگی به‌عنوان یک ناپیوستگی خطرناک محسوب می‌شود؛ زیرا باعث ایجاد یک شیار تیز روی سطح قطعه می‌گردد. این شیار به‌عنوان محل تمرکز تنش می‌تواند باعث ایجاد و رشد ترک شود.

علت اصلی سر رفتگی، تکنیک نامناسب جوشکاری می‌باشد. زمانی‌که سرعت جوشکاری خیلی آهسته باشد، مقدار فلز پُرکننده فراتر از حد نیاز جهت پُر کردن اتصال بوده و اضافی آن روی فلز پایه جاری می‌گردد؛ به‌دلیل سرد بودن فلز پایه، ذوب کافی در محل جاری شدن ایجاد نمی‌گردد. در بعضی از الکترودها به‌دلیل سیال بودن مذاب، حساسیت به‌این ناپیوستگی بیشتر می‌باشد و از این الکترودها فقط در وضعیت تخت استفاده می‌گردد. سر رفتگی مذاب، به‌دلیل تأثیر نیروی ثقل، اغلب در وضعیت افقی رخ می‌دهد.

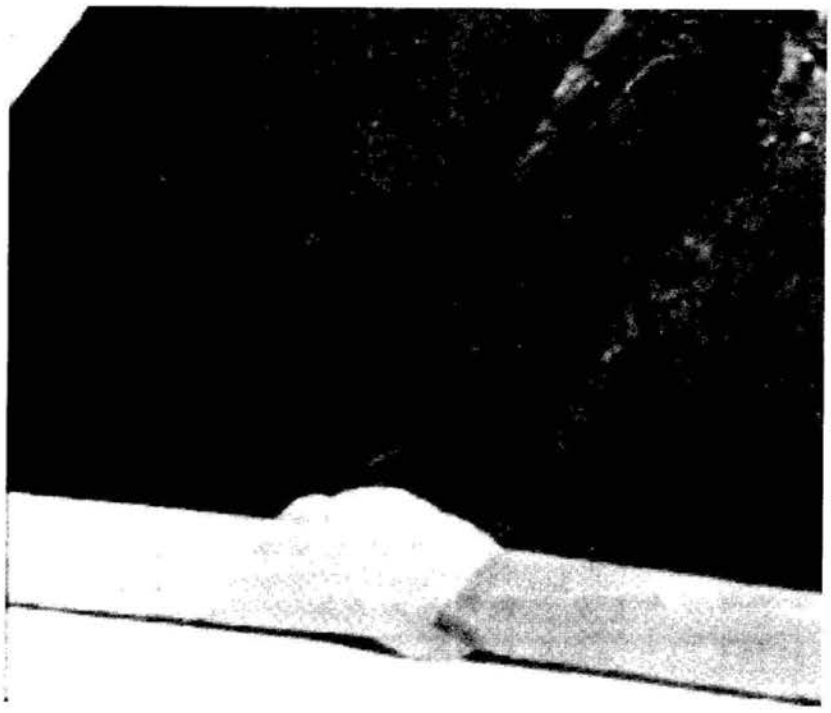


شکل ۵ ـ ۱۰ سر رفتگی در یک جوش گوشه.

۵ ـ ۱ ـ ۷ گرده اضافی در جوش

گرده اضافی، عبارت است از فلز جوش اضافه بر مقدار مورد نیاز جهت پُر کردن اتصال. مشکل اصلی گرده جوش، احتمال ایجاد گوشه‌های تیز در نواحی پنجه جوش می‌باشد. با افزایش ارتفاع گرده جوش، حساسیت بیشتری در این نواحی ایجاد می‌شود. گردهٔ اضافی می‌تواند در پاس ریشه و یا پاس نهایی اتفاق بیفتد (شکل‌های ۵ ـ ۱۱ و ۵ ـ ۱۲).

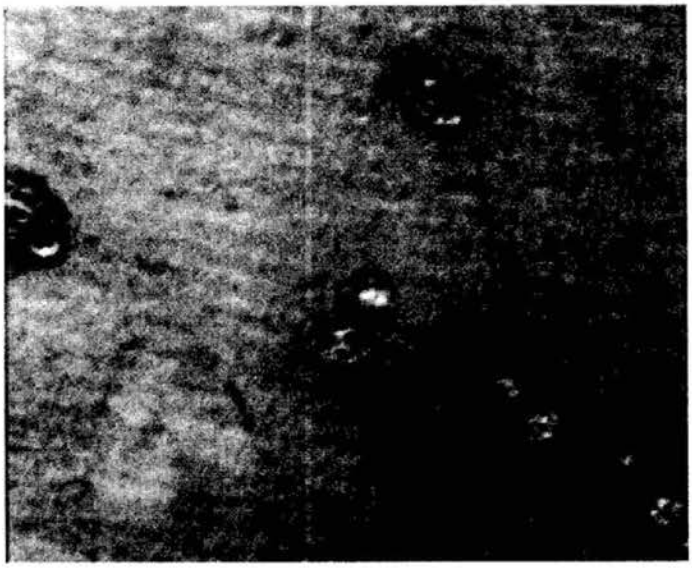
شکل ۵ ـ ۱۱ گردهٔ اضافی جوش در پاس ریشهٔ جوش شیاری.



شکل ۵ ـ ۱۲ گرده اضافی جوش در پاس نهایی.

۵ ـ ۱ ـ ۸ لکه قوس

لکه قوس در اثر روشن کردن قوس روی سطح فلز پایه، خارج از درز اتصال به‌وجود می‌آید که در اثر آن، مناطق کوچکی روی سطح فلز پایه به‌طور سطحی ذوب شده و سریعاً سرد می‌گردد. لکه قوس قابل پذیرش نیست و وجود آن باعث ترک در فلز پایه می‌گردد (شکل ۵ ـ ۱۳).



شکل ۵ ـ ۱۳ لکه قوس

۵ ـ ۱ ـ ۹ ترک‌ها

ترک‌ها، شکستگی‌های فلز جوش می‌باشند که در اثر تنش‌های داخلی در امتداد خط جوش و یا عمود بر آن به‌وجود می‌آیند. ترک‌ها همچنین ممکن است از فلز جوش به‌فلز مبنا امتداد پیدا کنند و یا کاملاً در فلز مبنا و در مجاورت خط جوش باشند. ترک‌ها زیان‌بارترین معایب جوش هستند.

ترک‌خوردگی فلزات به‌سه ردهٔ اصلی تقسیم می‌شوند: ترک‌خوردگی گرم، ترک‌خوردگی سرد و ترک‌های مویی، که انواع ترک را در شکل ۵ ـ ۱۴ مشاهده می‌کنید.

- ***ترک‌خوردگی گرم:*** در درجه حرارت زیاد و در خلال سردشدن ناگهانی جوش پس از آنکه فلز جوش رسوب و شروع به‌انجماد نماید، اتفاق می‌افتد. اکثر ترک‌های جوشکاری، ترک‌خوردگی گرم هستند.
- ***ترک‌خوردگی سرد:*** به‌ترک‌هایی اطلاق می‌شود که در دمای معمولی اتاق یا درجه حرارتی نزدیک به‌آن اتفاق می‌افتند. این ترک‌ها ممکن است ساعت‌ها و یا روزها پس از سردشدن جوش حادث شوند. وقوع ترک‌خوردگی سرد در فولاد در مقایسه با سایر فلزات، بیشتر است.
- ***ترک‌های مویی:*** ممکن است از نوع ترک‌های گرم یا سرد باشند. این ترک‌ها به‌قدری ریز هستند که با چشم غیرمسلح قابل دیدن نمی‌باشند و برای اینکه قابل رؤیت باشند، حداقل به ۱۰ مرتبه بزرگ‌نمایی نیاز دارند، این ترک‌ها معمولاً عمر مفید سازه‌های معمولی (تحت اثر بارهای ایستا) را کاهش نمی‌دهند.

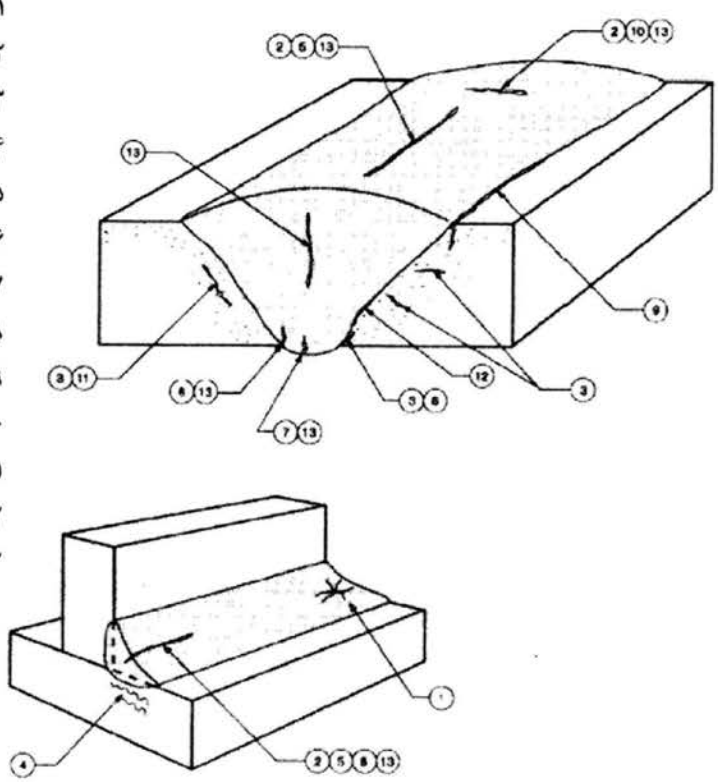
با توجه به‌اهمیت ترک، بحث کاملی در بخش ۵ ـ ۴ ارایه شده است که توصیه می‌شود مورد مطالعه قرار گیرد.

- لکه قوس: (لکه‌هایی که از برخورد تصادفی الکترود با سطح کار به‌وجود می‌آید، حالتی آبله‌گونه روی سطح کار ایجاد می‌کند) ممکن است ترک‌های ریزی ایجاد کنند.
- اگر جوشکاری از لبه ورق شروع شده و روند آن به‌سمت داخل ورق باشد، یک ترک در طول لبه جوش در قسمت پنجه اتفاق خواهد افتاد. ترک‌ها ممکن است در نتیجه پدیده بریدگی جوش نیز اتفاق بیفتند.

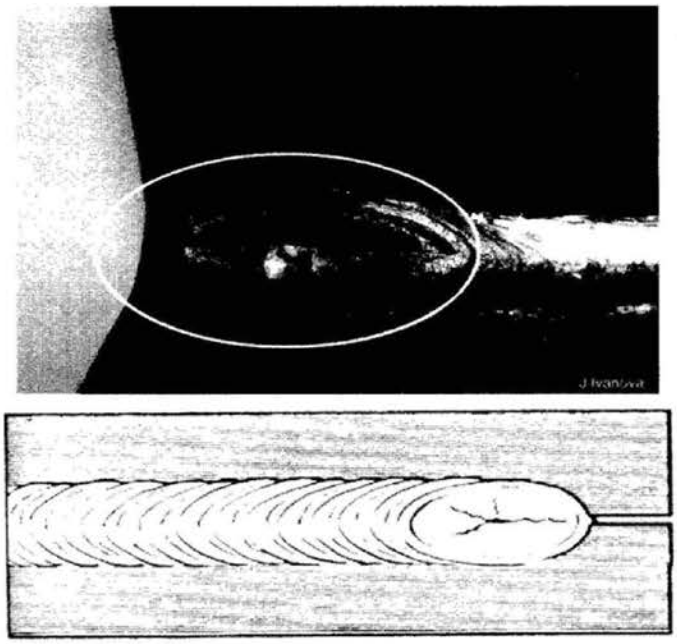
استفاده از الکترودهای کم هیدروژن همراه با پیش‌گرمایش مناسب، از ایجاد ترک‌های «سرد» پیشگیری می‌کند. به‌طور کلی علل عمده ایجاد ترک در جوش و نواحی اطراف آن عبارتند از:

۱. نفوذ هیدروژن
۲. نسبت عمق به‌عرض زیاد
۳. تقعر سطح جوش
۴. عدم پیش‌گرمایش مناسب درز جوش
۵. وجود چاله انتهای جوش پرنشده
۶. وجود رطوبت در الکترود یا درز جوش
۷. طرح نامناسب درز جوش

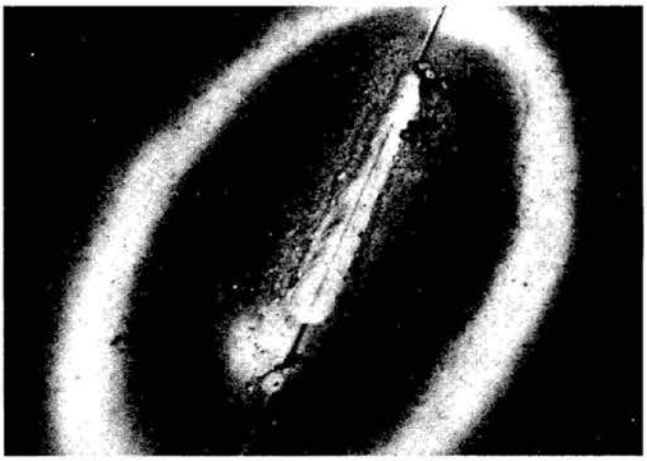
۱ ـ ترک چالهٔ جوشی
۲ ـ ترک سطحی
۳ ـ ترک در ناحیهٔ تفتیده
۴ ـ پارگی لایه‌ای
۵ ـ ترک طولی
۶ ـ ترک در پاس ریشه
۷ ـ ترک در سطح پاس ریشه
۸ ـ ترک گلویی جوش
۹ ـ ترک پنجه
۱۰ ـ ترک عرضی
۱۱ ـ ترک زیر سطح جوش
۱۲ ـ ترک فصل مشترک جوش
۱۳ ـ ترک فلز جوش

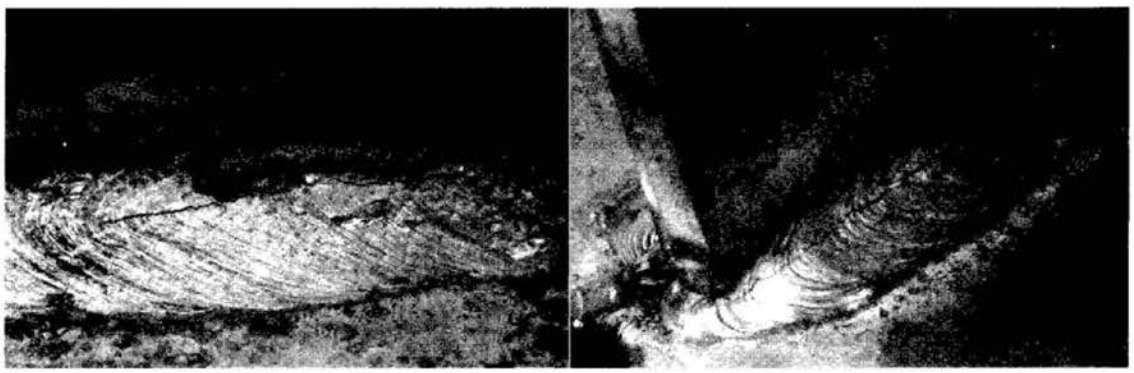


شکل ۵ ـ ۱۴ انواع ترک در جوش.

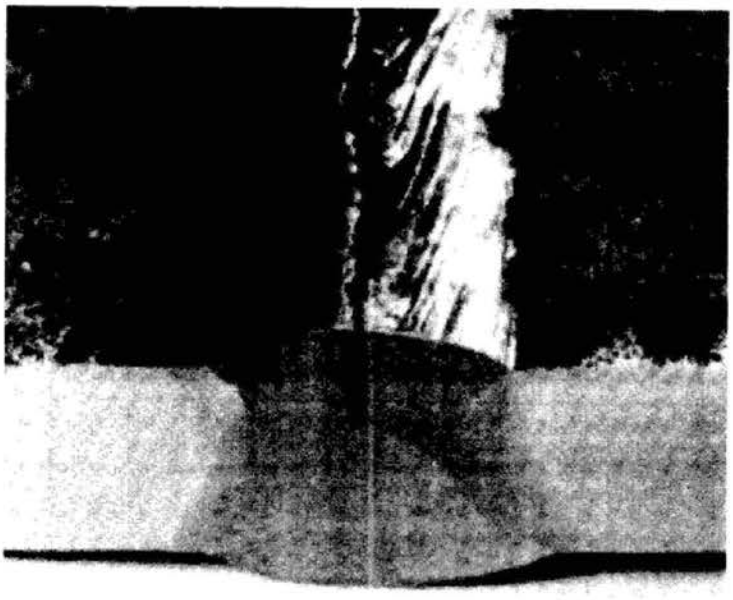


(الف) ترک چالهٔ جوش

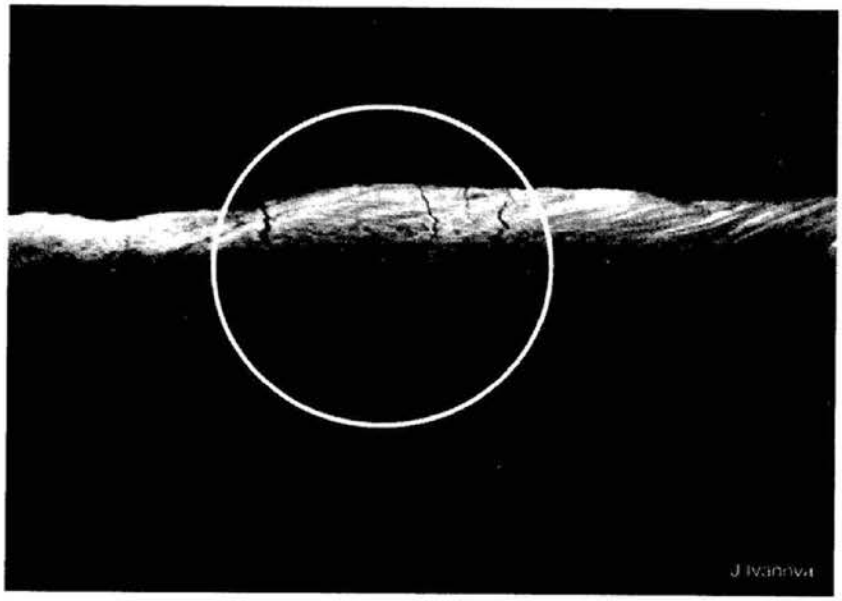




(ب) ترک طولی در جوش



(پ) ترک طولی در خطر مرکزی یک جوش شیاری

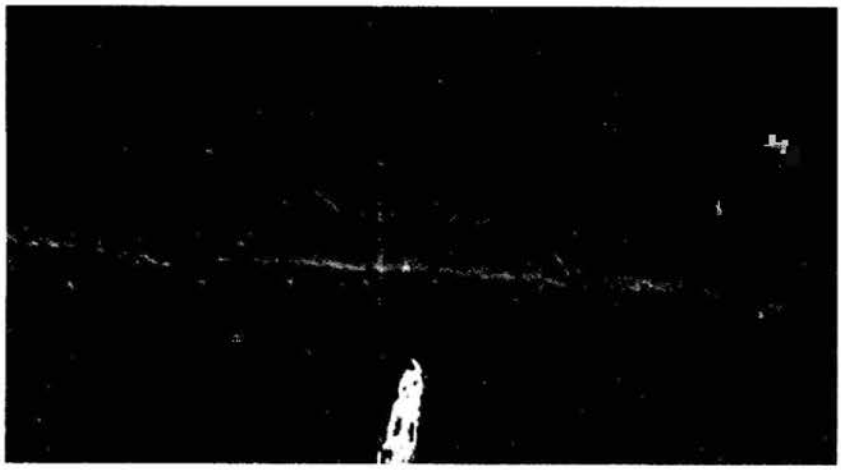


(ت) ترک عرضی در جوش

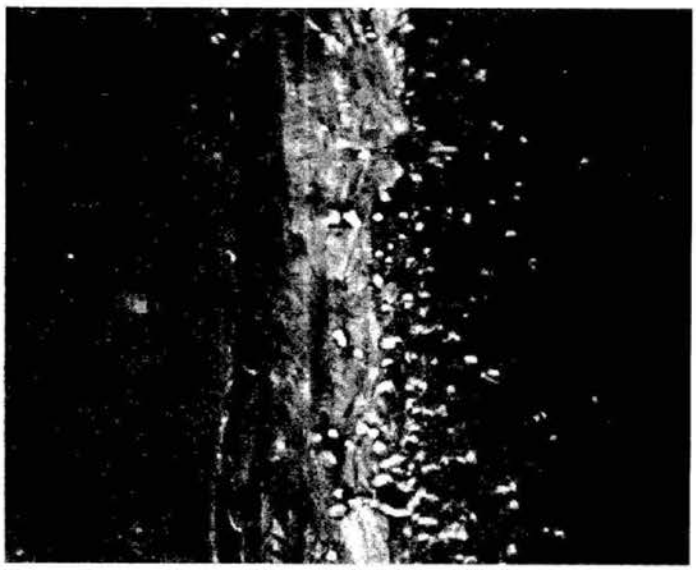
شکل ۵ ـ ۱۵

۵ـ۱ـ۱۰ عدم پُرشدگی شیار

این عیب سطحی در اثر کمبود رسوب فلز جوش در مقطع جوش شیاری رخ می‌دهد؛ به‌عبارتی عدم پُرشدگی شیار، زمانی ایجاد می‌شود که فلز پُرکننده رسوب داده شده جهت پُر کردن شیار، کافی نباشد (شکل ۵ ـ ۱۶).



شکل ۵ ـ ۱۶ عدم پُرشدگی شیار.



شکل ۵ ـ ۱۷ نمونه‌ای از پاشش جوش.

۵ـ۱ـ۱۱ جرقه و پاشش

جرقه و پاشش عبارت است از ذرات فلزی که در حین جوشکاری ذوبی به‌اطراف پرتاب شده و به‌عنوان بخشی از فلز جوش محسوب نمی‌شوند (شکل ۵ ـ ۱۷).

جرقه و پاشش، اغلب از اهمیت و حساسیت کمی در بین معایب جوشکاری برخوردار است، ولی به‌هر حال در صورتی‌که پاشش به‌صورت یک قطره بزرگ باشد، گرمای کافی جهت ایجاد حساسیت به‌ترک را ایجاد خواهد کرد.

۵ ـ ۲ عیوب جوش در جوشکاری تحت حفاظت گاز

۵ ـ ۲ ـ ۱ ترک

عواملی که می‌تواند موجب بروز ترک در فلز جوش شود عبارتند از:

- بالا بودن نسبت عمق به‌عرض مقطع جوش که با افزایش ولتاژ یا کاهش شدت جریان می‌توان گرده جوش را پهن‌تر و کم عمق‌تر نمود.
- مقطع جوش خیلی کوچک باشد، به‌ویژه در مورد جوش گوشه یا پاس ریشه در جوش شیاری در ورق‌های ضخیم، که با کاهش سرعت جوشکاری می‌توان جوش بزرگتری ایجاد کرد.
- سرد شدن سریع چاله انتهایی جوش، که با کاهش سرعت سرد شدن و کنترل جهت حرکت انبر در انتهای نوار جوش می‌توان از ایجاد چالهٔ انتهایی جلوگیری کرد.

۵ ـ ۲ ـ ۲ ذرات محبوس‌شده (آخال)

ذرات محبوس شده (آخال)[1] در جوش می‌تواند به‌یک یا چند دلیل زیر به‌وجود آید:

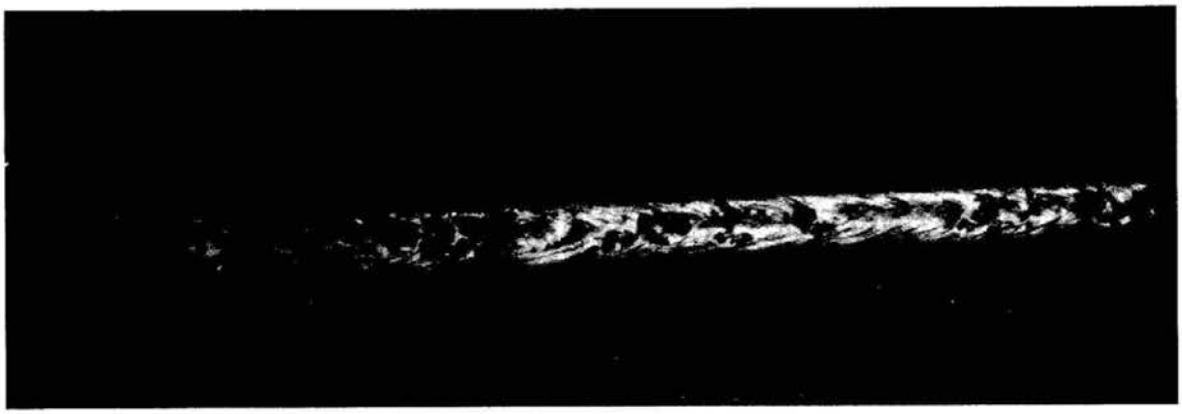
- استفاده از جوش چند پاسی و یا اتصال کوتاه قوس ضمن عملیات جوشکاری که با تمیز کردن هرگونه ناخالصی بر روی جوش قبل از انجام پاس بعدی می‌توان این عیب را تا حدودی کاهش داد.
- سرعت پیشرفت بالا نیز می‌تواند باعث محبوس شدن ذرات به‌صورت لایه‌ای در جوش شود که با انتخاب سرعت پیشرفت کمتر و سیم جوشی با مقدار مواد اکسیژن‌زدای بیشتر و افزایش ولتاژ، می‌توان میزان ذرات محبوس‌شده را تقلیل داد.
- در جریان‌های بالا، در حالت انتقال به‌صورت اسپری، ضرورتی برای رفع سرباره وجود ندارد. اما در انتقال اتصال کوتاه در جریان‌های کم بهتر است تجمع سرباره توسط برس سیمی از بین رود تا از تشکیل آخال ناشی از سرباره جلوگیری شود.

۵ ـ ۲ ـ ۳ خلل و فرج (مک)

در زمان سردشدن، حلالیت گازها در فلز جوش کاهش می‌یابد. هنگامی که فلز جوش در حال منجمد شدن است، گازهای محلول از حوضچه خارج می‌شوند. اما گازهایی که نمی‌توانند خارج شوند و در فلز جوش باقی می‌مانند موجب جوانه‌زنی و تشکیل حفره‌های گازی می‌شوند. اگر سرعت سردشدن بالا باشد حفرات داخل فلز منجمدشده حبس می‌شوند (شکل ۵ ـ ۱۸). گازهایی که معمولاً موجب تشکیل تخلخل می‌شوند، نیتروژن، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن می‌باشند. در این میان نیتروژن از هوای اطراف، هیدروژن از طریق اکسیدهای سطحی (زنگ) و ترکیبات هیدروژن‌دار مانند رنگ، روغن و گریس و دی‌اکسیدکربن نیز به‌دلیل واکنش کربن با اکسیژن در فولاد می‌تواند تولید تخلخل در جوش نماید.

---

1. Inclusion



شکل ۵ ـ ۱۸ تخلخل در جوش تحت حفاظت گاز.

از دیگر عوامل تشکیل خلل و فرج می‌توان به‌موارد زیر اشاره کرد:

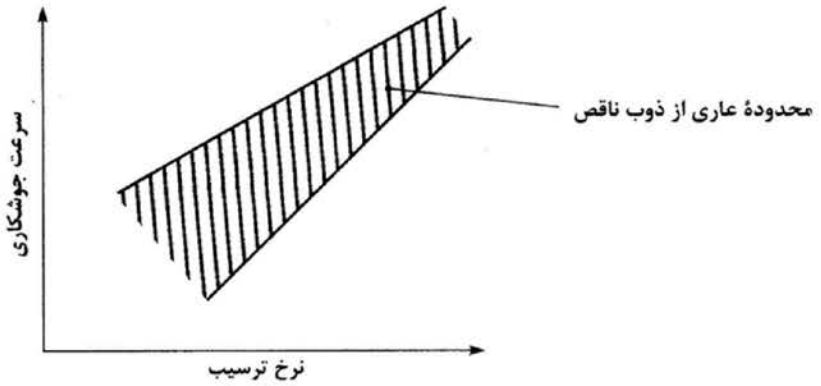
- کافی نبودن منطقه تحت پوشش گاز محافظ؛ که با افزایش نرخ عبور گاز یا کاهش آن در صورت وقوع تلاطم، تمیز کردن جرقه از اطراف دهانه نازل، کاهش دادن وزش و جریان هوا و کاهش فاصله نازل تا سطح کار می‌توان این عیب را رفع کرد.
- وجود ناخالصی‌ها در الکترود
- کثیفی سطح کار؛ تمیز کردن هرگونه آلودگی (روغن، رنگ، رطوبت و...) برای جلوگیری از این عیب ضروری است.
- ولتاژ زیاد قوس و فاصله زیاد نازل تا سطح کار؛ که می‌تواند سبب ورود اکسیژن و ازت هوا به‌حوضچه جوش مذاب شود. در این مورد کاهش ولتاژ و کاهش فاصله نازل تا سطح کار کمک به‌کاهش این عیب می‌کند.

۵ ـ ۲ ـ ۴ ذوب ناقص

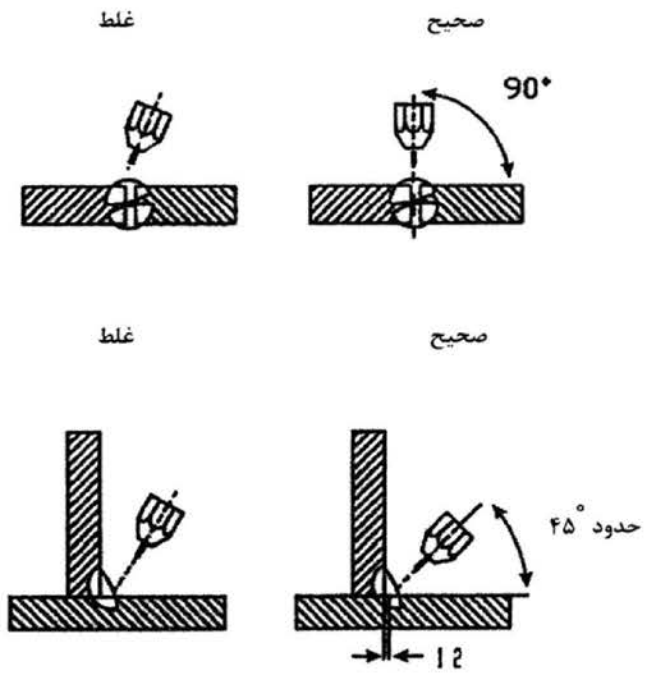
ذوب ناقص در بسیاری از مواقع به‌خصوص در جوشکاری قوس کوتاه با جریان کم در قطعات ضخیم و در وضعیت بالای سر و افقی ایجاد می‌شود. همچنین در جوشکاری در وضعیت تخت، زمانی‌که فلز جوش جلوتر از قوس حرکت می‌کند احتمال وجود این عیب زیاد است که با تغییر زاویه انبر و مستقیم نگهداشتن آن نسبت به‌حوضچه می‌توان از بروز این نقص جلوگیری کرد.

ولتاژ کم، زیاد بودن طول مؤثر الکترود که موجب حرارت ورودی نامناسب و غیرمتناسب با مقدار مواد پُرکننده می‌شود، عدم تمیزی، شکل هندسی یا زاویه نامناسب اتصال و بزرگی حوضچهٔ جوش از عوامل به‌وجود آورنده این عیب می‌باشد. برای جبران و کاهش این علل به‌ترتیب باید سطح مسیر اتصال، از هرگونه پوسته و لایه زنگ‌زده و آلودگی‌های دیگر تمیز شود. نرخ تغذیه سیم جوش و ولتاژ باید افزایش یابد یا سرعت جوشکاری کاهش پیدا کند (شکل ۵ ـ ۱۹).

طرز قرارگیری انبر جوشکاری نسبت به حوضچهٔ جوش نیز از عوامل تأثیرگذار بر ذوب ناقص می‌باشد (شکل ۵ ـ ۲۰).



شکل ۵ ـ ۱۹ اثر سرعت جوشکاری و احتمال بروز ذوب ناقص.



شکل ۵ ـ ۲۰ تأثیر زاویه صحیح انبر نسبت به قطعه‌کار.

۵ ـ ۲ ـ ۵ نفوذ ناقص

نفوذ ناقص جوش، دلایلی مشابه با ذوب ناقص دارد. بدین ترتیب در این جا هم عواملی چون زاویه انبر تأثیرگذار است. حداکثر نفوذ، زمانی حاصل می‌شود که انبر به‌صورت عمود بر سطح قطعه کار نگه داشته شود. از آنجایی که میزان جریان به‌عنوان مهمترین تعیین‌کننده نفوذ است، پارامترهای تأثیرگذار بر جریان نیز بر الگوی نفوذ مؤثر می‌باشند.

۵ـ۲ـ۶ سوختگی کناره جوش

با کاهش سرعت جوشکاری می‌توان از به‌وجود آمدن این عیب جلوگیری کرد.

همچنین کاهش سرعت تغذیه سیم جوش و تغییر زاویه انبر نیز در جلوگیری از به‌وجود آمدن این نقص مؤثر می‌باشند.

۵ـ۲ـ۷ پاشش

پاشش عاملی است که می‌تواند موجب تشکیل حفره، نفوذ ناکافی و اختلال در سیکل‌های جوشکاری شود. پاشش ذرات بزرگ که معمولاً بر روی قطعه کار شکل می‌گیرد، به‌دلیل کم بودن شدت جریان نسبت به‌قطر سیم جوش یا طول قوس بسیار زیاد (ولتاژ بسیار بالا) رخ می‌دهد که موجب می‌شود قطرات در یک محور مستقیم منتقل نشوند.

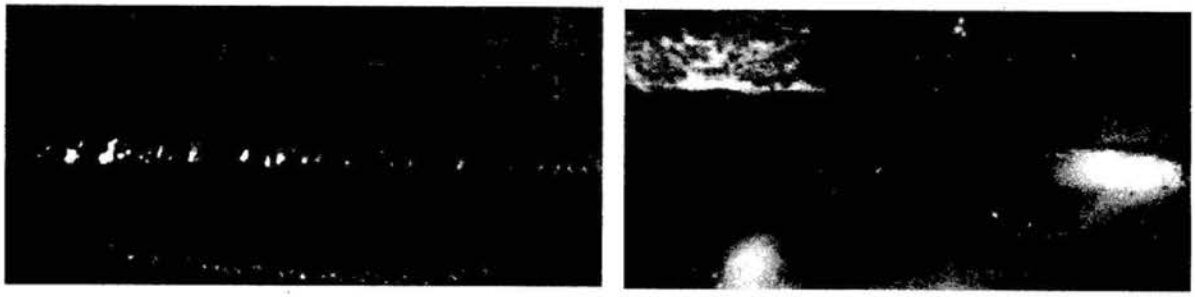
۵ـ۳ عیوب جوش در فرآیند جوشکاری با قوس زیرپودری

۵ـ۳ـ۱ تخلخل

فلز رسوب کرده در فرآیند زیرپودری معمولاً تمیز و بدون تخلخل‌های مضر است زیرا بستر سرباره مذاب حفاظت مناسبی از حوضچه مذاب فراهم می‌کند. تنها در سطح منطقه جوش یا لایه زیرین سطوح صاف ممکن است تخلخل ایجاد شود (شکل ۵ ـ ۲۱). عوامل متعددی ممکن است باعث ایجاد تخلخل شوند که عبارتند از:

۱ ـ وجود آلودگی در اتصال
۲ ـ وجود آلودگی در سیم جوش
۳ ـ کافی نبودن میزان پوشش‌دهی پودر
۴ ـ وجود آلودگی در پودر
۵ ـ گیر افتادن پودر در زیر اتصال
۶ ـ جدایی ذرات تشکیل‌دهندهٔ فلز جوش
۷ ـ سرعت حرکت زیاد
۸ ـ باقی ماندن سرباره خال جوش‌های قبلی که با الکترود روکش‌دار انجام شده است.

مانند دیگر روش‌های جوشکاری، در این روش نیز فلز پایه و الکترود باید خشک و تمیز باشد. سرعت زیاد حرکت و انجماد سریع جوش باعث می‌شود زمان کافی برای خروج گاز از فلز مذاب وجود نداشته باشد. در این موارد سرعت حرکت را می‌توان کاهش داد ولی راه‌حل‌های دیگری برای جلوگیری از هزینه اضافی نیز باید به‌کار گرفته شود.



شکل ۵ ـ ۲۱ تخلخل در جوش زیرپودری.

۵ ـ ۳ ـ ۲ ترک

ترک در فلز جوش یا قسمت تفتیده[2] ممکن است ناشی از نفوذ هیدروژن در فلز جوش باشد. هیدروژن ممکن است از منابعی نظیر پودر، چربی‌ها و آلودگی‌های روی سیم‌جوش یا فلز پایه، و هیدروژن موجود در سیم‌جوش یا فلز پایه به‌حوضچه فلز مذاب وارد شود. ترک به‌علت نفوذ هیدروژن در فلز جوش معمولاً در فولادهای کم آلیاژ رخ می‌دهد و با افزایش تنش تسلیم و تنش کششی مقدار آن بیشتر می‌شود. این نوع ترک گاهی در فولادهای کربنی نیز رخ می‌دهد. همیشه مقداری هیدروژن نفوذ کرده در فلز جوش وجود دارد اما باید مقدار مجاز نفوذ آن محدود و کم باشد. با افزایش استحکام کششی، مقدار هیدروژن مجاز در فلز جوش رسوب کرده، کاهش می‌یابد. معمولاً این ترک‌ها چندین ساعت (حدود ۷۲ ساعت) بعد از سردشدن قطعه تا دمای محیط رخ می‌دهد.

برای کم نگه داشتن مقدار هیدروژن موجود در فلز جوش می‌توان کارهای زیر را انجام داد:

۱ ـ حذف رطوبت از پودر با پختن آن در کوره (طبق توصیه‌های سازنده)

۲ ـ حذف روغن، چربی یا کثیفی از روی سیم‌جوش و فلز پایه

۳ ـ افزایش دمای کار برای خارج شدن هیدروژن در حین انجام عملیات جوشکاری. این کار را می‌توان با ادامه «پیش‌گرمایش» تا انتهای جوش یا «پس‌گرمایش» اتصال چند ساعت قبل از سرد شدن آن تا دمای محیط انجام داد.

۵ ـ ۴ ترک‌خوردگی جوش

۵ ـ ۴ ـ ۱ ترک جوش

وقوع ترک در جوش هیچ‌وقت نباید بی‌اهمیت تلقی شده و مورد چشم‌پوشی واقع شود. با استفاده از طرح خوب و انتخاب دستورالعمل جوشکاری مناسب، از این پدیده می‌توان جلوگیری نمود. انواع ترک‌های محتمل در جوشکاری عبارتند از:

۱ ـ وقوع ترک در نوار جوش (به‌صورت ظاهری یا داخلی)؛

۲ ـ ترک در ناحیه‌ای از فلز پایه که تحت تأثیر دمای جوش، تغییر حالت متالورژیک می‌دهد و به‌آن ناحیه تفتیده[3] می‌گویند (ترک در زیر نوار جوش)؛

۳ ـ ترک در جوش در هنگام بهره‌برداری (ترک مقاومتی).

---

2. *HAZ*

3. *Heat Affected Zone (HAZ)*

عواملی که باعث وقوع ترک در نوار جوش می‌شوند (به‌صورت ظاهری یا داخلی)

۱ ـ گیرداری درز که باعث به‌وجود آمدن تنش‌های انقباضی زیاد در جوش می‌شود.

۲ ـ هندسه مقطع نوار جوش. با سرد شدن، جوش تمایل به‌انقباض پیدا می‌کند. جوش با سطح محدب در گلوی خود مصالح کافی برای مقابله با کشش‌های دو محوری را دارد. لیکن در نوار جوش با سطح مقعر، تنش‌های کششی عرضی قابل توجهی به‌وجود می‌آید که می‌تواند ترک طولی در نوار جوش به‌وجود آورد. در نوار جوش با نفوذ عمیق که عمق آن بیش از عرضش باشد، در صورت گیرداری درز، وقوع ترک‌های داخلی محتمل می‌باشد. در صورت زیاد بودن میزان سولفور یا فسفر در فلز پایه، وقوع هر دو ترک فوق به‌مقدار زیادی تشدید می‌گردد.

۳ ـ میزان کربن و آلیاژها در فلز پایه. هر چه میزان کربن و آلیاژ در فلز پایه زیاد باشد، شکل‌پذیری فلز جوش کاهش‌یافته و احتمال وقوع ترک بیشتر می‌شود.

۴ ـ وارد شدن حباب‌های هیدروژن از روکش الکترود در نوار جوش.

۵ ـ وجود رطوبت در سطح شیار جوش در فلز پایه و آلودگی سطح مذکور.

۶ ـ سرد شدن سریع جوش که موارد ۳ و ۴ را افزایش می‌دهد.

عواملی که باعث وقوع ترک در ناحیه تفتیده در فلز پایه می‌شوند (ترک در زیر نوار جوش)

۱ ـ میزان کربن یا آلیاژ زیاد که باعث افزایش سختی‌پذیری و کاهش شکل‌پذیری ناحیه تفتیده می‌شوند. (در فولادی که سختی‌پذیری ندارد، امکان وقوع ترک زیر نوار جوش وجود ندارد).

۲ ـ تردی هیدروژنی ناحیه ذوب‌شده به‌علت وارد شدن هیدروژن از فلز جوش.

۳ ـ سرعت سرد شدن که به‌هر یک از دو عامل ۱ و ۲ مؤثر است.

عواملی که باعث وقوع ترک در جوش در هنگام بهره‌برداری می‌شوند (ترک مقاومتی)

تحت شرایط بهره‌برداری، جوش ترک نمی‌خورد، لیکن در صورتی که به‌خوبی طرح نشده باشد، وقوع ترک مقاومتی در آن امکان‌پذیر است. وقوع دونوع خرابی در جوش در هنگام بهره‌برداری محتمل است و باید توسط طراح مدنظر قرار گیرد:

۱ ـ تردی ناشی از زخم که باعث شکست جوش یا فلز پایه در ناحیه تفتیده، تحت بارهای ضربه‌ای بزرگ در درجه حرارت پایین می‌گردد.

۲ ـ ترک خستگی به‌علت اثر زخم ناشی از هندسه نامناسب درز. این نوع شکست تحت بارهای متناوب با تکرار و دامنه بزرگ به‌وجود می‌آید.

عواملی که باید کنترل گردند

۱. ***هندسه نوار:*** سطح نوار جوش باید قدری محدب بوده و دارای نسبت عرض به‌عمق مناسب باشد. این مسئله باید در جوش‌های یک پاسه و جوش ریشه در جوش‌های چند پاسه و یا حتی پاس‌های میانی مورد توجه قرار گیرد.

۲. ***گیرداری درز:*** در هنگام طراحی و اجرا باید گیرداری درز را به‌حداقل رساند.

۳. ***میزان کربن و آلیاژها:*** در هنگام انتخاب نوع فولاد باید دقت گردد که موازنه‌ای بین هزینه فولاد و هزینه جوش برقرار گردد. انتخاب فولادهای پُرمقاومت هر چند که باعث کاهش هزینه فولاد می‌گردد، لیکن به‌علت وجود میزان کربن زیاد و یا آلیاژها، و به‌خصوص عناصری مثل سولفور یا فسفر، که تأثیر منفی بر کیفیت جوش دارند، افزایش قابل توجهی در هزینه جوشکاری وجود خواهد داشت. این دو هزینه باید قابل موازنه باشند.

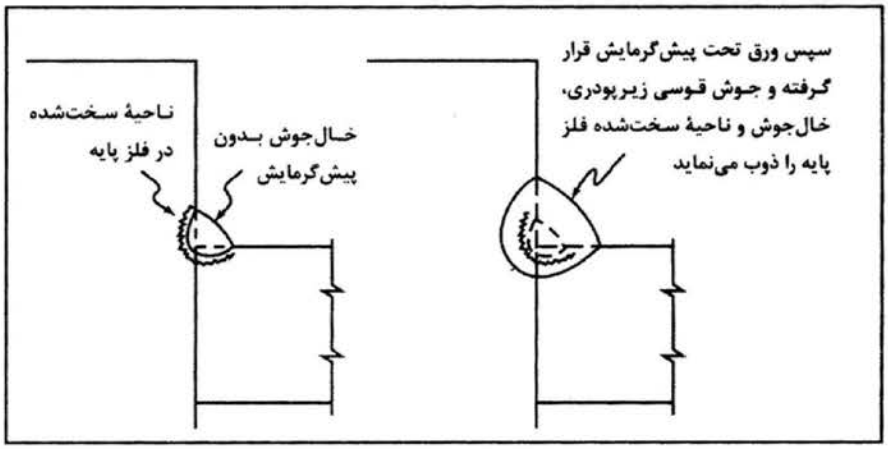
۴. ***وارد شدن هیدروژن:*** برای جلوگیری از ورود حباب‌های هیدروژن باید از الکترودهای کم‌هیدروژن استفاده گردد.

۵. ***حرارت ورودی:*** باید کل حرارت ورودی کنترل گردد. این حرارت شامل پیش‌گرمایش، حرارت القایی به‌واسطه جوشکاری، گرمایش در حد فاصل پاس‌های مختلف و پس‌گرمایش به‌منظور جلوگیری از سرد شدن سریع می‌باشد. حرارت القایی کمتر، باعث کاهش تنش‌های انقباضی و کاهش سرعت سرد شدن (که از تردی زیاد ناحیه تفتیده می‌کاهد) می‌گردد. این دو از عوامل مهم بروز ترک در جوش می‌باشند.

۵ ـ ۴ ـ ۲ ترک در خال جوش

آیین‌نامه AWS مقرر می‌دارد هر خال‌جوشی که بعداً جزیی از جوش اصلی می‌شود، باید با همان کیفیت جوش اصلی (شامل هر نوع پیش‌گرمایش) اجرا گردد (شکل ۵ ـ ۲۲).

در صورتی که خال‌جوش هنگام جوش اصلی کاملاً ذوب گردد، لزومی به‌منظور کردن تدابیر خاص در هنگام خال‌جوش نیست، مگر اینکه ضخامت ورق‌ها زیاد بوده و احتمالا ترک‌خوردگی در آن وجود داشته باشد (شکل ۵ ـ ۲۲). در صورت شکست خال‌جوش، همان تدابیری که برای حفظ سلامت جوش اصلی در قبل گفته شد، باید در هنگام خال‌جوش رعایت گردد (از جمله پیش‌گرمایش و شکل نوار جوش). توصیه می‌گردد که برای خال‌جوش ورق‌های ضخیم‌تر از ۲۵ میلی‌متر، از الکترودهای کم‌هیدروژن استفاده گردد.



شکل ۵ ـ ۲۲ عدم منظور کردن تدابیر لازم، می‌تواند باعث ایجاد ترک در خال‌جوش گردد.

۵ ـ ۴ ـ ۳ ورق‌های نازک

جوش‌هایی که ورق‌هایی نازک را متصل می‌کنند، به‌ندرت تمایل به‌ترک از خود نشان می‌دهند. حرارتی که در هنگام جوشکاری به‌ورق انتقال داده می‌شود و جرم کم ورق، سرعت سرد شدن را کاهش می‌دهد. این موضوع به‌علاوه تنش‌های داخلی کاهش‌یافته ناشی از نسبت مناسب بعد گلو به‌ضخامت ورق، و انعطاف‌پذیری خوب ورق نازک در مقابل انقباض، از شدت تأثیر عوامل ایجاد ترک می‌کاهد. در جوشکاری ورق‌های نازک، ترک‌خوردگی تقریباً هیچ‌وقت مشکل مهمی نمی‌باشد، مگر اینکه میزان کربن و آلیاژ فولاد به‌طور غیرمعمولی زیاد باشد.

۵ ـ ۴ ـ ۴ ورق‌های ضخیم

در کارخانه‌های نورد فولاد، تمام ورق‌ها و نیمرخ‌های فولادی، بعد از نورد در درجه حرارت سرخ، با سرعت نسبتاً کمی سرد می‌شوند. در ورق‌های ضخیم به‌علت جرم بیشتر، این سرعت به‌مراتب کمتر است. برای یک میزان معلوم کربن و آلیاژ، سرعت سرد شدن کمتر، باعث کاهش مقاومت می‌گردد.

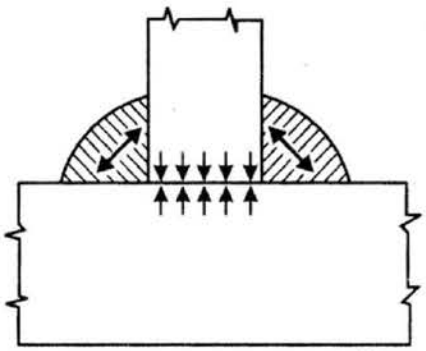
برای ضخامت‌های معمول، کارخانه‌های نورد مشکلی برای برآورده کردن مشخصات مقاومتی ندارند، لیکن برای تولیدات با ضخامت زیاد، به‌خاطر سرعت سرد شدن کمتر، لازم است میزان کربن یا آلیاژها به‌منظور دستیابی مقاومت مورد نظر، افزایش داده شوند.

از آنجایی که جوش در ورق ضخیم، زودتر از ورق نازک سرد می‌شود و همچنین ورق ضخیم احتمالاً دارای کربن یا آلیاژ بیشتری است، جوش در ورق ضخیم دارای مقاومت بیشتر و شکل‌پذیری کمتری خواهد بود. برای اتصال ورق‌های ضخیم روش‌های جوشکاری خاص مورد نیاز خواهد بود (مخصوصاً برای پاس اول یا پاس ریشه) و احتمالاً پیش‌گرمایش نیز لازم می‌گردد. هدف از این روش‌ها، کاهش سرعت سرد شدن جوش و افزایش شکل‌پذیری آن است.

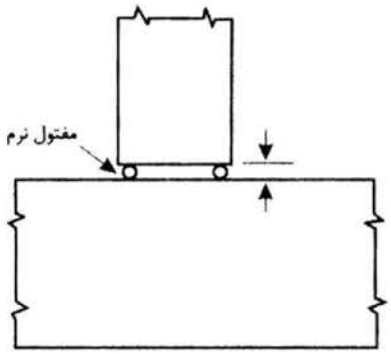
علاوه بر افزایش شکل‌پذیری، پیش‌گرمایش ورق‌های ضخیم، باعث کاهش تنش‌های انقباضی که در اثر گیرداری درز ایجاد می‌گردد، می‌شود.

به‌علت هزینهٔ بالا، پیش‌گرمایش باید به‌خوبی تعریف شده باشد. برای مثال، برای جوش گوشه ورق نازک جان به‌ورق ضخیم بال، پیش‌گرمایشی به‌اندازه پیش‌گرمایش جوش لب به‌لب دو ورق ضخیم با درجه گیرداری زیاد، لازم نیست.

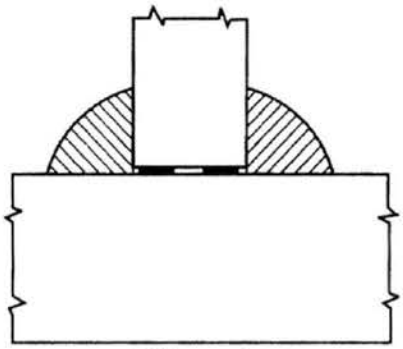
مطابق شکل ۵ ـ ۲۳، برای کاهش تنش‌های انقباضی در جوشکاری ورق‌های ضخیم، لازم است فاصله‌ای حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر، بین دو ورق ایجاد گردد. این فاصله را می‌توان به‌کمک مفتول نرمه ایجاد نمود. برش مضرس لبه‌ها با دندانه‌هایی در همین حدود، می‌تواند تأمین‌کننده این فاصله باشد.



(الف)



(ب) تنظیم قبل از جوشکاری



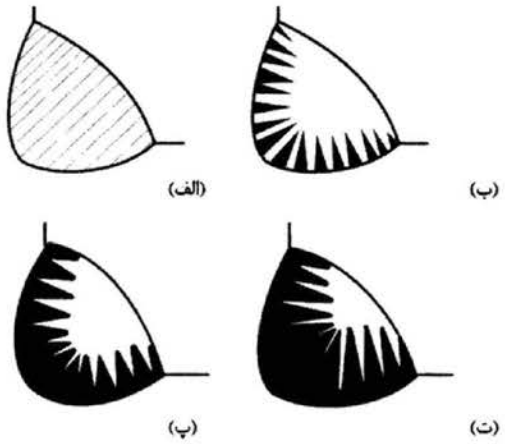
(پ) انقباض جوش آزاد است

شکل ۵ ـ ۲۳

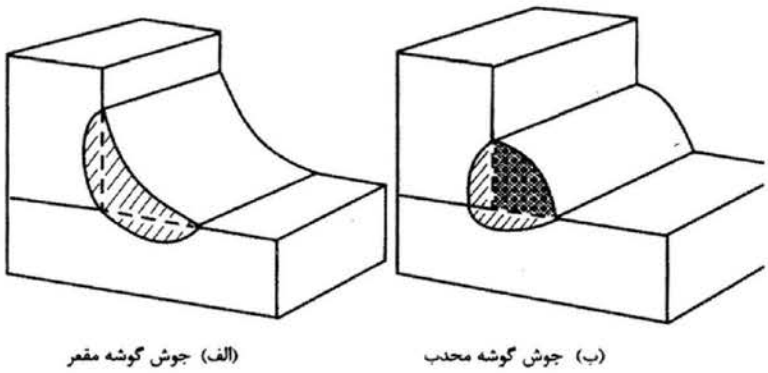
۵ ـ ۴ ـ ۵ جوش گوشه

در شکل ۵ ـ ۲۴ مراحل سرد شدن نوار مذاب جوش گوشه از سمت دو ساق به‌گلوی جوش نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، گلوی جوش گوشه آخرین منطقه‌ای است که سرد و جامد می‌گردد.

حال به‌مقایسه دو نوار جوش محدب و مقعر مطابق شکل ۵ ـ ۲۵ می‌پردازیم. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، مقایسه ظاهری، اندازه جوش مقعر را بزرگتر نشان می‌دهد. لیکن بررسی مقطع دو جوش نشان می‌دهد که جوش محدب دارای ضخامت گلوی بزرگتری می‌باشد. بنابراین جوش محدب با مصرف مصالح جوش کمتر، مقاومت بزرگتری دارا می‌باشد.



شکل ۵ ـ ۲۴

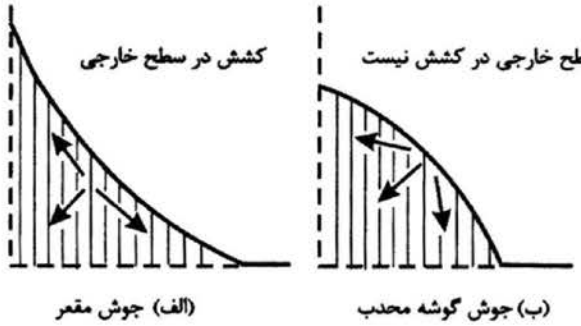


شکل ۵ ـ ۲۵

این احساس در اغلب طراحان وجود دارد که جوش گوشه مقعر، مسیر یکنواخت‌تری برای جریان تنش به‌وجود می‌آورد. لیکن تجارب عملی مبین این است که جوش‌های گوشه یک پاسه مقعر تمایل بیشتری برای ترک‌خوردگی دارند. بخصوص در فولادهایی که به‌روش‌های خاص جوشکاری نیاز دارند. این عیب مزیت توزیع یکنواخت تنش را جبران می‌کند.

وقتی که جوش مقعر خنک و منقبض می‌شود، سطح خارجی آن به‌کشش می‌افتد (شکل ۵ ـ ۲۶ ـ الف). این کشش می‌تواند در جوش ایجاد ترک نماید. با استفاده از جوش محدب می‌توان از این ترک جلوگیری نمود. همان‌طور که شکل ۵ ـ ۲۶ ـ ب، نشان می‌دهد جوش محدب می‌تواند بدون ایجاد کشش سطحی، سرد و منقبض گردد. در

جوش‌های گوشه چند پاسه، فقط پاس اول (جوش ریشه) لازم است به‌صورت محدب اجرا گردد. به‌همین علت اگر در طراحی برای جریان یکنواخت‌تر تنش لازم باشد از جوش مقعر استفاده گردد، باید جوش به‌صورت چند پاسه اجرا شود که پاس اول باید دارای قدری تحدب باشد.



شکل ۵ ـ ۲۶

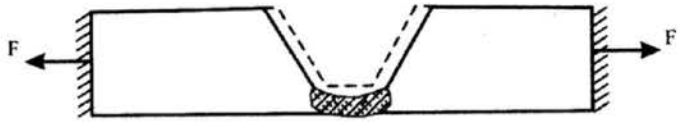
۵ ـ ۴ ـ ۶ جوش‌های شیاری

در ورق‌های ضخیم، پاس اول (جوش ریشه)، احتیاج به‌تمهیدات خاصی دارد. این مسئله در درزهای جناغی دوطرفه (X) برای جوش ریشه طرف دوم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، چون در هنگام اجرای این جوش، به‌علت اجرای جوش طرف اول، گیرداری بیشتری در درز وجود دارد. جوش در هنگام سرد شدن، تمایل به‌انقباض همه جانبه دارد که قیود موجود در ورق از این انقباض جلوگیری می‌کند و در نتیجه در جوش تنش‌های کششی انقباضی به‌وجود آمده و حتی جوش در نقاط متعددی به‌حد تسلیم می‌رسد.

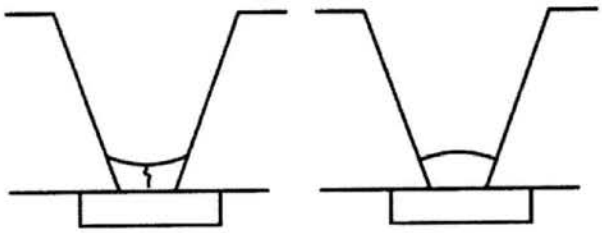
شکل ۵ ـ ۲۷ می‌تواند ایده‌ای از تنش‌های کششی محبوس و تسلیم جوش به‌دست دهد. فرض کنید که طول ورق‌ها کوچک بوده و اجازه انقباض آزاد به‌جوش داده شود. وضعیت انقباض‌یافته با خط‌چین نشان داده شده است. حال اگر بخواهیم ورق‌ها را به‌وضعیت اولیه برگردانیم، وضعیتی که در صورت وجود قید وجود خواهد داشت، نیاز به‌ایجاد کشش عرضی در درز داریم که ایجاد تنش کششی عرضی در جوش می‌نماید. در عمل به‌علت عدم امکان حرکت در ورق و کم بودن ضخامت جوش در مقابل ورق، کشیدگی (اتساع) یا تسلیم فقط در جوش به‌وجود می‌آید که قسمت اعظم آن در زمانی رخ می‌دهد که جوش داغ بوده و مقاومت و شکل‌پذیری کمتری دارد. اگر در این حالت، تنش داخلی از مشخصات مکانیکی جوش تجاوز نماید، یک ترک در امتداد نوار جوش به‌وجود می‌آید.

از آنجایی که پاس اول (جوش ریشه) کربن یا آلیاژ بیشتری از فلز پایه کسب می‌نماید، شکل‌پذیری آن کمتر از سایر پاس‌ها می‌باشد. مطابق شکل ۵ ـ ۲۸، اگر این جوش به‌صورت مقعر اجرا گردد، امکان ترک‌خوردگی در آن بیشتر خواهد شد.

افزایش ضخامت گلوی پاس اول (جوش ریشه)، احتمال وقوع ترک در آن‌را کاهش می‌دهد. استفاده از مصالح جوش کم‌هیدروژن نیز عامل مهمی در کاهش احتمال ترک است، در نهایت استفاده از پیش‌گرمایش نیز می‌تواند مقرر شود.

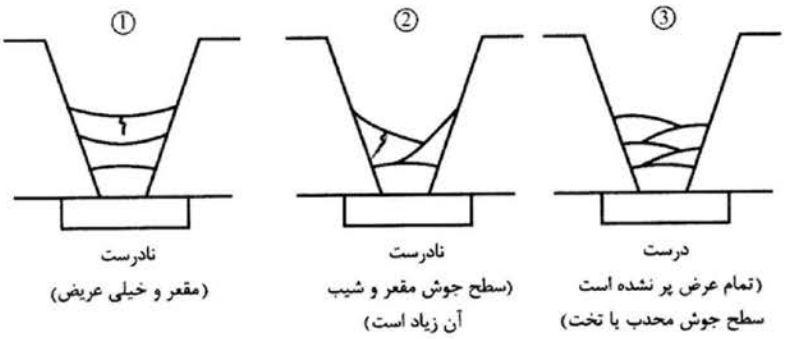


شکل ۵ ـ ۲۷



شکل ۵ ـ ۲۸

اگر پاس‌های میانی جوش به‌طور قابل توجهی عریض یا مقعر باشد، احتمال وقوع ترک در امتداد آنها نیز وجود دارد. مطابق شکل ۵ ـ ۲۹، در این حالت به‌جای استفاده از نوارهای عریض و مقعر، پاس‌های جوش بهتر است به‌صورت نوارهای پهلو به‌پهلو با عرض کمتر و تحدب بیشتر اجرا گردد.



شکل ۵ ـ ۲۹

۵ ـ ۴ ـ ۷ ترک‌های داخلی در نوار جوش و نسبت عرض به‌عمق نوار جوش

وقتی‌که به‌علت گیرداری درز یا شیمی مصالح یا هر دو عامل، تمایل به‌ترک‌خوردگی در جوش وجود داشته باشد، ترک در سطح جوش ظاهر می‌شود. گاهی مواقع ممکن است ترک داخلی بدون هرگونه عمق زیاد جوش یا طرح غلط درز ایجاد گردد.

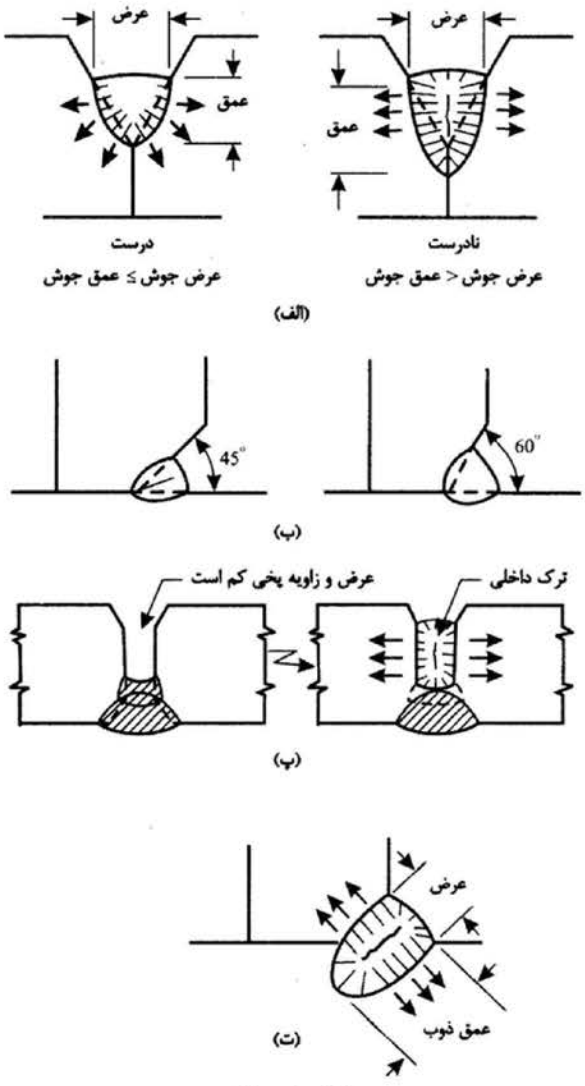
سرد شدن (انجماد) جوش شیاری مشابه جوش گوشه است. انجماد از سطح تماس جوش با سطح فلز پایه شروع شده و در محور مرکزی جوش به‌اتمام می‌رسد. اگر عمق ذوب خیلی بزرگتر از عرض نوار جوش باشد، سطح جوش

ممکن است زودتر از مرکز آن منجمد شود. در این حالت تنش‌های انقباضی می‌توانند در هسته داغ جوش، ترک داخلی بدون بروز سطحی به‌وجود آورند (شکل ۵ ـ ۳۰ ـ الف).

ترک‌های داخلی می‌توانند به‌علت عدم طراحی دقیق درز و آماده‌سازی لبه‌ها نیز به‌وجود آیند. شکل ۵ ـ ۳۰ ـ ب، نتایج ترکیب ورق ضخیم، نفوذ عمیق و زاویه لبه ۴۵ درجه را نشان می‌دهد.

شکل ۵ ـ ۳۰ ـ پ، یک جوش جناغی دوطرفه (X) را نشان می‌دهد که برای جوش طرف دوم شیار کم عرض و عمیقی سنگ‌خورده است. جوشکاری در این شیار باعث به‌وجود آمدن ترک داخلی خواهد شد.

شکل ۵ ـ ۳۰ ـ ت، ایجاد ترک داخلی را در جوش گوشه‌ای نشان می‌دهد که عمق ذوب آن نسبت به‌عرضش زیاد است. ترک‌های داخلی از این نظر که توسط بازرسی‌های چشمی قابل مشاهده نیستند، جدی‌تر هستند. راه جلوگیری از وقوع این ترک‌ها، کنترل نسبت عمق به‌عرض، طرح مناسب درز جوش، استفاده از سرعت و آمپر مناسب برای کنترل حجم مصالح جوش مصرفی می‌باشد.



شکل ۵ ـ ۳۰

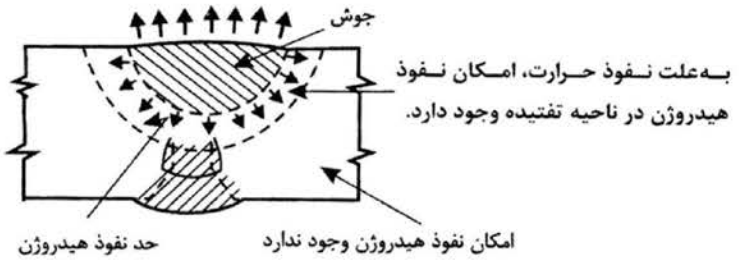
در میان عوامل فوق نسبت عرض به‌عمق درز جوش، مهمترین است. تجربه نشان می‌دهد که نسبت عرض به‌عمق مذاب جوش، از مقدار حداقل ۱ به ۱ تا حداکثر ۱/۴ به ۱ مناسب می‌باشد:

$$\frac{\text{عرض جوش}}{\text{عمق ذوب}} = ۱/۴ \text{ تا } ۱$$

۵ ـ ۴ ـ ۸ ترک در زیر نوار جوش[۴]

این نوع ترک، ترکی است که در زیر نوار جوش در ناحیه تفتیده فلز پایه به‌وجود می‌آید. در فولادهای نرمه کم‌کربن تقریباً وقوع چنین ترکی مشاهده نمی‌شود. با افزایش میزان کربن و آلیاژها و ضخامت ورق، امکان وقوع آن افزایش می‌یابد. در فولادهایی با حد تسلیم ۷۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع حتی با وجود اعمال پیش‌گرمایش، باز باید انتظار وقوع این ترک‌ها را داشت.

یکی از روش‌های جلوگیری از این نوع ترک، استفاده از مصالح جوش کم‌هیدروژن است، چون نفوذ هیدروژن باعث تردی ناحیه تفتیده فلز پایه می‌گردد. هیدروژن می‌تواند از طریق روکش الکترود و یا رطوبت موجود در سطوح مورد جوش وارد فلز پایه گردد. نوار جوش و ناحیه تفتیده فلز پایه، به‌علت درجه حرارت زیاد قدرت جذب هیدروژن بالایی دارند. خوشبختانه اکثر هیدروژن از حد فاصل درز جوش خارج شده و فقط قسمت ناچیزی از آن جذب نوار جوش و فلز پایه می‌گردد. با توجه به‌کاهش قابلیت جذب هیدروژن به‌علت کاهش دما، با دور شدن از ناحیه تفتیده، قدرت جذب هیدروژن نیز توسط فلز پایه از بین می‌رود. در شکل ۵ ـ ۳۱ نواحی نفوذ هیدروژن در نوار جوش و فلز پایه نشان داده شده است. در واقع ناحیه خارج از ناحیه تفتیده مانند حصاری در اطراف حوزه تأثیر حرارت، از نقطه‌نظر جذب هیدروژن عمل می‌نماید و در شکل فریت باقی می‌ماند.

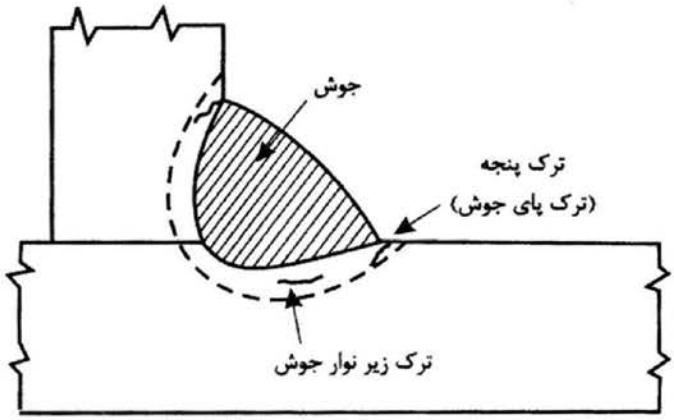


شکل ۵ ـ ۳۱

با کاهش دما، ناحیه تفتیده به‌شکل قبلی خود یعنی فریت بدون قدرت جذب هیدروژن برمی‌گردد. هیدروژن‌های جذب‌شده از فلز جدا شده و به‌صورت حفراتی در حد فاصل کریستال‌ها محبوس می‌شوند و باعث افزایش فشار بین کریستالی می‌گردند. این فشار اضافی در ترکیب با تنش‌های انقباضی و اثر تردشدگی این ناحیه، باعث بروز ترک می‌شود. چون کربن فولاد جوش کمتر از کربن فلز پایه است، این پدیده اکثراً در ناحیه تفتیده از فلز پایه رخ می‌دهد

4. Under bead cracking

(شکل ۵ ـ ۳۲). به‌این نوع ترک، ترک در زیر نوار یا زنجیره جوش می‌گویند. در صورتی که این ترک‌ها در فلز پایه در مجاورت نوارجوش ظاهر شوند، به‌آنها ترک پنجه[5] می‌گویند. کاهش سرعت انجماد، کاهش سرعت جوشکاری و پیش‌گرمایش، به‌هیدروژن جذب‌شده فرصت خروج می‌دهند و از شدت بروز این نوع ترک کاسته می‌شود.



شکل ۵ ـ ۳۲

استفاده از الکترود کم‌هیدروژن، منبع اصلی تولید هیدروژن را از بین برده و باعث حذف ترک در زیر نوار جوش می‌شود.

۵ ـ ۴ ـ ۹ جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده در مورد ترک

مهمترین مشخصه درز جوش، عاری بودن آن از هرگونه ترک است. ترک می‌تواند در نوار جوش (مصالح جوش) و ناحیه تفتیده در فلز پایه به‌وجود آید. اکثر فولادها در ضخامت‌های متوسط را می‌توان بدون نگرانی از وقوع ترک جوش نمود.

با افزایش ضخامت ورق، میزان کربن و آلیاژها، ترک در نوار جوش و ترک در زیر نوار جوش به‌صورت یک مشکل در می‌آید و برای جلوگیری از وقوع آن به‌تمهیدات خاصی نیاز است.

برای جلوگیری از وقوع ترک روش‌های پیشگیرانه زیر ایجاب می‌شود:

الف) انتخاب دستورالعمل جوشکاری مناسب به‌همراه مقطع مناسب برای درز و نوار جوش و کنترل مواد مضاف.

ب) کاهش گیرداری درز با تعبیه فاصله بین دو لبه ورق.

پ) استفاده از مصالح جوش کم‌هیدروژن.

ت) کنترل سرعت انجماد با کاهش شدت جریان الکتریسیته، کاهش سرعت جوشکاری و در صورت نیاز استفاده‌از پیش‌گرمایش و کنترل دما در پاس‌های میانی.

---

5. Toe crack

۶ تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری

۶ـ۱ عوامل مؤثر در تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری ۱۵۵
۶ـ۲ عوامل اعوجاج ۱۵۶
۶ـ۳ تأثیرات نامطلوب جوش بیش از حد ۱۵۷
۶ـ۴ کنترل انقباض جوش ۱۵۸
۶ـ۵ انقباض عرضی ۱۶۱
۶ـ۶ هلالی شدن بال ۱۶۵
۶ـ۷ شمشیری شدن (انحنای طولی) ۱۶۶
۶ـ۸ هم‌راستایی ورق‌ها ۱۷۱
۶ـ۹ استفاده از حرارت برای رفع انقباض‌های جوشکاری ۱۷۲
۶ـ۱۰ حرارت تولیدی در هنگام جوشکاری (حرارت القایی به‌علت جوشکاری) ۱۷۶
۶ـ۱۱ جمع‌بندی مطالب فصل ۱۸۶

۶ تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری

۶ـ۱ عوامل مؤثر در تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری

در عملیات جوشکاری، چرخهٔ گرم و سرد شدن، باعث انقباض در فلز پایه و جوش می‌شود که این انقباض باعث اعوجاج در قطعه مورد جوش می‌گردد. به‌منظور حصول اهداف اقتصادی کامل در ساخت و ساز جوشی، مهندسان طراح و اجرا باید تخمین درستی از میزان انقباض و روش‌های کنترل آن در ذهن داشته باشند. روش‌های پیشنهادی برای اصلاح و یا حذف انقباض، بر پایه تحلیل‌های نظری و تجارب عملی در کارخانه‌های ساخت قرار دارند.

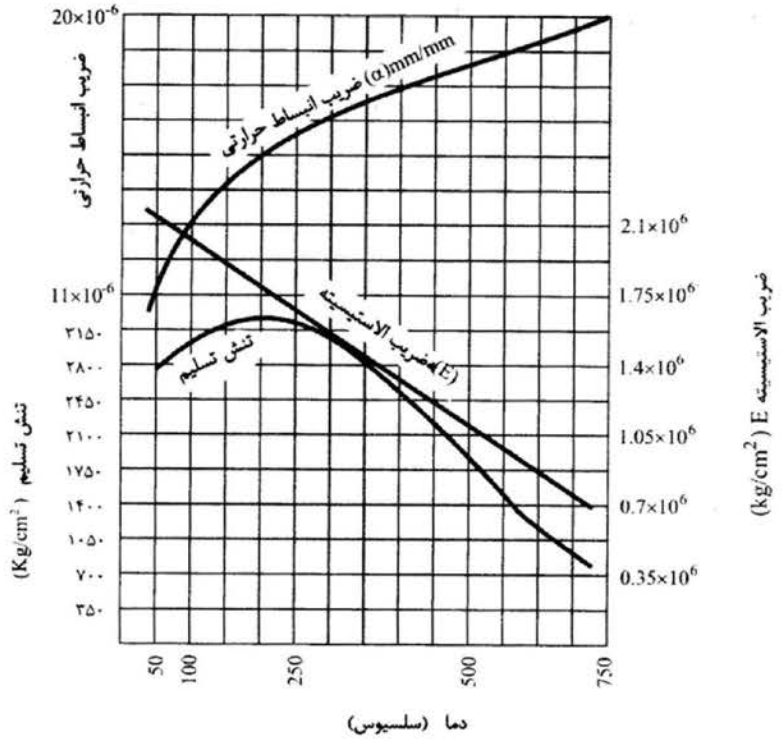
اختلافات شدید حرارتی در ناحیه نوار جوش، توزیع خواص غیریکنواختی در قطعات به‌وجود می‌آورد. با افزایش دما، خواصی نظیر تنش تسلیم، ضریب الاستیسیته، و هدایت حرارتی، کاهش و ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه افزایش می‌یابد (شکل ۶ ـ ۱). در نتیجه تخمین اعوجاج و تغییرشکل مصالح به‌کمک تحلیل حرارتی بسیار مشکل می‌شود.

به‌علاوه، گیرداری ناشی از گیره‌های خارجی و گیرداری‌های داخلی به‌علت جرم، و سختی ورق فولادی، باید در تحلیل منظور گردند. تمام این عوامل تأثیر مشخصی بر تغییرشکل‌های حرارتی دارند.

بالاخره لازم است عامل زمان مورد توجه قرار گیرد. مدت زمان تداوم شرایط خاص، اهمیت آن موضوع را کنترل می‌کند.

تمام عوامل تأثیرگذار فوق، خود تابعی از دستورالعمل جوشکاری می‌باشند. دستورالعمل‌های مختلف جوشکاری، نوع الکترود، شدت جریان، سرعت حرکت، آماده‌سازی لبه، پیش‌گرمایش و سرعت خنک شدن، تأثیر مهمی در مسئله دارند.

آشکار است که با بررسی جداگانه عوامل فوق نمی‌توان اعوجاج و تغییرشکل‌های حرارتی را تحلیل نمود و تحلیلی بر پایه تأثیر ترکیبی عوامل، تنها روش عملی است.



شکل ۶ ـ ۱ تغییر خواص مکانیکی در دمای زیاد، تحلیل انقباضی جوش را مشکل‌تر می‌نماید. نمودارها برای فولاد نرمه می‌باشند.

۶ ـ ۲ عوامل اعوجاج

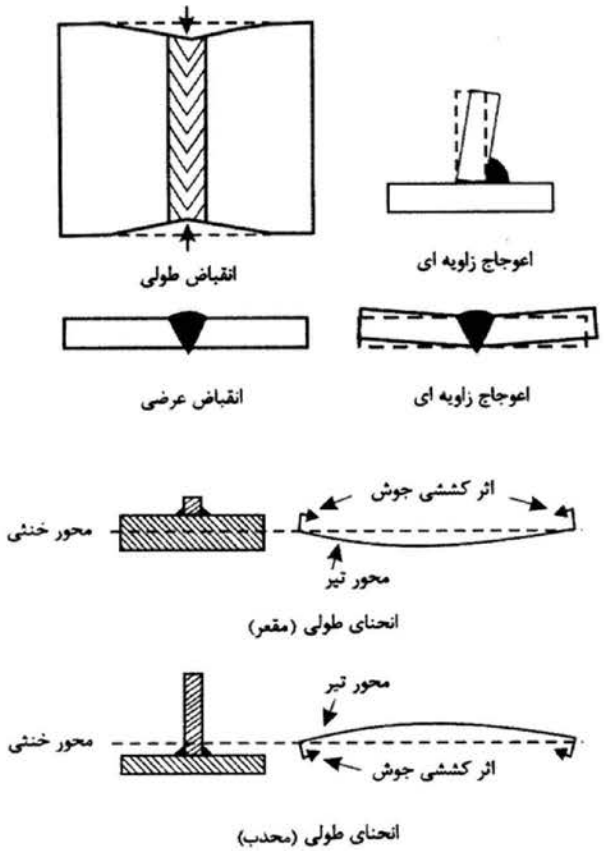
مطابق شکل ۶ ـ ۲، تغییرشکل ناشی از جوش را می‌توان به‌انقباض طولی و انقباض عرضی تقسیم نمود. اگر انقباض عرضی در ضخامت جوش یکنواخت نباشد، اعوجاج زاویه‌ای نیز رخ می‌دهد. اگر انقباض طولی در امتداد محوری غیرمنطبق بر محور خنثای عضو رخ دهد، باعث انحنای طولی (شمشیری شدن) عضو خواهد شد.

انحنای طولی وقتی رخ می‌دهد که شرایط انبساط و یا انقباض غیریکنواخت به‌وجود آید. با برآوردی از عوامل زیر می‌توان مقدار انحنای طولی را تخمین زد:

۱ ـ جوش به‌همراه قسمتی از فلز اطراف، در هنگام سرد شدن منقبض شده و تولید نیروی انقباضی F را می‌نماید. این نیرو همانند نیروی پیش‌تنیدگی می‌باشد.

۲ ـ نیروی انقباضی حدوداً در امتداد مرکز جوش عمل می‌کند. فاصله بین مرکز سطح مقطع جوش و محور خنثای عضو، با بازوی لنگر d نمایش داده می‌شود.

۳ ـ ممان اینرسی مقطع (I) ، در مقابل این انقباض مقاومت می‌کند. باید توجه نمود در صورتی که لازم باشد عضو به‌حال مستقیم درآید، ممان اینرسی I با این عمل نیز مقابله می‌نماید.

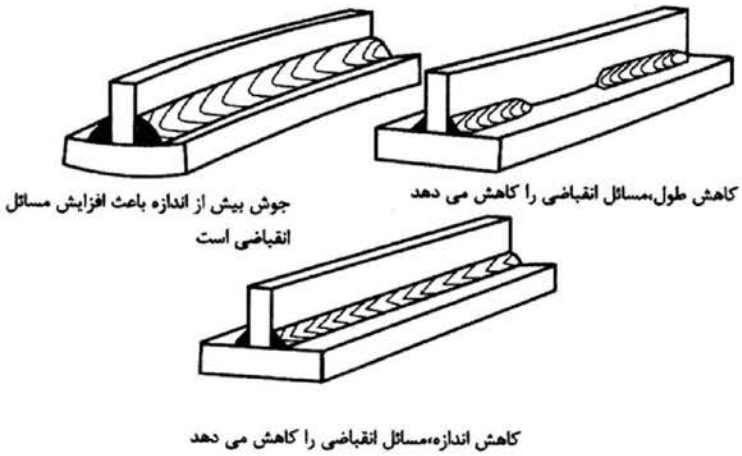


شکل ۶ ـ ۲ نیروی نامتعادل حاصل از انقباض نوار جوش باعث اعوجاج زاویه‌ای و یا انحنای طولی (شمشیری شدن) می‌شود.

۶ ـ ۳ تأثیرات نامطلوب جوش بیش از حد

اضافه‌جوش، نیروی انقباضی F و تمایل به‌انقباض را افزایش می‌دهد. هر عاملی که مقدار جوش را کاهش دهد، نظیر کاهش اندازه ساق، کاهش طول، یا استفاده از جوش منقطع (شکل ۶ ـ ۳)، تمایل به‌انقباض را کاهش خواهد داد.

اضافه‌جوش می‌تواند با دست به‌هم دادن یک سلسله اتفاقات، به‌طور غیرعمدی رخ دهد. طراح ممکن است با منظور کردن قدری اطمینان، اندازه جوش را یک نمره بزرگتر انتخاب نماید. در کارخانه ساخت، سرپرست جوشکاری نیز ممکن است جهت اطمینان را گرفته و اندازه جوش را یک نمره بزرگتر دستور دهد. جوشکار نیز از ترس اینکه جوشش زیر اندازه به‌دست آید، ممکن است جوش را کمی ضخیم‌تر اجرا نماید. در نتیجه جوش ۶ میلی‌متر تبدیل به ۱۲ میلی‌متر می‌شود. با توجه به‌اینکه افزایش مقدار مصالح جوش متناسب با توان دوم اندازه جوش است، این امر باعث می‌شود مقدار مصالح جوش، مخارج و نیروی انقباض چهار برابر گردد.

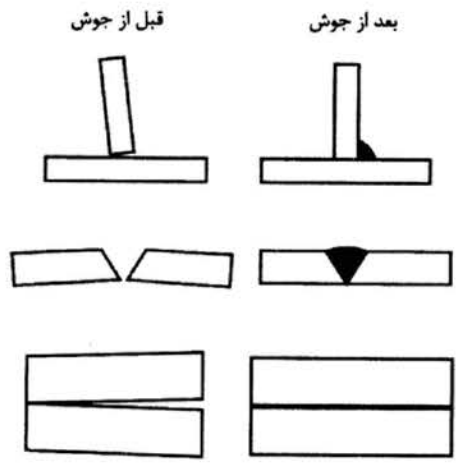


شکل ۶ ـ ۳ جوش بیش از اندازه، عاملی برای افزایش انقباض است.

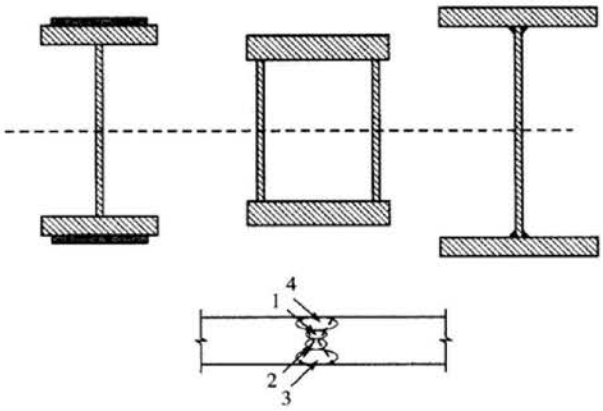
۶ ـ ۴ کنترل انقباض جوش

یکی از روش‌های مقابله با آثار انقباضی جوش، پیش‌خمش و پیش‌تنظیم اعضا و تنظیم درزها برای خنثی‌سازی آثار انقباضی است. در این حالت مطابق شکل ۶ ـ ۴، انقباض جوش باعث می‌شود که اعضا به‌وضعیت اولیه درآیند.

در صورت امکان، جوش باید حول تار خنثای مقطع عضو متعادل گردد. در این حالت بازوی نیروی برون‌محور مساوی صفر می‌گردد، به‌طوری که اگر نیروی انقباضی F وجود داشته باشد، لنگر انقباضی Fd مساوی صفر می‌شود (شکل ۶ ـ ۵).

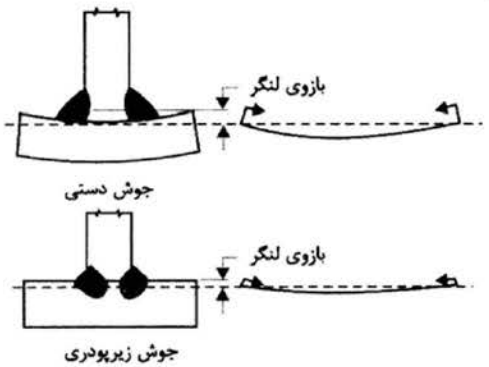


شکل ۶ ـ ۴ تنظیم اولیه درزها باعث می‌شود که انقباض،آنها را به‌وضعیت صحیح مورد نظر درآورد.



شکل ۶ ـ ۵ متعادل کردن جوش‌ها و یا نوارهای جوش در حول تار خنثای عضو، اعوجاج زاویه‌ای را به‌صفر می‌رساند.

در صورتی‌که محور خنثای مقطع مطابق شکل ۶ ـ ۶ پایین‌تر از مرکز ثقل جوش‌ها قرار گیرد، با استفاده از جوش زیرپودری که تولید جوش عمیق از مشخصه‌های آن است، مرکز ثقل نوارجوش‌ها پایین افتاده و بازوی لنگر و در نتیجه لنگر انقباضی کاهش می‌یابد.



شکل ۶ ـ ۶ افزایش عمق جوشکاری، باعث می‌شود مرکز ثقل جوش به‌تار خنثای عضو نزدیکتر شده و باعث کاهش لنگر انقباضی گردد.

تأثیر فلز پایه در مجاورت نوارجوش

انقباض فلز جوش به‌تنهایی، اغلب نمی‌تواند مقادیر انقباض‌های واقعی را توجیه نماید. به‌این حقیقت باید توجه داشت که فلز پایه مجاور نوار جوش نیز سهمی در انقباض دارد. حرارت جوشکاری باعث می‌شود که فلز پایه مجاور منبسط شود. این ناحیه از فلز پایه، توسط قسمت‌های خنک‌تر احاطه و مقید شده است. در نتیجه تمام انبساط حجمی باید در ضخامت ورق رخ دهد. در هنگام سرد شدن، ناحیه گرم‌شده تحت انقباض حجمی قرار گرفته و تنش‌های انقباضی در امتداد طولی و عرضی به‌وجود می‌آید. در نتیجه، این ناحیه از فلز پایه به‌همراه فلز جوش منقبض می‌شود.

تأثیر سرعت جوشکاری

حجم فلز پایه‌ای که در اعوجاج شرکت می‌کند، می‌تواند توسط دستورالعمل جوشکاری مناسب کنترل گردد. افزایش سرعت جوشکاری می‌تواند حجم فلز پایه تحت تأثیر حرارت را کاهش داده و در نتیجه انقباض و اعوجاج‌های ناشی از آن را کاهش دهد. سرعت زیاد را می‌توان با روش‌های جوش خودکار و نیمه‌خودکار و یا استفاده از الکترودهای خاص در جوشکاری دستی به‌دست آورد.

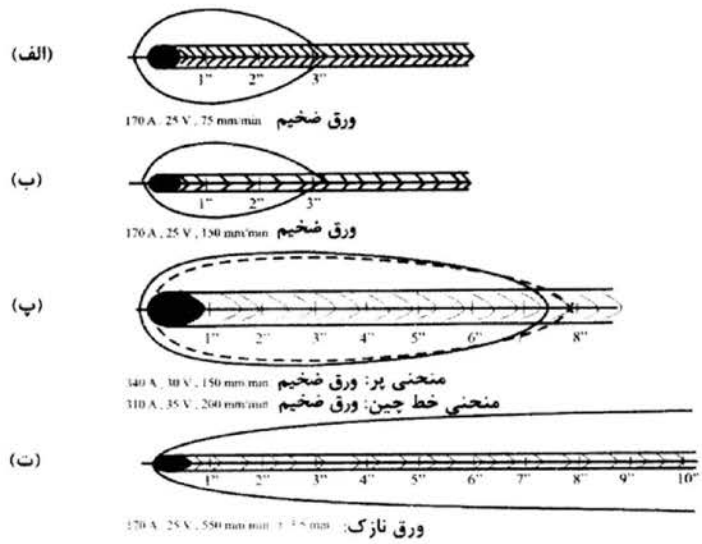
تأثیر شدت جریان و سرعت جوشکاری در ناحیه تفتیده در شکل ۶ ـ ۷ نشان داده شده است. تقریباً اندازه جوش به‌دست آمده در دو حالت الف و پ، یکسان است. اختلاف آنها در این است که سرعت بیشتر جوشکاری در حالت پ، ناحیه تفتیده باریکتری به‌وجود می‌آورد. از عرض منحنی هم‌دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از ناحیه تفتیده فلز پایه که به‌همراه فلز جوش در انقباض مؤثر است، استفاده نمود. این پدیده پاسخی به‌این سؤال است که چرا جوشکاری با سرعت زیاد، اعوجاج کمتری تولید می‌کند. این مسئله از مقایسه حرارت اعمال‌شده به‌ورق به‌وسیله جوش نیز آشکار است.

برای جوش الف:

$$\frac{60EI}{V}=\frac{(60)(25V)(170amp)}{3''/min}=85000\ Joule/in$$

برای جوش پ:

$$\frac{60EI}{V}=\frac{(60)(35V)(310amp)}{8''/min}=81000\ Joule/in$$



شکل ۶ ـ ۷ تأثیر تکنیک‌های جوشکاری بر ناحیه تفتیده. در هر حالت، منحنی هم‌دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس نشان داده شده است.

مقایسه حالت الف و ب، شکل ۶ ـ ۷ گویای شرایط دیگری است. دو درز لب به‌لب یکی در وضعیت قائم (سربالا) و دیگری در وضعیت افقی با استفاده از جوش شیاری با عبورهای چندگانه تولید شده‌اند.

جوش سربالا با سه بار عبور با سرعت ۳ اینچ (۷۵ میلی‌متر) بر دقیقه با حرکت از پایین به‌بالا به‌طور زیگ‌زاگ، اجرا شده است (جوش الف). جوش افقی با ۶ بار عبور با سرعت ۶ اینچ (۱۵۰ میلی‌متر) بر دقیقه اجرا شده است (جوش ب). سرعت جوش بیشتر، باعث شده است که عرض ناحیه هم‌حرارت باریکتر گردد؛ ولی ۶ بار عبور باعث تجمع انقباض‌ها و در نتیجه افزایش انقباض نسبت به‌حالت الف، شده است.

این پدیده پاسخی به‌این سؤال است که چرا جوش‌ها با عبورهای (پاس‌های) بیشتر، انقباض عرضی بزرگتری نسبت به‌جوش‌ها با عبور کمتر به‌وجود می‌آورند. با استفاده از تعداد عبور کمتر، انقباض عرضی کمتر می‌شود. استفاده از الکترودهای ضخیم‌تر، باعث کاهش بیشتر انقباض عرضی می‌گردد.

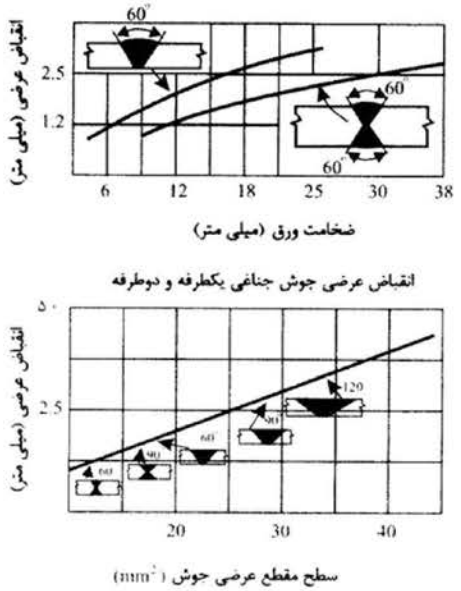
در شکل ۶ ـ ۷ ـ ت، ملاحظه می‌شود که عرض بزرگتری از فلز پایه در ناحیه تفتیده قرار گرفته است. این مسئله به‌همراه انعطاف‌پذیری بیشتر ورق نازکتر، باعث اعوجاج بیشتری شده است.

اصولاً ورق‌های نازکتر، از نظرمسائل اعوجاجی و حرارتی مشکل‌سازتر از ورق‌های ضخیم هستند.

۶ ـ ۵ انقباض عرضی

در صورتی که اثر خالص انقباض جداگانه جوش‌ها، قابل تجمع باشد، انقباض عرضی تبدیل به‌عامل مهمی خواهد شد.

نمودارهای شکل ۶ ـ ۸، دیدی از مسئله انقباض به‌وجود می‌آورد. نمودار پایینی نشان می‌دهد که میزان انقباض در یک ورق با ضخامت مشخص، متناسب با سطح مقطع جوش می‌باشد. زاویه پخی بازِ نشان داده شده فقط به‌منظور نشان دادن سطح مقطع بزرگتر جوش است و لزوماً پخی واقعی را نشان نمی‌دهد. نمودار بالا اثر جوش یکطرفه و دوطرفه را نشان می‌دهد. در هر دو نمودار فرض شده است که ورق‌ها هیچ‌گونه گیرداری در لبه‌ها ندارند.



شکل ۶ ـ ۸ انقباض عرضی متناسب با سطح مقطع جوش می‌باشد.

محاسبات نشان می‌دهند که انقباض عرضی در حدود ۱۰ درصد عرض متوسط سطح مقطع جوش می‌باشد.

$$\Delta_{\text{عرضی}} = 0.10\frac{A_{weld}}{t} = 0.10\times \text{(عرض متوسط جوش)} \qquad (۶ - ۱)$$

در هنگام استفاده از جوش زیرپودری، به‌جای استفاده از عرض نوار فلزجوش، باید از عرض ذوب‌شده درز استفاده نمود.

مثال ۶ ـ ۱

در شکل ۶ ـ ۹ سطح مقطع عرضی جوش جناغی دوطرفه برای درز جوش ورقی به‌ضخامت ۲۵ میلی‌متر نشان داده شده است. مطلوب است تعیین انقباض عرضی جوش.

حل:

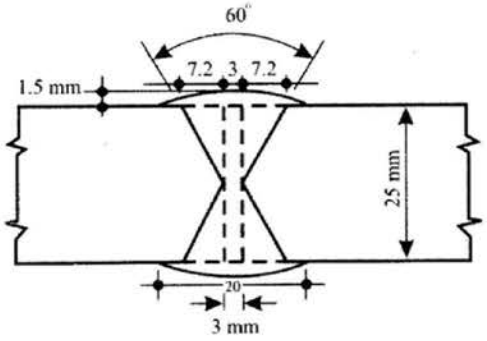
محاسبه سطح مقطع جوش

$$A_w = 3\times 25 + 4\times\frac{1}{2}(7.2\times 12.5) + 2\times\frac{2}{3}\times 20\times 1.5 = 300\,\text{mm}^2$$

$$\Delta_{tran} = 0.10\frac{300}{25} = 1.2\ \text{mm}$$

استفاده از الکترودها با پوشش حاوی پودرآهن از مقدار انقباض فوق کم می‌کند و استفاده از جوش خودکار زیرپودری کاهش بیشتری را به‌دنبال خواهد داشت. همچنین هرچه تعداد عبور جوش‌ها کمتر شود، مقدار انقباض کمتر خواهد شد.

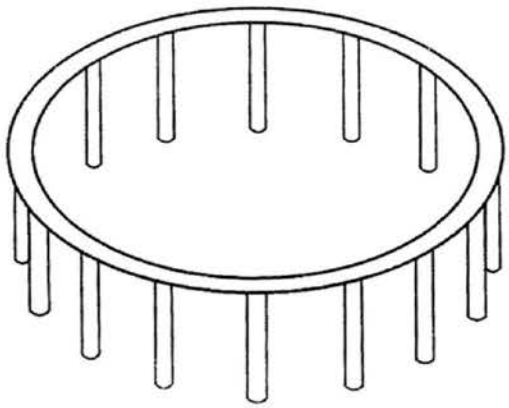
اگر مثال فوق با استفاده از نمودار فوقانی شکل ۶ ـ ۸ حل شود، مقدار انقباض حدود ۲ میلی‌متر به‌دست می‌آید که اختلافی با نتیجه حاصل دارد. برای توجیه این تناقض این نکته باید یادآوری گردد که در نمودار شکل ۶ ـ ۸ دهانه ریشه ۶ میلی‌متر منظور شده است (به‌جای ۳ میلی‌متر). اگر با این دهانه ریشه و گرده بزرگتر، سطح مقطع جوش به‌دست آید، نتیجه حاصل به ۲ میلی‌متر نزدیک خواهد شد. این بررسی، قابل اطمینان بودن روش به‌کار رفته در مثال ۶ ـ ۱ را تأیید می‌کند.



شکل ۶ ـ ۹ مربوط به‌مثال ۶ ـ ۱.

مثال ۶ ـ ۲

یک حلقهٔ فولادی از ورق ۱۲×۲۵۰ میلی‌متر، گنبدی به‌قطر ۴۱/۵ متر را تحمل می‌کند. این حلقه به‌روی ۲۴ ستون متکی است که در وجه هر ستون ورقی کار گذاشته شده و قرار است قطعات حلقه موردنظر، در حدفاصل دو ستون، به‌این ورق‌ها جوش شوند (شکل ۶ ـ ۱۰). جزییات جوش در شکل ۶ ـ ۱۱ نشان داده شده است. در هنگام ساخت هیچ‌گونه تدابیری برای انقباض اتخاذ نشده بود. بعد از اجرا فهمیده شد که محیط این حلقه کوتاه و باعث شده که بالای ستون‌ها به‌اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر به‌سمت داخل کشیده شوند. آیا این جمع‌شدگی قطری به‌روش محاسباتی قابل پیش‌بینی بود یا نه.



شکل ۶ ـ ۱۰ مربوط به‌مثال ۶ ـ ۲.

سطح مقطع جوش (شکل ۶ ـ ۱۱)

$$A_w = 0.6\times1.2 + 0.5\times1.2^2 + \frac{2}{3}\times2.5\times0.5 = 2.27\ \text{cm}^2$$

عرض مؤثر جوش $= \dfrac{2.27}{1.7} = 1.34\ \text{cm}$

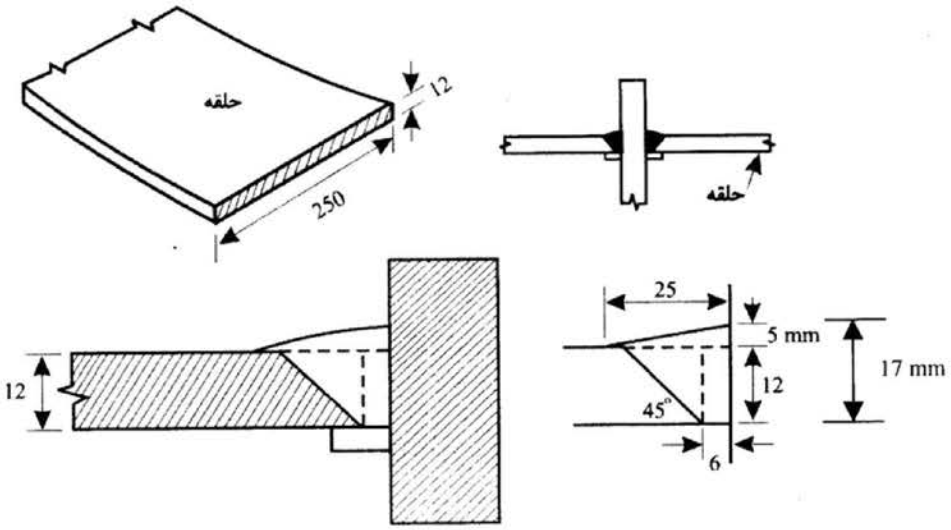
انقباض عرضی $= \Delta_{trans} = 0.1\times1.34 = 0.134\ \text{cm}$

با توجه به‌وجود ۲۴ ستون، تعداد ۴۸ درز جوش شیاری وجود دارد.

انقباض محیطی کل $\Delta_{circ} = 48(0.134) = 6.43\ \text{cm}$

انقباض قطری $= \dfrac{6.43}{2\pi} = 1.02\ \text{cm}$ (با مقدار اندازه‌گیری شده، انطباق منطقی‌ای دارد)

هرگونه تنظیم غلط درزجوش و یا گرده اضافی، باعث افزایش سطح مقطع و در نتیجه افزایش انقباض می‌گردد.



شکل ۶ ـ ۱۱ جزییات درزجوش در مثال ۶ ـ ۲.

مثال ۶ ـ ۳

مطابق شکل تیری با اتصال مستقیم به‌ستونی متصل می‌گردد. مقطع جوش شیاری بال تیر به‌جان ستون در شکل نشان داده شده است. مطلوب است تعیین میزان انقباض.

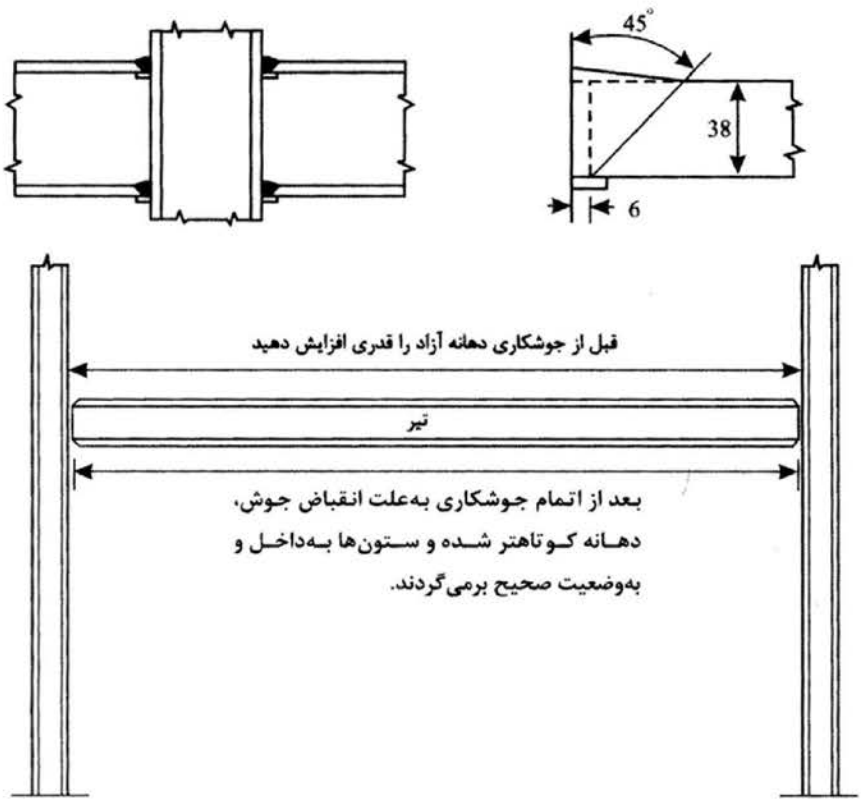
حل:

$$A_w = 0.6\times 3.8 + \frac{1}{2}\times 3.8\times 3.8 + \frac{2}{3}(3.8+0.6)\times 0.3 = 10.4\ \text{cm}^2$$

$$\Delta = 0.1\frac{A_w}{t} = 0.1\times\frac{10.4}{3.8} = 0.27 \cong 3\ \text{mm}$$

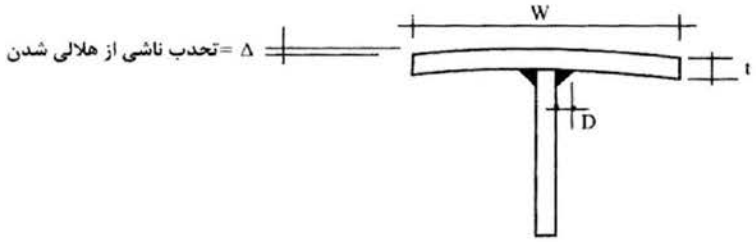
جوش ۱۰ میلی‌متر جان تأثیر عمده‌ای بر انقباض نخواهد داشت. مقدار آن در حدود ده درصد انقباض جوش شیاری خواهد بود که این انقباض در گرد کردن منظور شده است.

برای رفع انقباض فوق، باید فاصله خالص دو ستون از هر طرف به‌اندازه ۳ میلی‌متر باز گردد تا بعد از جوش به‌وضعیت اولیه برگردد.



۶ـ۶ هلالی شدن بال[1]

انحنای عرضی بال را هلالی شدن و یا پرانتزی شدن گویند.



از رابطه زیر می‌توان برای تخمین تحدب بال استفاده نمود:

$$\Delta = \frac{0.038W\ D^{1.3}}{t^2} \qquad (۶ - ۲)$$

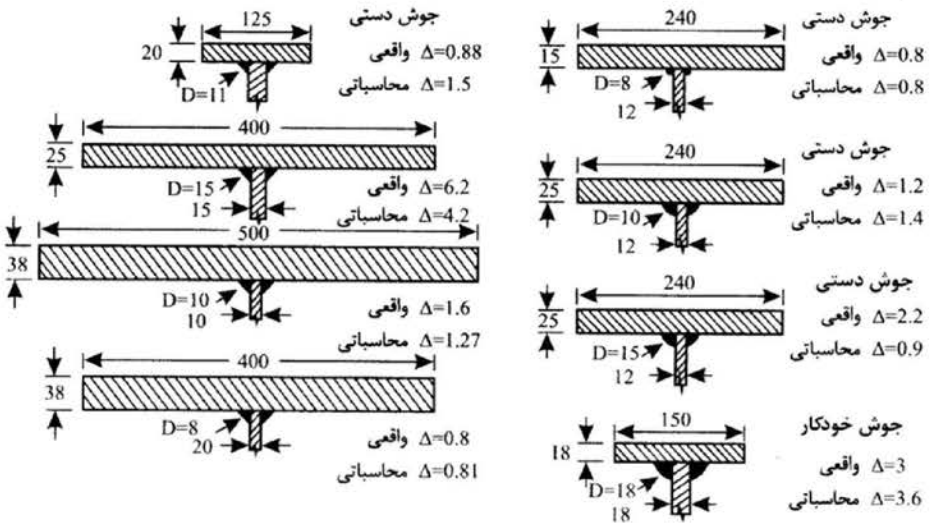
در رابطه فوق:

W= عرض بال (cm)　　D= اندازه جوش (cm)

t= ضخامت بال (cm)　　Δ= میزان تحدب عرضی (cm)

1. Flange warpage

در شکل ۶ ـ ۱۲ مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسباتی برای چندین نمونه جوش ورق بال به‌جان نشان داده شده است که حاکی از انطباق خوب رابطه نظری با نتایج واقعی است.



شکل ۶ ـ ۱۲ هلالی شدن، نسبت مستقیم با عرض بال و اندازه جوش و نسبت معکوس با ضخامت بال دارد. (ابعاد برحسب میلی‌متر)

۶ ـ ۷ شمشیری شدن (انحنای طولی)

به‌علت انقباض جوش‌های طولی نامتعادل نسبت به‌تار خنثی، انحنای طولی یا شمشیری شدن رخ می‌دهد (شکل ۶ ـ ۱۳). مقدار خیز Δ به‌علت شمشیری شدن را می‌توان از رابطهٔ زیر تعیین نمود:

$$\Delta = 0.005\frac{A_w dL^2}{I} \qquad (۶ - ۳)$$

در رابطه فوق:

A_w= سطح مقطع کلی جوش‌ها (cm^2)

d= فاصله بین مرکز ثقل مقطع گرده جوش تا تار خنثی (cm)

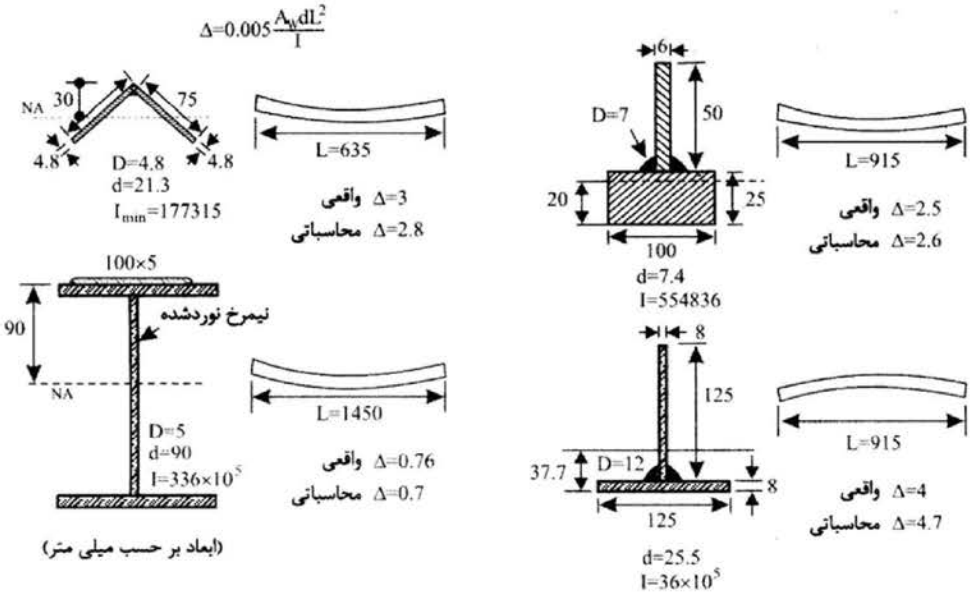
L= طول کلی عضو (با فرض جوش طولی کامل) (cm)

I= ممان اینرسی عضو (cm^4)

Δ= خیز حداکثر (cm)

در شکل ۶ ـ ۱۳ انطباق خوب نتایج حاصل از رابطه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داده شده است.

گاهی مواقع حتی با وجود تعادل جوش‌ها حول تار خنثی، پدیده شمشیری شدن در اعضای طولی رخ می‌دهد. این پدیده این‌طور توجیه می‌شود که در اطراف خط جوش اول تغییرشکل‌های خمیری رخ می‌دهد که این تغییرشکل‌ها به‌علت خط جوش قرینه، خنثی نمی‌شود. در صورتی که برای حصول جوش چند عبور لازم گردد، با انتخاب توالی مناسب برای انجام جوش، می‌توان از بروز تغییرشکل‌های ناخواسته جلوگیری نمود. به‌عنوان مثال به توالی

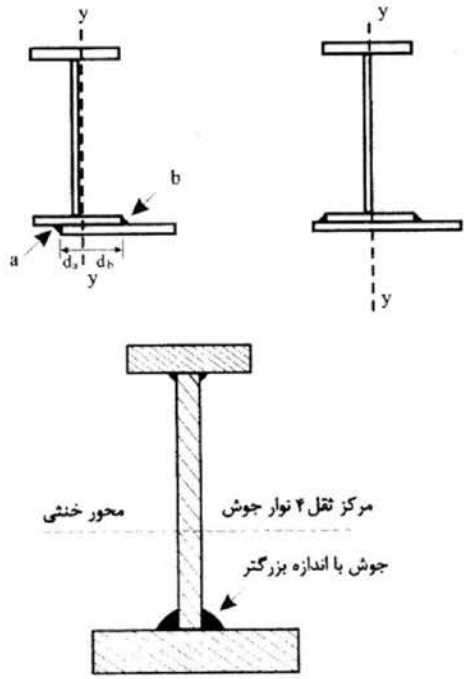


شکل ۶ ـ ۱۳ انطباق خوب رابطه ۶ ـ ۳ با مقادیر اندازه‌گیری شده در عمل برای پدیده شمشیری شدن. (ابعاد برحسب میلی‌متر)

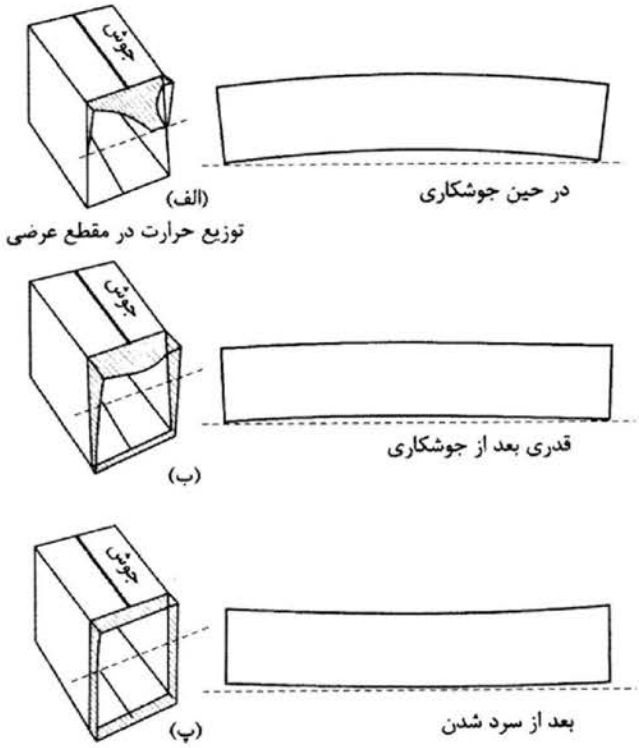
انجام عبور جوش‌ها در شکل ۶ ـ ۵ توجه نمایید. در این درزجوش، ابتدا عبور ۱ انجام می‌شود. عبور ۲ در سمت مقابل ورق را نمی‌تواند کاملاً به‌وضعیت تخت درآورد، لیکن عبور ۳ که در سمت عبور ۲ انجام می‌شود، تغییرشکل اولیه را کاملاً خنثی نموده و مقداری تغییرشکل مخالف نیز به‌وجود می‌آورد. عبور ۴ در سمت مخالف کاملاً وضعیت اولیه را به‌وجود می‌آورد.

در صورتی که جوش‌ها در حول تار خنثی متعادل نباشد، ارجح است ابتدا جوش‌های نزدیک به‌تار خنثی اجرا گردند (شکل ۶ ـ ۱۴). حتی بهتر است که اندازه جوش نزدیکتر به‌تار خنثی، قدری بزرگتر انتخاب گردد. در شکل ۶ ـ ۱۴ فوقانی که اتصال یک ورق به‌بال تحتانی تیر IPE را نشان می‌دهد، ابتدا باید جوش a و بعد جوش b اجرا گردد. در صورتی که از جزییات شکل سمت راست استفاده گردد، هم تعادل جوش‌ها برقرار شده و هم هر دو جوش به‌صورت تخت و همزمان قابل اجرا هستند.

اغلب لازم می‌شود که برای حصول مقاومت لازم، دو یا چند نیمرخ جدار نازک به‌یکدیگر متصل شوند (شکل ۶ ـ ۱۵). در چنین حالتی کار درستی نیست که ابتدا جوش یک سمت را انجام داده و اجازه دهیم تا سرد شود، و سپس جوش سمت دیگر را انجام دهیم. در این حالت انجام جوش دوم نمی‌تواند انحنای ناشی از جوش اول را کاملاً خنثی نماید. این پدیده با توجه به‌شکل ۶ ـ ۱۵ بدین‌ترتیب توجیه می‌شود که جوش فوقانی باعث گرم شدن بال فوقانی و در نتیجه تحدب کل عضو می‌شود (شکل‌های الف و ب). اگر اجازه دهیم بال و جوش فوقانی به‌دمای محیط برسد، تحدب ازبین رفته و به‌علت انقباض جوش، عضو به‌صورت مقعر در می‌آید (شکل پ). حال اگر در این حالت جوش سمت دیگر انجام شود، نمی‌تواند تمام این تقعر را خنثی نماید. چاره کار این است که بلافاصله بعد از اتمام جوش سمت اول و قبل از سرد شدن بال فوقانی، عضو را برگردانده و جوش سمت دیگر را انجام داد. این روش باعث افزایش انقباض جوش دوم و در نتیجه مستقیم شدن عضو می‌شود.

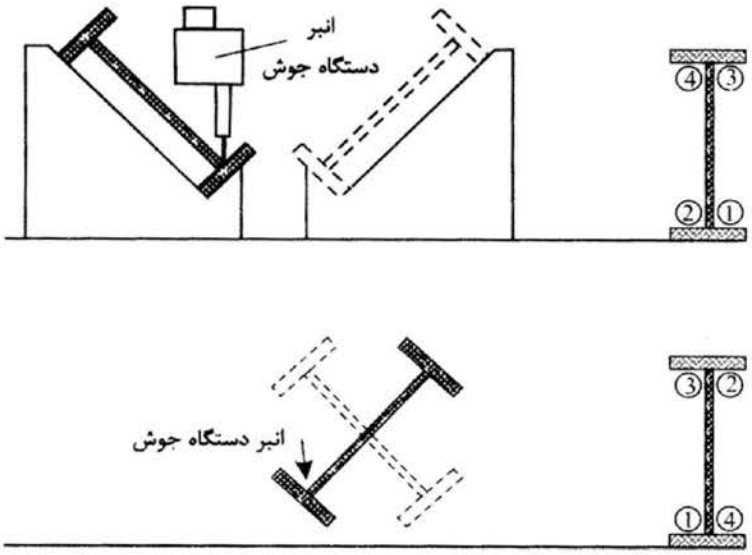


شکل ۶ ـ ۱۴ وقتی که جوش‌ها در حول تار خنثی متعادل نیستند، ارجح است که ابتدا جوش نزدیکتر به‌تار خنثی انجام شود. حتی بهتر است که اندازه جوش آن نیز به‌تناسب افزایش یابد.



شکل ۶ ـ ۱۵ در اتصال چند نیمرخ به‌یکدیگر، جوش طرف دوم باید قبل از سردشدن جوش طرف اول انجام شود و سپس هر دو جوش به‌صورت همزمان سرد گردند.

در شکل ۶ ـ ۱۶، روش انجام جوش خودکار اتصال بال به‌جان تیرورق بدون ایجاد اعوجاج نشان داده شده است. در صورتی که فقط از یک دستگاه جوش استفاده گردد، تیرورق تحت زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه قرار می‌گیرد، تا جوشکاری تقریباً در وضعیت تخت انجام شود. این وضعیت بسیار مطلوب بوده و موجب افزایش سرعت جوشکاری می‌گردد. همچنین شکل زنجیره جوش نیز بهتر شده و می‌توان اندازه دلخواه به‌آن داد.

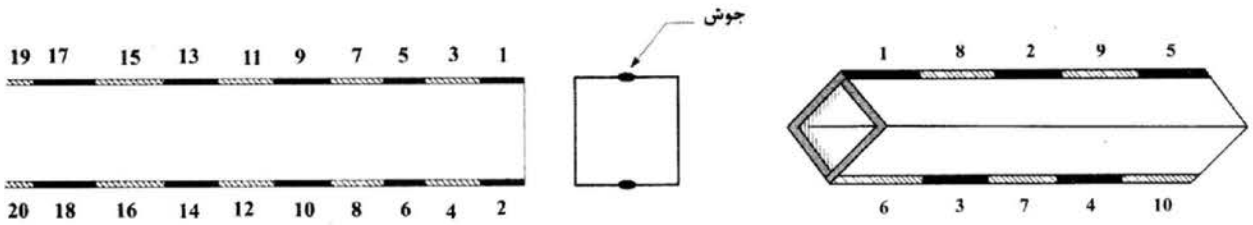


شکل ۶ ـ ۱۶ وضعیت و توالی جوشکاری در اتصال بال به‌جان تیرورق.

در هر سه مورد شکل ۶ ـ ۱۷، طول جوش به‌قسمت‌های ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری (در جوش با الکترود دستی) و ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر (در جوش با الکترود ممتد) تقسیم می‌شود و به‌نوبت مطابق شماره‌ها توسط یک نفر جوشکار یا دو نفر جوشکار (به‌طور همزمان) جوشکاری می‌گردد.

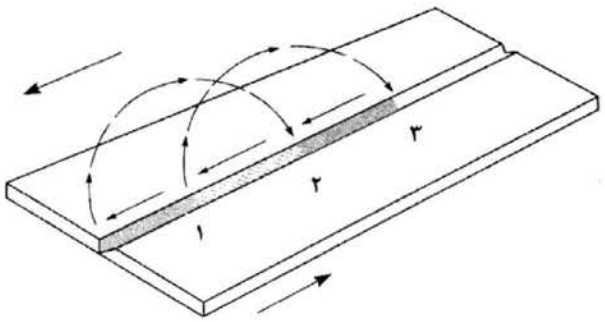
در هر دو مورد شکل ۶ ـ ۱۸، طول جوش به‌قسمت‌های ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر (در جوش با الکترود دستی) و ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متری (در جوش با الکترود ممتد) یا دو نفر جوشکار (به‌طور همزمان) جوشکاری می‌گردد.

در شکل ۶ ـ ۱۹، رواداری‌های مجاز ساخت و تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری، طبق آیین‌نامه AWS ارایه شده است.



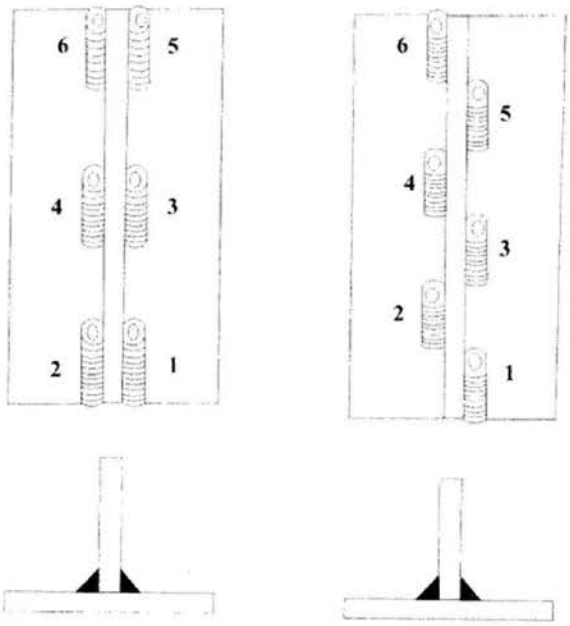
(ب) ترتیب و توالی جوشکاری ساخت قوطی از ناودانی

(الف) ترتیب و توالی جوشکاری ساخت قوطی از نبشی (برگشت به‌عقب پرشی)



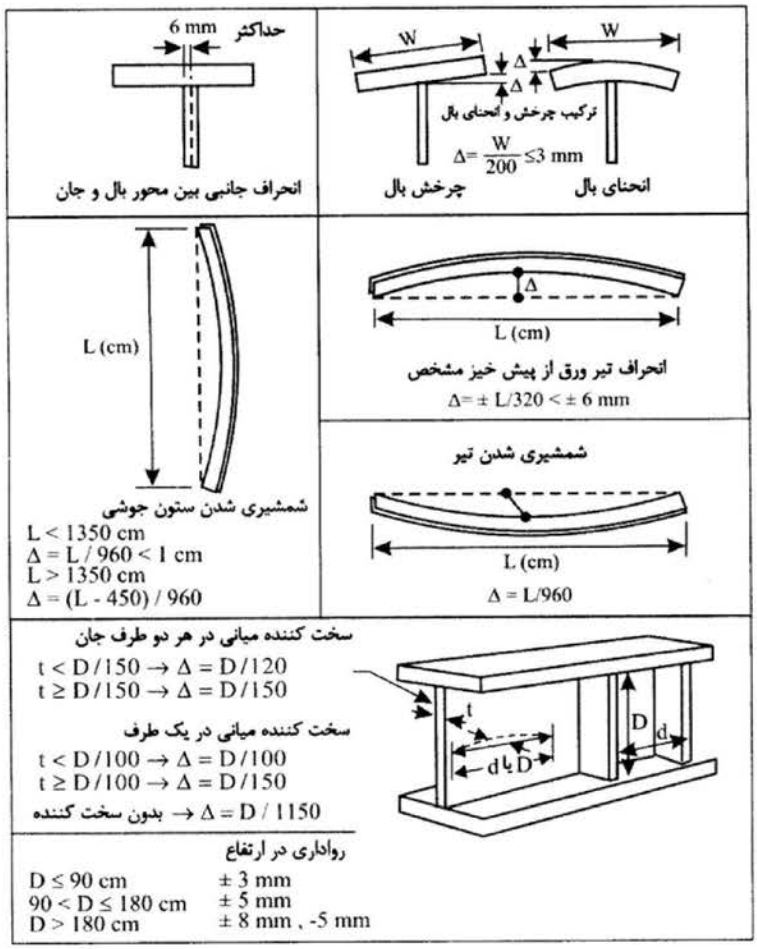
(پ) ترتیب و توالی جوشکاری برگشت به‌عقب، برای کنترل پیچیدگی طولی

شکل ۶ ـ ۱۷ ترتیب و توالی جوشکاری برگشت به‌عقب، برای کنترل پیچیدگی.



روش شطرنجی روش زنجیری

شکل ۶ ـ ۱۸ ترتیب جوشکاری در اتصالات سپری جهت کنترل پیچیدگی.

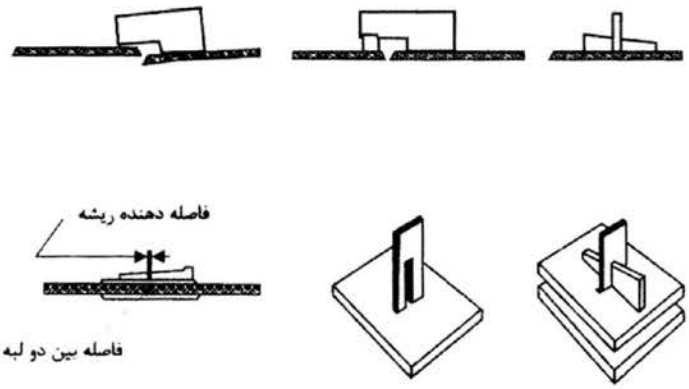


شکل ۶ ـ ۱۹ رواداری‌های مجاز ساخت و تغییرشکل‌های مجاز ناشی از جوشکاری طبق **AWS**.

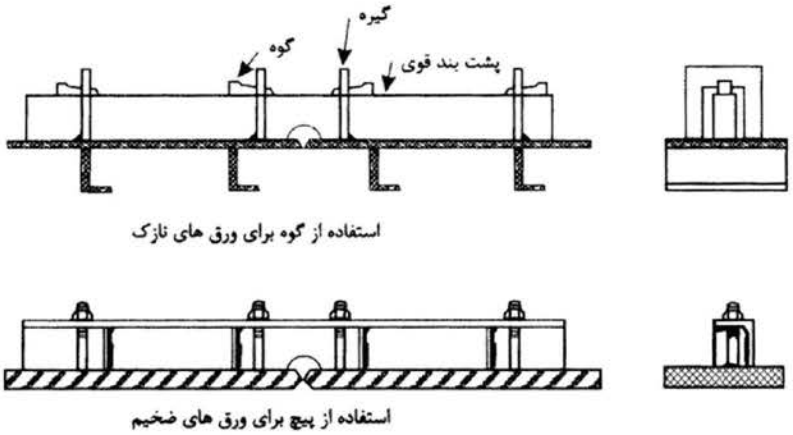
۶ ـ ۸ هم‌راستایی ورق‌ها

به‌منظور هم‌راستا نمودن ورق‌ها و حفظ هم‌راستایی آنها در حین جوشکاری، روش‌های مختلفی وجود دارد. یک روش ساده و متداول استفاده از گوه می‌باشد که در شکل ۶ ـ ۲۰ نشان داده شده است. در حالت ساده، گیره‌هایی به‌لبه یکی از ورق‌ها جوش شده و با فرو راندن گوه‌ای درحد فاصل گیره و ورق دوم، دو لبه ورق مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند.

در قسمت تحتانی شکل ۶ ـ ۲۰ روش دیگری برای هم‌راستا نمودن ورق‌ها به‌کمک گوه نشان داده شده است. این روش لبه‌های ورق را در عرض بزرگتری به‌صورت مستقیم حفظ نموده و از اعوجاج ورق‌ها در حین جوشکاری نیز کم می‌کند. در شکل ۶ ـ ۲۱، در قسمت فوقانی از گوه و در قسمت تحتانی از فشار پیچ برای هم‌راستایی استفاده شده است.



شکل ۶ ـ ۲۰ هم‌راستا نمودن ورق‌ها و حفظ هم‌راستایی در لبه‌های آنها به‌کمک گیره و گوه.



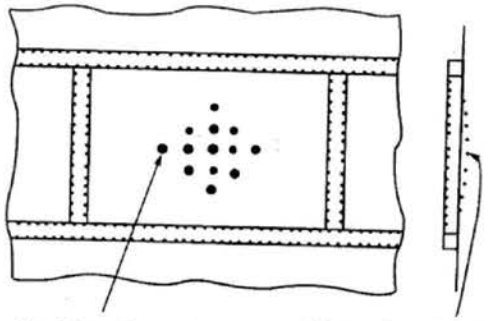
شکل ۶ ـ ۲۱ روش دیگری برای هم‌راستایی ورق‌ها در حین جوشکاری. در جزییات فوقانی از فشار گوه و در قسمت تحتانی از فشار پیچ برای هم‌راستا نمودن ورق‌ها استفاده شده است.

۶ ـ ۹ استفاده از حرارت برای رفع انقباض‌های جوشکاری

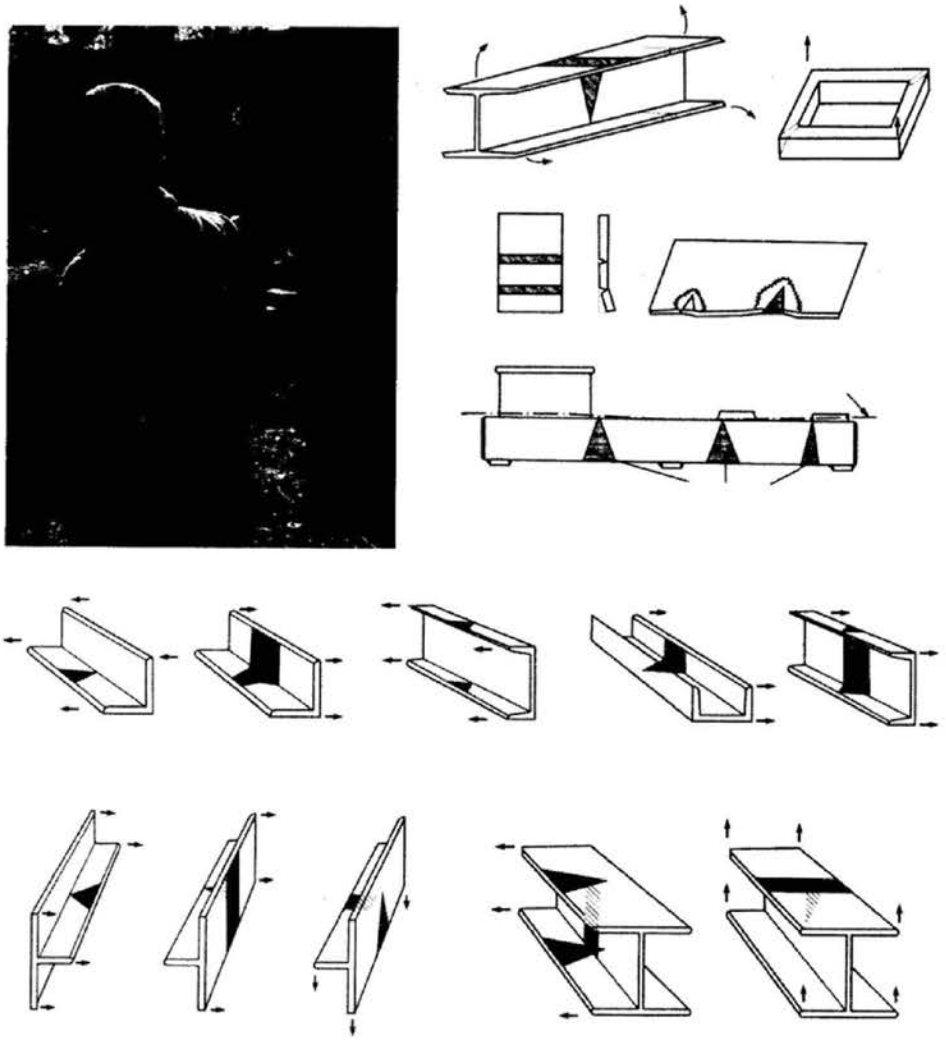
استفاده از حرارت شعله مشعل، روش دیگری برای کاهش و یا از بین بردن آثار انقباضی جوش است. حرارت مشعل باعث انبساط نواحی حرارت دیده می‌گردد. این نواحی توسط نواحی خنکتر احاطه شده است، در نتیجه در هنگام سردشدن، کوتاهتر شده و تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. تکرار عمل حرارت دادن، نهایتاً باعث انقباض می‌گردد.

برای بعضی کارهای دقیق، عملیات اصلاح حرارتی بعد از جوشکاری به‌عمل می‌آید. معایبی نظیر کمانش، شمشیری و ناگونیایی خارج از رواداری را می‌توان به‌روش حرارتی اصلاح نمود.

دمای گرم کردن قطعات برای اصلاح حرارتی حداکثر تا ۶۵۰ درجهٔ سلسیوس مجاز بوده و فقط قطعاتی را می‌توان با استفاده از گرمایش اصلاح نمود که تحت بار نباشند. بعضی روش‌های مهم اصلاح حرارتی پیچیدگی‌ها در شکل‌های۶ ـ ۲۲ و ۶ ـ ۲۳ نشان داده شده است. در شکل ۶ ـ ۲۲ با حرارت دادن نقطه‌ای در محل طبله جان از سمت تحدب اصلاح حرارتی انجام می‌شود.

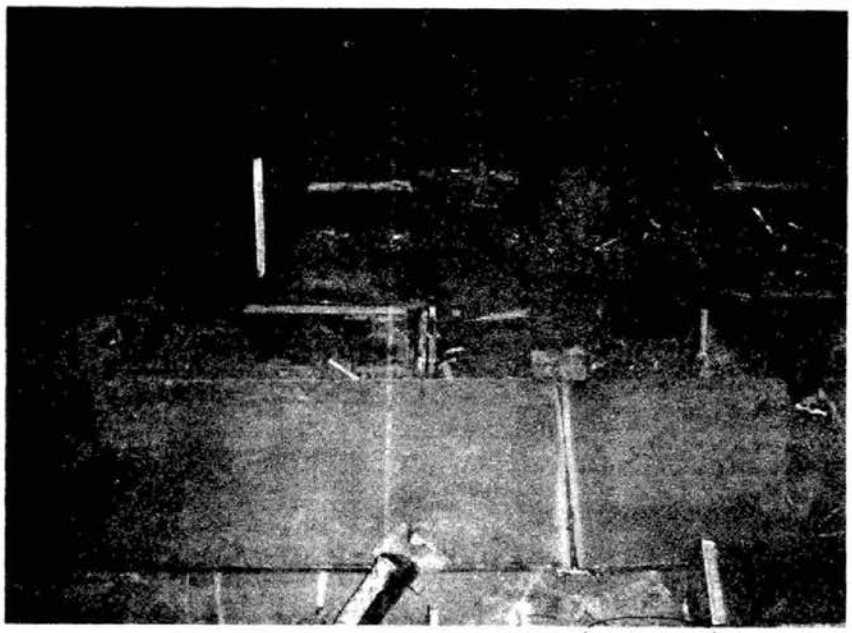


شکل ۶ ـ ۲۲ حرارت دادن نقطه‌ای برای تصحیح طبله شدن.

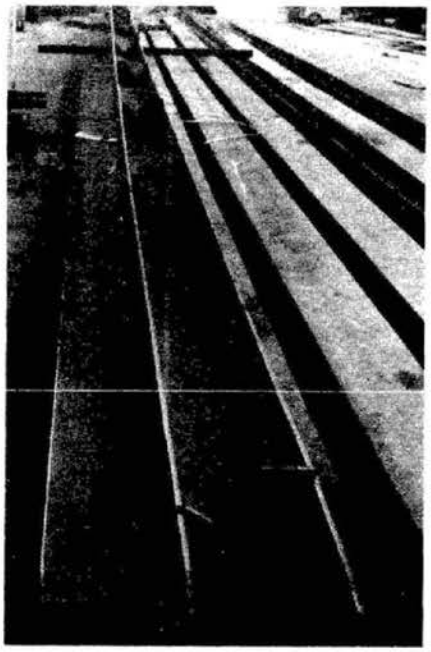


شکل ۶ ـ ۲۳ انواع حرارت دادن موضعی مثلثی برای تصحیح پیچیدگی.

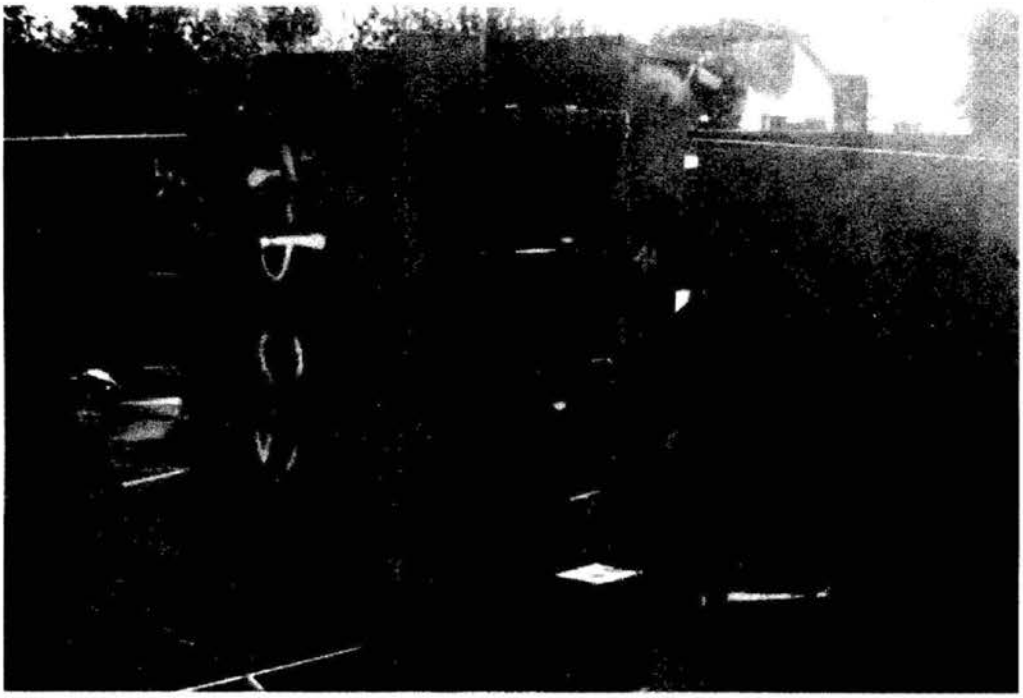
در شکل ۶ ـ ۲۳ روش گرم کردن مثلثی جهت اصلاح حرارتی ورق‌ها و مقاطع نشان داده شده است. در این روش در محل کمانش قطعه در چند نقطه با فاصله‌های مساوی به‌صورت مثلثی حرارت داده می‌شود. در حین گرم کردن، طول به‌علت انبساط حرارتی افزایش می‌یابد ولی پس از سرد شدن، قطعه از وجه گرم‌شده منقبض می‌شود. تعداد نقاط به‌صورت تجربی انتخاب می‌شود.



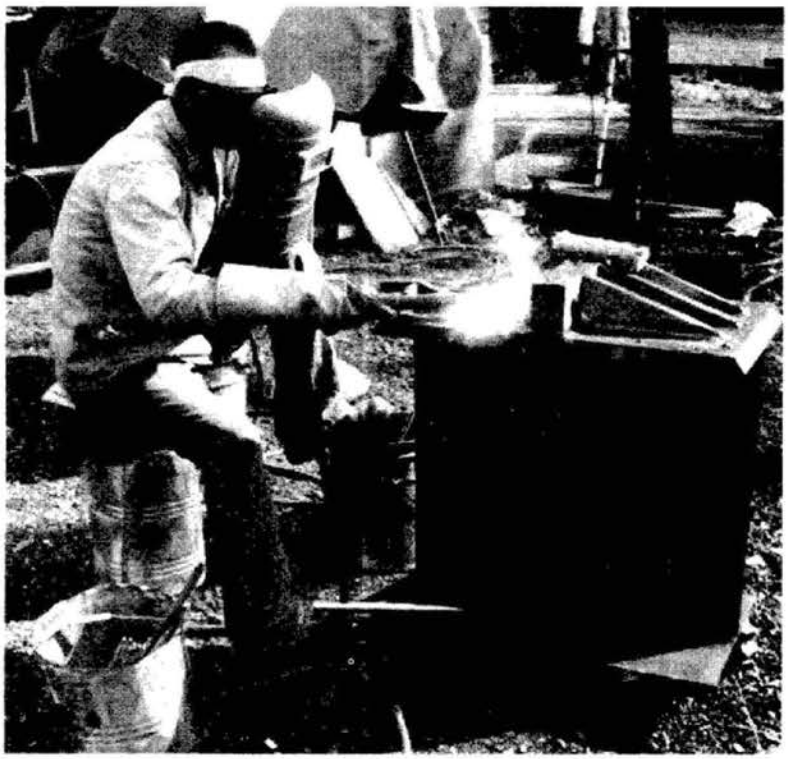
شکل ۶ ـ ۲۴ استفاده از گوه جهت جلوگیری از انقباض زاویه‌ای در جوش شیاری (تسمه‌سازی).



شکل ۶ ـ ۲۵ استفاده از مهار جهت جلوگیری از هلالی‌شدن بال ستون.



شکل ۶ ـ ۲۶ استفاده از مهار پشت‌بند جهت جلوگیری از کاسه‌ای‌شدن صفحه ستون در کارگاه ساخت.



شکل ۶ ـ ۲۷ بستن پشت به پشت قطعات مشابه برای جلوگیری از پیچیدگی.

۶ ـ ۱۰ حرارت تولیدی در هنگام جوشکاری (حرارت القایی به‌علت جوشکاری)

۶ ـ ۱۰ ـ ۱ معرفی

حرارت تولیدی در هنگام جوشکاری با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$J = \frac{60EI}{V} \qquad (۶ - ۴)$$

که در آن:

J = حرارت تولیدی برحسب ژول (وات ثانیه) بر سانتی‌متر (یا ژول بر اینچ)

E = اختلاف پتانسیل قوس برحسب ولت

I = شدت جریان جوشکاری برحسب آمپر

V = سرعت جوشکاری برحسب سانتی‌متر بر دقیقه (یا اینچ بر دقیقه)

چون تمام حرارت تولیدشده در قوس وارد ورق (فلز پایه) نمی‌شود، توصیه می‌شود از ضرایب بازده حرارتی زیر در روابط، نمودارها و نموگرام‌ها استفاده گردد:

۷۵ تا ۸۰ درصد برای جوشکاری دستی

۹۰ تا ۱۰۰ درصد برای جوش قوسی زیرپودری

برای مثال جریان با شدت ۲۰۰ آمپر و سرعت ۱۵ سانتی‌متر بر دقیقه، حرارتی در حدود ۱۹۰۰۰ ژول بر سانتی‌متر با فرض بازده ۸۰ درصد تولید می‌کند. اگر جوشکاری با شدت ۱۸۰ آمپر و سرعت ۵۵ سانتی‌متر بر دقیقه انجام شود، حرارت تولیدی به ۳۸۶۰ ژول بر سانتی‌متر کاهش پیدا خواهد کرد. اگر تحت شرایطی نیاز به‌پیش‌گرمایش باشد، ملاحظه می‌شود که در حالت دوم نیاز به‌پیش‌گرمایش بزرگتری می‌باشد. بنابراین در صورت استفاده از روش‌های جوشکاری که تولید حرارت بزرگتری می‌نماید، می‌توان از مقدار پیش‌گرمایش‌های استاندارد، به‌مقداری کاست، البته به‌شرطی که شرایط سخت برای سردشدن پس از انجام جوش وجود نداشته باشد.

به‌عنوان یک مثال عملی در اتصال ورق جان به‌ورق بال یک تیر I برای تولید جوشی به‌اندازه ۱۰ میلی‌متر، از جوش زیرپودری با شدت ۸۵۰ آمپر و سرعت ۵۰ سانتی‌متر بر دقیقه با حرارت تولیدی ۳۴۰۰۰ ژول بر دقیقه استفاده می‌شود. اگر جوش دو طرف جان به‌طور همزمان اجرا گردد، حرارت تولیدی به‌حدود دو برابر خواهد رسید که برقراری چنین وضعیتی مسلماً در کاهش حرارت پیش‌گرمایش تأثیر خواهد داشت.

در صورت اطمینان از حصول حرارت کافی و پیوسته در حین جوشکاری، این امکان وجود دارد که فقط قسمت ابتدایی کار پیش‌گرم شده و با شروع جوشکاری، عمل پیش‌گرمایش قطع شده و تنها به‌حرارت تولیدی در هنگام جوشکاری اکتفا گردد.

۶ ـ ۱۰ ـ ۲ سرعت خنک شدن

بعد از اتمام جوشکاری، جوش و ورق اطراف آن به‌سرعت خنک می‌شوند. سرعت خنک شدن بستگی به‌عوامل زیر دارد:

در اولویت اول:

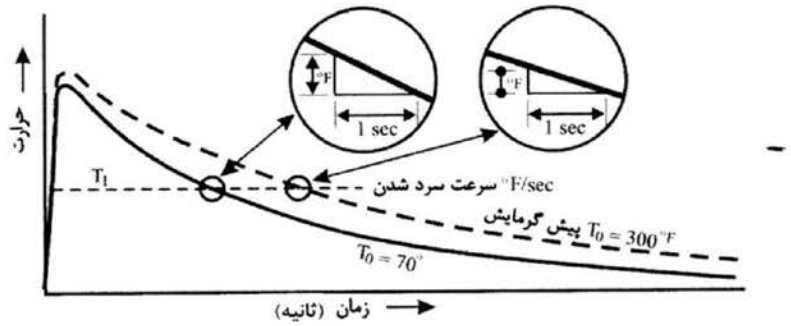
- دمای اولیه ورق (T_o) (شامل اثر پیش‌گرمایش)
- دمای تولیدی در هنگام جوشکاری

در اولویت دوم:

- ظرفیت جذب حرارتی ورق برحسب ضخامت آن و هندسه درز.

شکل ۶ ـ ۲۸ نشان‌دهنده نمودار کاهش دما برحسب زمان در ناحیه تفتیده فلز پایه پس از اتمام جوشکاری می‌باشد. برحسب شرایط موجود، شیب این منحنی می‌تواند متفاوت باشد.

برحسب ترکیبات شیمیایی ورق، برای یک دمای مشخص مثل T_1، یک سرعت خنک شدن بحرانی R_{cr} وجود دارد که اگر سرعت واقعی بزرگتر از آن باشد، ترک در زیر نوار جوش به‌وجود می‌آید. حدود دمای T_1 بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. برای بحث حاضر درجه حرارت T_1 در حدود ۳۰۰ درجه سلسیوس فرض می‌گردد.



شکل ۶ ـ ۲۸ سرعت سرد شدن جوش.

مطالعات مربوط به‌سرعت خنک شدن اکثراً بر پایه دو حالت حدی قرار دارند:

۱ ـ *ورق‌های نازک:* که در آنها ترکیب حرارت تولیدی و ضخامت ورق طوری است که دما در ضخامت ورق در هر نقطه ثابت بوده و حرارت در امتداد عرضی در دو جهت انتقال می‌یابد (شکل ۶ ـ ۲۹). برای چنین شرایطی سرعت سردشدن برابر خواهد شد با :

$$R = K_1 \left(\frac{t}{J}\right)^2 (T_1 - T_o)^3 \qquad (۶ - ۵)$$

شکل ۶ ـ ۲۹

۲ ـ ورق‌های ضخیم:

که در آنها ترکیب حرارت تولیدی و ضخامت ورق طوری است که بتوان فرض نمود دمای سطح تحتانی ورق افزایش نمی‌یابد، به‌عبارت دیگر، حرارت مطابق شکل ۶ ـ ۳۰ در سه امتداد انتشار می‌یابد. در نتیجه سرعت سردشدن برابر است با:

$$R = \frac{K_2}{J}(T_1 - T_o)^2 \qquad (۶ - ۶)$$

که در آن:

R= سرعت خنک شدن در دمای T_1 (فارنهایت بر ثانیه)

T_1= دمایی که سرعت سردشدن در آن مورد توجه می‌باشد (۵۷۲ درجه فارنهایت معادل ۳۰۰ درجه سیلسیوس)

T_o= دمای اولیه ورق یا دمای پیش‌گرمایش وقتی که از پیش‌گرمایش استفاده می‌گردد (فارنهایت)*

K= ضریب هدایت حرارتی (برحسب بی تی یو بر ساعت بر فوت مربع سطح که بر گرادیان حرارتی تقسیم شده است. گرادیان حرارتی نیز برحسب درجه فارنهایت بر ضخامت بیان می‌گردد). مقدار K برای فولاد نرمه در دمای ۵۷۲ درجه فارنهایت مساوی ۲۵/۹ است.

K_1= ثابتی که نماینده K، ρ و C در دمای T_1 است. مقدار آن برای فولاد نرمه مساوی ۱۶۱/۴۸ در دمای ۵۷۲ درجه فارنهایت است.

K_2= ثابتی که نماینده K در دمای T_1 است. مقدار آن برای فولاد نرمه مساوی ۵/۹۶۱ در دمای ۵۷۲ درجه فارنهایت است.

ρ = چگالی برحسب پوند بر فوت مکعب. برای فولاد نرمه مقدار آن مساوی ۴۸۹/۶ پوند بر فوت مکعب است.

C= گرمای ویژه برحسب بی تی یو بر پوند بر درجه فارنهایت. مقدار آن برای فولاد نرمه مساوی ۰/۱۳۶ بی تی یو بر پوند در دمای ۵۷۲ درجه فارنهایت می‌باشد.

t= ضخامت واقعی ورق برحسب اینچ

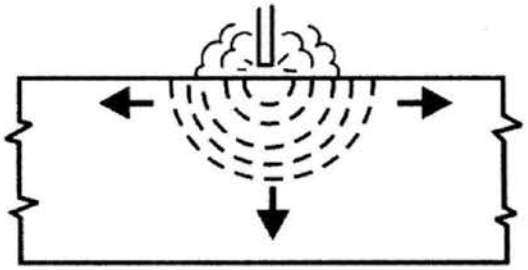
J= گرمای تولیدی جوش (رابطه ۶ ـ ۴)

---

* جهت تبدیل دما برحسب درجه‌بندی فارنهایت به سیلسیوس و برعکس از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$C = \frac{5}{9}(F - 32)$$

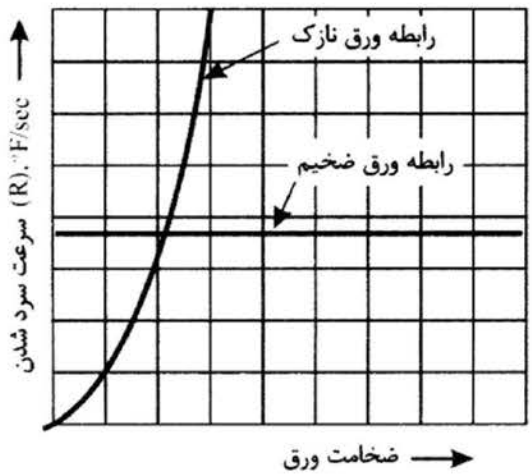
$$F = 1.8C + 32$$



شکل ۶ ـ ۳۰

متأسفانه مرزبندی دقیقی بین ورق نازک و ورق ضخیم در ارتباط با سرعت خنک شدن وجود ندارد. شرایط واقعی غالباً بین شرایط حدی قرار دارند و اکثراً در تمام موارد باید از قضاوت مهندسی استفاده نمود. برای مثال جوشکاری بر روی ورقی به‌ضخامت ۱ اینچ یا جوش قوسی زیرپودری با شدت جریان ۱۰۰۰ آمپر و سرعت ۱۰ اینچ بر دقیقه به‌شرایط ورق نازک نزدیک خواهد شد در مقابل جوشکاری دستی ورق سه چهارم اینچ در حالت تخت با شدت جریان ۱۲۰ آمپر و سرعت ۱۲ اینچ بر دقیقه به‌شرایط ورق ضخیم نزدیک خواهد شد.

در شکل ۶ ـ ۳۱، روابط ۶ ـ ۵ و ۶ ـ ۶ در مقابل ضخامت ورق رسم شده‌اند.



شکل ۶ ـ ۳۱

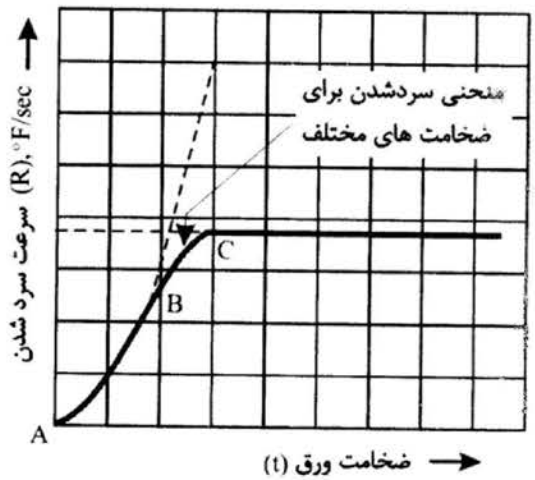
در رابطهٔ ورق نازک، ضخامت t با توان ۲ در سرعت خنک شدن تأثیر دارد و با افزایش ضخامت ورق، سرعت خنک شدن به‌سرعت افزایش می‌یابد. در مقابل در رابطه ورق ضخیم ملاحظه می‌گردد که خنک شدن تابعی از ضخامت نمی‌باشد. سرعتی که از رابطه ورق ضخیم به‌دست می‌آید، حداکثر سرعت خنک شدن بدون توجه به‌ضخامت

ورق می‌باشد. در نتیجه با تلفیق دو نمودار شکل ۶ ـ ۳۱، نمودار شکل ۶ ـ ۳۲ برای تعیین خنک شدن به‌دست می‌آید (نمودار با خط توپُر).

نمودار شکل ۶ ـ ۳۲ را می‌توان با روابط زیر تعریف نمود:

از A تا B:

$$R = 161.48\left(\frac{t}{J}\right)^2 (572 - T_o)^3 \qquad (۶ ـ ۷)$$



شکل ۶ ـ ۳۲

از B تا C:

$$R = 5.961\frac{(572 - T_o)^2}{J}\left(-27.09t^2\frac{(572 - T_o)}{J} + 14.72\,t\sqrt{\frac{572 - T_o}{J}} - 1\right) \qquad (۶ ـ ۸)$$

از رابطه ۶ ـ ۷، سرعت پیش‌گرمایش T_o به‌راحتی برحسب سرعت خنک شدن محاسبه می‌شود. لیکن از رابطهٔ ۶ ـ ۸ به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، چون برای دمای پیش‌گرمایش بخصوصی ترسیم شده است. برای استفاده عملی روابط ۶ ـ ۷ و ۶ ـ ۸ به‌صورت بی‌بعد زیر نوشته می‌شوند:

از A تا B (قسمت تحتانی)

$$\frac{t}{t_{me}} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{T_I - T_{o/me}}{T_I - T_o}\right)^3} \qquad (۶ ـ ۹)$$

از B تا C (قسمت فوقانی):

$$\frac{t}{t_{me}} = \sqrt{\frac{T_I - T_{o/me}}{T_I - T_o}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \left(\frac{T_I - T_{o/me}}{T_I - T_o}\right)^2}\right) \qquad (۶ ـ ۱۰)$$

که در آن:

t= ضخامت واقعی (اینچ)

t_{me}= حداکثر ضخامت مؤثر برحسب مقادیر J و R طبق رابطهٔ زیر:

$$t_{me} = 0.4246 \sqrt[4]{\frac{J}{R}} \qquad (۶ - ۱۱)$$

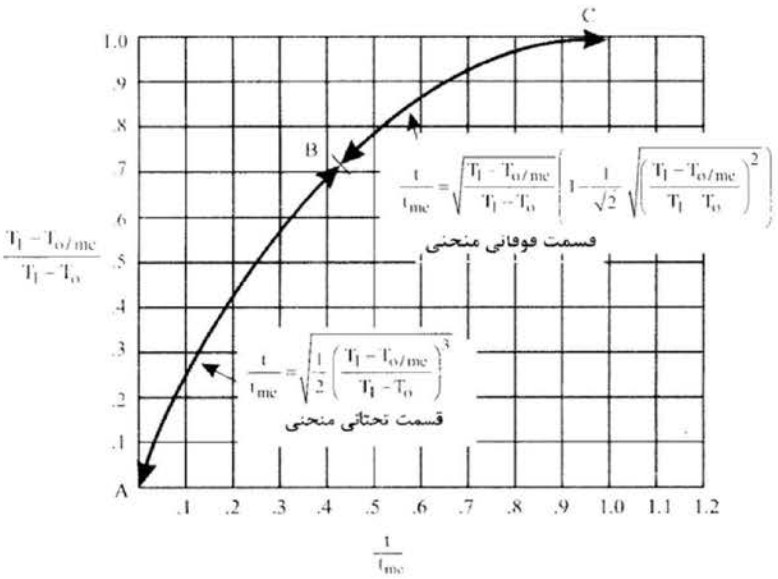
T_1= دمای تخمینی که در آن سرعت خنک شدن مورد نظر است (۵۷۲° F مساوی ۳۰۰°C)

T_o= دمای پیش‌گرمایش برای مقادیر مشخص J، R، t (درجه فارنهایت)

T_o/me= حداکثر دمای مؤثر پیش‌گرمایش برای مقادیر معلوم J و R (درجه فارنهایت)

$$T_1 - T_{o/me} = \sqrt{\frac{RJ}{5.961}} \qquad (۶ - ۱۲)$$

به‌کمک روابط ۶ ـ ۹ و ۶ ـ ۱۰ می‌توان نمودار شکل ۶ ـ ۳۳ را رسم نمود. از این نمودار می‌توان برای تعیین دمای پیش‌گرمایش T_o استفاده نمود.



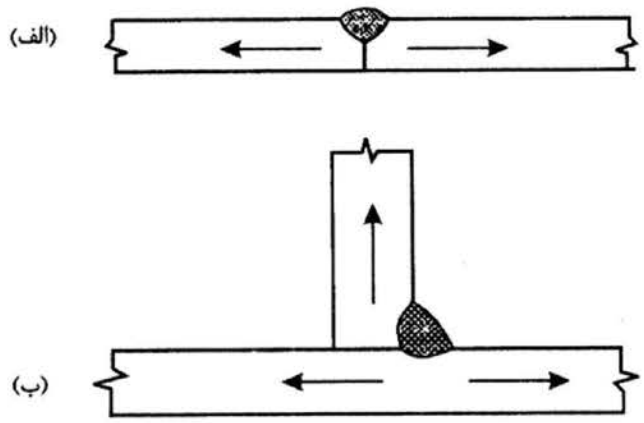
شکل ۶ ـ ۳۳

۶ ـ ۱۰ ـ ۳ جریان دمای دوبعدی در مقابل سه‌بعدی

مطالب ارایه‌شده در قسمت قبل مربوط به‌حالاتی می‌شد که برای انتقال حرارت دو راه خروجی وجود داشت (مانند شکل ۶ ـ ۳۴ ـ الف). مواردی پیش می‌آید که همانند شکل ۶ ـ ۳۴ ـ ب، سه راه خروج حرارت وجود دارد. در صورت برخورد با این موارد، روش ارایه‌شده در فصل قبل باید به‌صورت زیر اصلاح گردد:

۱ ـ استفاده از $\frac{۲}{۳}$ حرارت تولیدشده در هنگام جوشکاری (J) یا

۲ ـ اصلاح ضخامت ورق t برای منظور نمودن ورق سوم؛ برای این کار ضخامت هر ورق فرضی در حالت دوبعدی، مساوی نصف مجموع سه ورق موجود در نظر گرفته می‌شود.



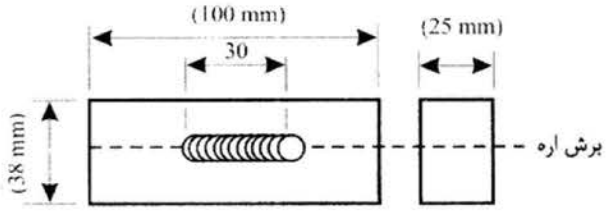
شکل ۶ ـ ۳۴

۶ ـ ۱۰ ـ ۴ کربن معادل

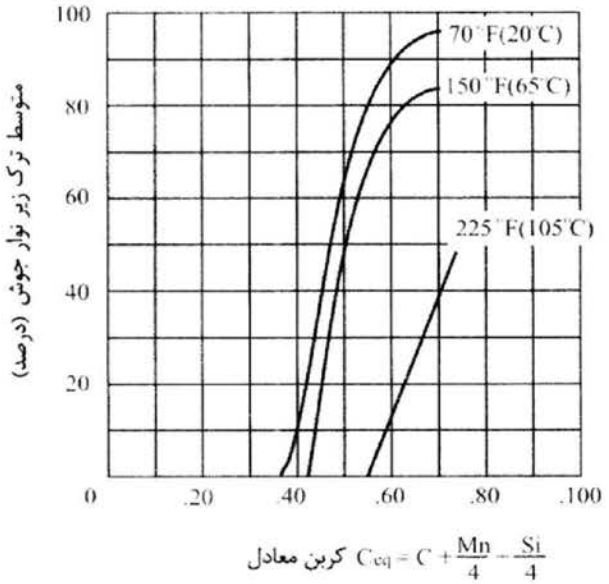
بر پایه تحقیقات انجام‌شده و با استفاده از معیار وقوع ترک در زیر نوار جوش، می‌توان تأثیر تمام عناصر شیمیایی موجود در فولاد را به اثر کربن تبدیل نمود. رابطه‌ای که برای این منظور به‌کار گرفته می‌شود، به‌رابطه کربن معادل معروف است. یکی از روابط پیشنهادی که قابل استفاده برای فولادهای کم‌کربن و کم‌آلیاژ در کارهای ساختمانی و ماشین‌سازی است، به‌صورت زیر می‌باشد:

$$C_{eq} = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Ni\%}{20} + \frac{Cr\%}{10} - \frac{Mo\%}{50} - \frac{V\%}{10} + \frac{Cu\%}{40} \qquad (۱۳ ـ ۶)$$

شکل ۶ ـ ۳۵ یک نمونه آزمایشی از ورقی به‌ضخامت ۱ اینچ را نشان می‌دهد که در روی آن نوار جوشی به‌اندازه $\frac{۱}{۸}$ اینچ (۳میلی‌متر) با الکترود E6010 با شدت ۱۰۰ آمپر و ولتاژ ۲۵ ولت، جریان متناوب و با سرعت ۱۰ اینچ بر دقیقه انجام شده است. نمودار شکل ۶ ـ ۳۶ نشان‌دهنده درصد وقوع ترک‌های زیر نوار جوش برحسب درصد کربن معادل می‌باشد. اگر همین نمونه با الکترود کم‌هیدروژن E7018 انجام شود، هیچ‌گونه ترکی در زیر نوار جوش ملاحظه نمی‌شود. توجه شود که منحنی‌های ارایه‌شده در شکل ۶ ـ ۳۶ برای سه دمای پیش‌گرمایش مختلف می‌باشد.



شکل ۶ ـ ۳۵



شکل ۶ ـ ۳۶

۶ ـ ۱۰ ـ ۵ سرعت خنک شدن و کربن معادل

برای هر ترکیبی از عناصر شیمیایی فولاد، سرعت خنک شدن حداکثری وجود دارد که باعث هیچ‌گونه ترک عمقی در زیر نوار جوش نمی‌شوند. هر چه درصد کربن معادل بزرگتر باشد، مقدار این سرعت حداکثر (مجاز) کمتر می‌شود. بنابراین نتیجه می‌شود هر چه درصد کربن معادل بزرگتر باشد، احتمال وقوع ترک‌های زیر نوار جوش (عمقی) بزرگتر شده و نیاز بیشتری به‌استفاده از الکترود کم‌هیدروژن وجود دارد.

کوترل و براداستریت بر پایه روش آزمایشی ابداعی، منحنی شکل ۶ ـ ۳۷ را برای تعیین سرعت خنک شدن بحرانی (حداکثر) در مقابل درصد کربن معادل پیشنهاد نمودند. این منحنی را می‌توان به‌صورت رابطهٔ زیر نشان داد:

$$R_{cr} = \frac{6.598}{C_{eq} - 0.3074} - 16.26 \qquad (۱۴ ـ ۶)$$

رابطهٔ فوق و منحنی شکل ۶ ـ ۳۷، سرعت خنک شدن بحرانی را در دمای $T_I = 572$ درجه فارنهایت نشان می‌دهد.

۶ ـ ۱۰ ـ ۶ تعیین دمای پیش‌گرمایش

به‌منظور تعیین دمای پیش‌گرمایش لازم (T_o) به‌طوری که برای حرارت تولیدی مشخص (J) و ضخامت ورق (t)، سرعت خنک شدن مورد نظر (R) را نتیجه دهد، روش ریاضی زیر پیشنهاد شده است:

۱ ـ با استفاده از رابطه ۶ ـ ۱۲ مقدار $(T_1 - T_{0/me})$ را تعیین نمایید.

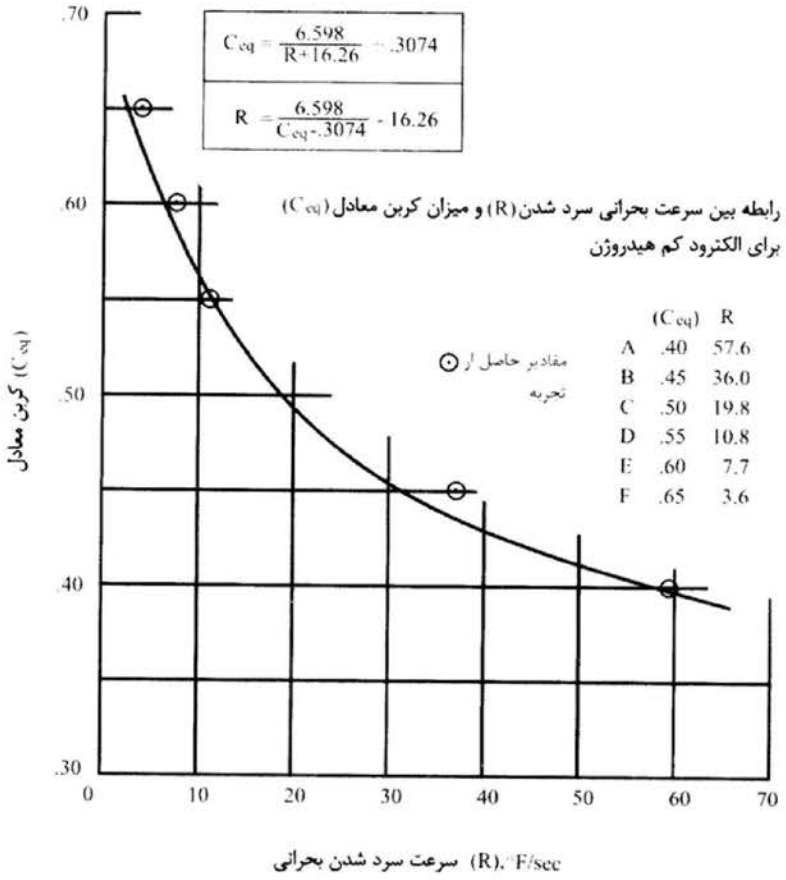
۲ ـ با استفاده از رابطه ۶ ـ ۱۱ مقدار t_{me} را تعیین کنید.

۳ ـ با استفاده از نتایج گام ۲ مقدار (t/t_{me}) را تعیین کنید.

۴ ـ با استفاده از نمودار شکل ۶ ـ ۳۳ و استفاده از نتایج گام ۳، مقدار زیر را تعیین کنید.

$$\left(\frac{T_1 - T_{o/me}}{T_1 - T_o}\right)$$

۵ ـ با استفاده از نتیجه گام ۴، و مقدار $(T_1 - T_{o/me})$ از گام ۱، دمای پیش‌گرمایش لازم (T_o) به‌دست می‌آید.



شکل ۶ ـ ۳۷

مثال ۶ ـ ۴

$$J = 20000 \frac{watt - sec}{inch}$$

$$R = 25^\circ F/sec(14^\circ C/sec)$$

$$t = 1\ inch = 25mm$$

مطلوب است، تعیین دمای پیش‌گرمایش(T_o)

گام ۱:

$$T_1 - T_{o/me} = \sqrt{\frac{RJ}{5.961}} = \sqrt{\frac{25 \times 20000}{5.961}} = 289.6^\circ F$$

گام ۲:

$$t_{me} = 0.42457 \sqrt[4]{\frac{J}{R}} = 0.42457 \sqrt[4]{\frac{20000}{25}} = 2.26''$$

گام ۳: تعیین ضخامت نسبی

$$\frac{t}{t_{me}} = \frac{1''}{2.26''} = 0.4428$$

گام ۴ : به‌کمک شکل ۶ ـ ۳۳، دمای پیش‌گرمایش نسبی به‌دست می‌آید:

$$\frac{T_1 - T_{o/me}}{T_1 - T_o} = 0.73$$

$$T_1 - T_o = \frac{T_1 - T_{o/me}}{0.73} = \frac{289.6}{0.73} = 396.7$$

گام ۵: بنابراین

$$T_1 = 572^\circ F$$

$$572 - T_o = 396.7$$

$$T_o = 175.3^\circ F = 80^\circ C$$

۶ ـ ۱۰ ـ ۷ ملاحظات جنبی

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در ورق‌های نازک سرعت خنک شدن بیش از چیزی است که آزمایش نشان می‌دهد. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که ورق‌های نازک سطح وسیع‌تری برای تبادل حرارت دارند.

معمولاً در تحقیقات مربوط به‌جوش شیاری، آخرین عبور جوش که شیار را پر می‌کند (پاس سطحی)، بیشتر از جوش عبور اول (پاس ریشه) مورد توجه قرار می‌گیرد. این موضوع از آن جهت است که سرعت خنک شدن این جوش به‌علت مقطع بزرگتر، بیشتر از سرعت پاس ریشه است.

نشانه‌هایی وجود دارد که سرعت خنک شدن جوش گوشه بزرگتر از جوشی است که در کارهای تحقیقاتی در روی ورق داده می‌شود. این مسئله به‌علت وجود دو ورق متعامد در محل درز جوش گوشه می‌باشد که سطح تبادل حرارت بزرگتری را به‌وجود می‌آورد. این موضوع در مورد جوش شیاری نیز صادق است.

۶ ـ ۱۱ جمع‌بندی مطالب فصل

انقباض عرضی

۱ ـ بستگی به‌درجه گیرداری دارد.
۲ ـ مقدار آن در حدود ۱۰ درصد متوسط درز جوش است.
۳ ـ مقدار آن با افزایش سطح مقطع جوشکاری، افزایش می‌یابد.
۴ ـ مقدار آن با افزایش دهانه ریشه و شیب پخی لبه، افزایش می‌یابد.
۵ ـ مقدار آن متناسب با دمای القایی در هنگام جوش است.

انقباض زاویه‌ای می‌تواند با تدابیر زیر کاهش یابد

۱ ـ استفاده از جوش‌های جناغی (V) و لایه‌ای (U) دو طرفه.
۲ ـ انجام جوش‌های پشت و رو به‌صورت یک در میان.
۳ ـ پخ زدن لبه به‌منظور کاهش بازوی لنگر و درنتیجه کاهش اعوجاج.
۴ ـ استفاده از جوش‌های گوشه با اندازه کم. مقدار انحنا با توان ۱/۳ اندازه جوش متناسب می‌باشد.
۵ ـ استفاده از ورق بال ضخیم‌تر. مقدار انحنا نسبت عکس با توان دوم ضخامت دارد.

انحنای طولی اعضا به‌علت نوارهای طولی جوش (شمشیری شدن)

۱ ـ متعادل کردن جوش‌ها در حول محور خنثای مقطع به‌دو روش زیر:

الف ـ هم‌اندازه کردن جوش‌های هم‌فاصله در دو طرف تار خنثی.
ب ـ در صورتی که جوش‌های دو طرف تار خنثی هم‌اندازه نباشند، اندازه جوش‌هایی که در فاصله نزدیکتری نسب به‌تار خنثی قرار دارند، باید افزایش داده شود.

۲ ـ اگر جوش‌ها نسبت به‌تار خنثی متقارن نباشند، می‌توان از تدابیر زیر استفاده نمود:

الف ـ پیش‌انحنای عضو (پیش‌خیز)
ب ـ تکیه دادن عضو در نواحی میانی و طره کردن دو انتهای آن، به‌طوری‌که عضو به‌صورت محدب درآمده و این تحدب در هنگام جوشکاری به‌صورت مستقیم درآید.
پ ـ تقسیم کردن عضو به‌مجموعه‌های کوچکتر، به‌طوری‌که که جوشکاری در مقطع در هر مجموعه به‌صورت متقارن باشد. اگر بال طویل‌تر یک عضو خمیده، حرارت داده شود، به‌صورت مستقیم درمی‌آید.

روش‌های مناسب برای کنترل اعوجاج

۱ ـ بستن عضو به‌شاسی کار و نگهداری آن در حین جوشکاری.

۲ ـ تنظیم لبه‌ها و ورق‌ها به صورت غیرهم‌راستا، به‌طوری‌که بعد از جوش به‌صورت مستقیم درآیند.

۳ ـ پیش‌انحنای عضو (پیش‌خیز)

۴ ـ بستن دو عضو به‌صورت پشت به پشت با مقداری پیش‌انحنا (استفاده از پشت‌بند).

۵ ـ استفاده از گیره و قالب (در نهایت باعث افزایش تنش پسماند می‌شود).

۶ ـ پیش‌بینی فاصله برای خنثی کردن انقباض در هنگام مونتاژ قطعات.

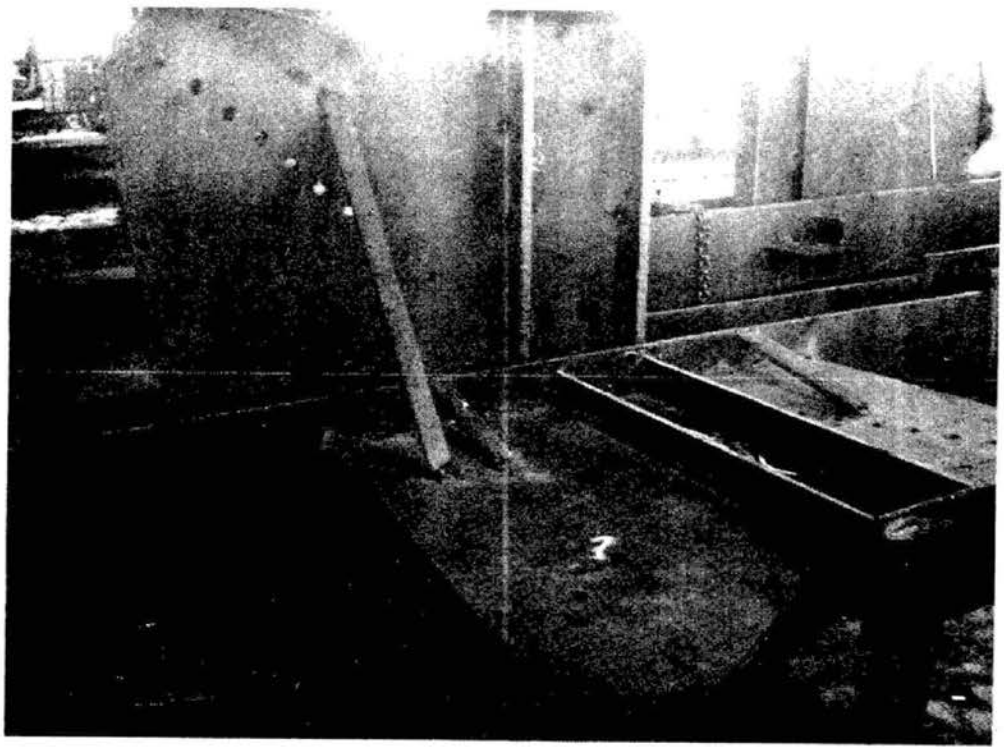
۷ ـ امکان آزادی حرکت برای قطعات در هنگام جوشکاری.

۸ ـ تقسیم قطعات اصلی به‌قطعات کوچکتر و سپس سر هم‌کردن قطعات.

۹ ـ ابتدا قطعات انعطاف‌پذیرتر جوش داده شوند، به‌طوری‌که راست کردن آنها ساده باشد.

شکل ۶ ـ ۳۸ جوشکاری دستک روی ستون به‌صورت ضربدری توسط دو جوشکار.

شکل ۶ ـ ۳۹ استفاده از روش اصلاح حرارتی در کارگاه ساخت جهت اصلاح ناگونیایی دستک روی ستون.



شکل ۶ ـ ۴۰ استفاده از میله به‌عنوان مهار جهت جلوگیری از اعوجاج زاویه‌ای در جوش ورق بادبند.

۷ بازرسی جوش ـ بازرسی چشمی (عینی)

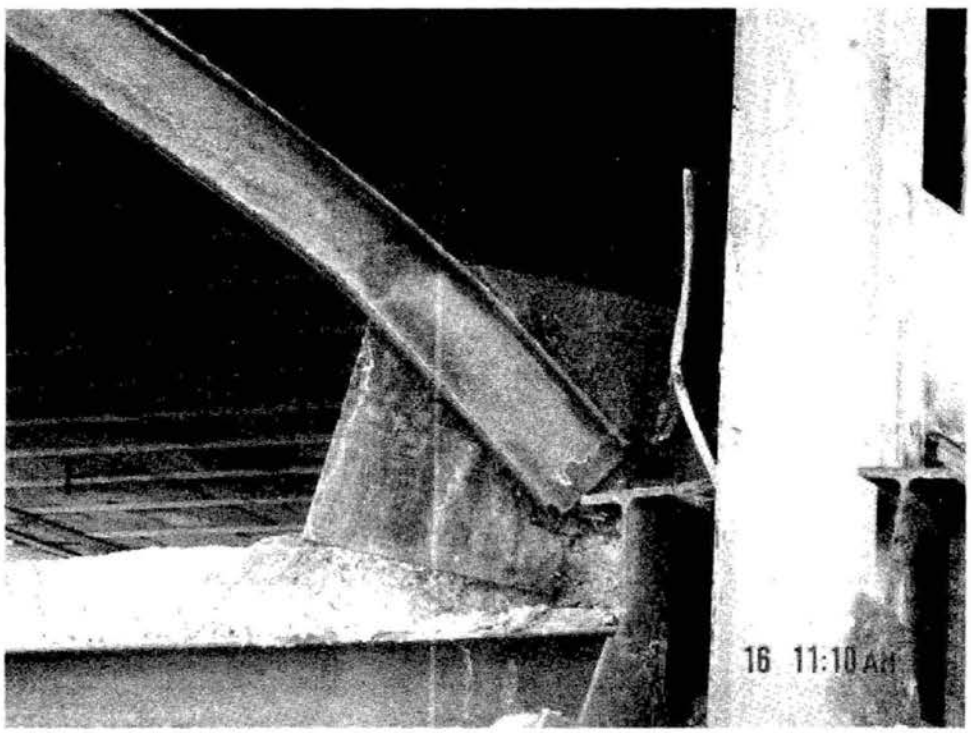
۷ـ۱ مقدمه ۱۹۱
۷ـ۲ زمان شروع نظارت و بازرسی ۱۹۲
۷ـ۳ پنج دستورالعمل برای حصول کیفیت در جوش ساختمانی ۱۹۳
۷ـ۴ نظارت‌های پیشگیرانه (PM) ۱۹۸
۷ـ۵ بازرسی عینی (V.I.) ۱۹۹
۷ـ۵ـ۱ اصول بازرسی چشمی (عینی) جوش ۱۹۹
۷ـ۵ـ۲ وظایف عمدهٔ بازرسی جوش ۲۰۵
۷ـ۵ـ۳ وسایل بازرسی چشمی (عینی) جوش ۲۰۶
۷ـ۵ـ۴ اندازه‌گیری جوش ۲۰۷
۷ـ۶ ضوابط پذیرش بازرسی چشمی (عینی) جوش ۲۱۰
۷ـ۷ رواداری‌های عیوب ظاهری جوش در بازرسی چشمی (عینی) طبق ISO 5817 ..... ۲۱۳
۷ـ۸ چک‌لیست بازرسی چشمی (عینی) ۲۱۸

۷ بازرسی جوش ـ بازرسی چشمی (عینی)

۷ ـ ۱ مقدمه

در عمل موارد متعددی وجود دارد که به‌علت عدم برآورده شدن مشخصات فنی، مقطع جوشکاری شده دچار گسیختگی شده و خسارات زیادی را به‌بار آورده است.

اگر جوش مطابق مشخصات فنی و طبق دستورالعمل‌های کیفی اجرا شود، فقط در حالتی که نیروی وارده بزرگتر از مقاومت جوش است، می‌تواند گسیخته شود. اما اگر اجرای جوش همراه با عیب باشد، گسیختگی می‌تواند تحت نیروی کمتری نیز به‌وقوع پیوندد (شکل ۷ ـ ۱).



شکل ۷ ـ ۱ گسیختگی جوش در زلزلهٔ بم.

برای هر عیب جوش علتی منطقی و برای اصلاح و تعمیر آن نیز روشی منطقی وجود دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت اغلب عیوب جوش مربوط به‌روش جوشکاری، صلاحیت جوشکار، آماده‌سازی درز و دستورالعمل جوشکاری بوده که در حین کار می‌تواند مورد بازرسی و ارزیابی قرار گیرد.

منشأ بعضی عیوب که در جوش و فلز پایه ممکن است یافت شود، عبارتند از:

- عیوبی که ممکن است طی ساخت مواد خام به‌وجود آیند (ناخالصی‌های سرباره، حفره‌های گازی، حفره‌های انقباضی، ترک‌های تنشی و ....)
- عیوبی که ممکن است طی ساخت قطعات به‌وجود آیند (عیوب جوشکاری، عیوب عملیات حرارتی، ترک‌های ناشی از تنش‌های پسماند و ....)
- عیوبی که ممکن است طی مونتاژ قطعات به‌وجود آیند (مونتاژ نادرست، ترک‌های ناشی از تنش اضافی و ....)
- عیوبی که در مدت کاربری و حمل و نقل به‌وجود می‌آیند (خستگی، خوردگی، سایش، خزش، ناپایداری حرارتی و ....)

به‌کارگیری هر یک از سیستم‌های بازرسی متحمل هزینه است، اما اغلب استفادهٔ مؤثر از روش‌های بازرسی مناسب، موجب صرفه‌جویی‌های مالی قابل ملاحظه‌ای خواهد شد. نه فقط نوع بازرسی، بلکه مراحل به‌کارگیری آن نیز مهم است. وقتی آزمایش‌های غیرمخرب، علاوه بر بازرسی عینی مورد نیاز باشد، باید اطلاعاتی از قبیل نوع جوش‌هایی که باید آزمایش شوند، درصدی از جوش‌ها که باید تحت آزمایش قرار گیرند و روش‌های آزمایش در مشخصات فنی ذکر شوند.

۷ ـ ۲ زمان شروع نظارت و بازرسی

این تصمیم که نظارت و تأیید بعد از اتمام جوشکاری انجام شود، خطرناک است و روش مناسبی برای آگاهی از کیفیت جوش نیست. این کار نوش‌داروی بعد از مرگ است و مشابه عملکرد پلیس انتهای خیابان ورود ممنوع می‌باشد.

به‌طور کلی کیفیت نهایی هر کار به‌دو روش به‌کیفیت مطلوب نزدیک می‌گردد:

الف) از طریق برنامه‌های تضمین کیفیت (Q.A = Quality Assurance)

ب) از طریق برنامه‌های کنترل کیفیت (Q.C = Quality Control)

برنامه‌های تضمین کیفیت شامل بازرسی مواد اولیه، بررسی روش‌های جوشکاری، آزمون‌های ارزیابی صلاحیت جوشکاران، آزمون‌های ارزیابی دستورالعمل جوشکاری، سلامت وسایل کار و کنترل ابعادی قطعات و در نهایت شامل تمام کنترل‌های قبل از عملیات اجرایی هستند.

برنامه‌های کنترل کیفیت شامل کنترل مونتاژ، کنترل کیفیت جوش‌ها حین جوشکاری و کنترل کیفیت جوش‌ها بعد از جوشکاری، شامل بازرسی عینی و آزمایش‌های غیرمخرب و در نهایت کنترل ابعادی قطعات بعد از جوشکاری است.

۷ ـ ۳ پنج دستورالعمل برای حصول کیفیت در جوش ساختمانی

برای حصول جوش خوب باید پنج عامل زیر را برآورده نمود (قانون پنج P):

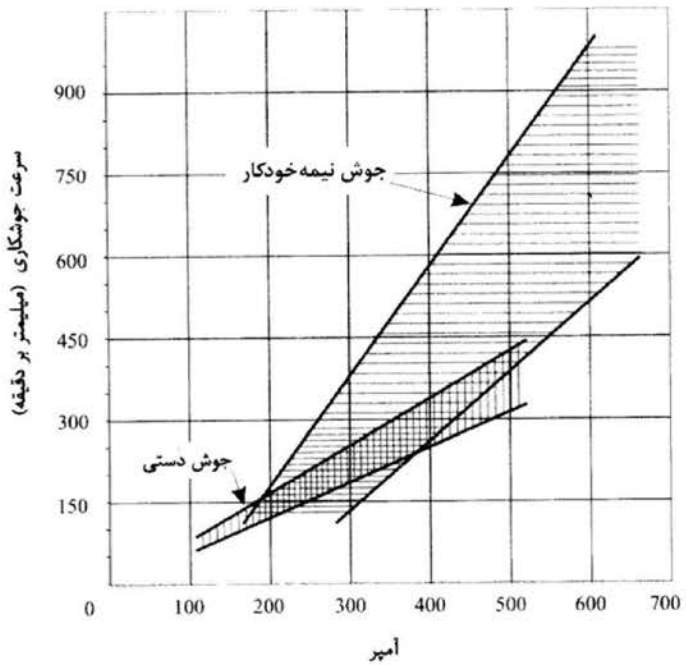
۱ ـ روش جوشکاری (Process Selection)
۲ ـ آماده‌سازی مناسب لبه‌ها (Preparation)
۳ ـ دستورالعمل جوشکاری (Procedure) } : بازرسی‌های تضمین کیفیت (Q/A)
۴ ـ پرسنل (Personnel)

۵ ـ بازرسی و تأیید جوش (Prove) : بازرسی‌های کنترل کیفیت (Q/C)

چهار عامل اول در ردهٔ بازرسی‌های تضمین کیفیت و عامل پنجم در ردهٔ بازرسی‌های کنترل کیفیت می‌باشد.

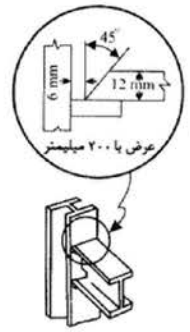
روش جوشکاری (Process)

اولین گام، انتخاب روش مناسب برای جوشکاری است. در این گام مسئولین طراحی و اجرا، تصمیم می‌گیرند که از کدام‌یک از روش‌های جوش دستی، نیمه‌خودکار و یا تمام‌خودکار برای کار استفاده نمایند. این تصمیم‌گیری از نقطه‌نظر زمان و اقتصاد بسیار مهم و تأثیرگذار است. امروزه استفاده از جوشکاری نیمه و یا تمام خودکار باعث افزایش قابل توجه در سرعت و کاهش هزینه‌ها می‌گردد، که البته مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر نیز می‌باشد. در شکل‌های ۷ ـ ۲ و ۷ ـ ۳، مقایسه‌ای بین سه روش جوشکاری به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین آنها انجام شده است.



شکل ۷ ـ ۲ استفاده از جوش‌های نیمه‌خودکار، باعث افزایش چشمگیر سرعت جوشکاری و در نتیجه کاهش هزینهٔ آن می‌شود.

روش جوشکاری	الکترود توپودری	زیرپودری	دستی	دستی
نوع الکترود	2.4NS.3M	780 FLUX	E6027	E6018
شدت جریان (آمپر)	۳۲۵ ـ ۳۵۰	۳۵۰ ـ ۳۷۵	۳۰۰ ـ ۳۵۰	۲۰۰ - ۲۲۵
ولتاژ (ولت)	۳۰ ـ ۳۱	۳۰ ـ ۳۱		
قطبیت	DC+	DC+	AC	DC+
سرعت جوش (اینچ بر ساعت)	۱۲ ـ ۱۳	۱۰/۵ ـ ۱۱/۰	۹/۵ ـ ۱۰/۵	۵ ـ ۶
زمان قوس (دقیقه)	۳/۲	۳/۸	۳/۹	۸/۳
زمان تمیز کردن (دقیقه)	۱/۰	۰/۷	۱/۰	۲/۳
زمان کل (دقیقه)	۴/۲	۵/۴	۴/۹	۱۰/۶
مقایسه	۱/۰	۱/۱	۱/۲	۲/۵



شکل ۷ ـ ۳ مقایسه‌ای بین سه روش جوشکاری برای انتخاب بهترین روش جوشکاری.

آماده‌سازی لبه‌ها (Preparation)

در درزهای لب به‌لب، آماده‌سازی لبه‌ها ایجاد تعادلی بین زاویهٔ پخی لبه و دهانهٔ ریشه می‌باشد. زاویهٔ پخی زیاد، نیاز به‌دهانهٔ ریشهٔ کوچکتر و زاویهٔ پخی کم نیز نیاز به‌دهانهٔ ریشهٔ بزرگتر دارد. نوع درز، وضعیت جوشکاری و دستورالعمل جوشکاری، در انتخاب زاویهٔ پخی و دهانهٔ ریشه مؤثر می‌باشند. در فصل ۱۲، درزهای پیش ارزیابی شده بر حسب روش جوشکاری ارایه شده است. برای حفظ اقتصاد جوش، زاویهٔ پخی و دهانهٔ ریشه باید در حداقل حفظ گردد و اندازهٔ الکترود نیز متناسب و سازگار با کار باشد. در شکل ۷ ـ ۴ حداکثر اندازهٔ مجاز الکترود طبق آیین‌نامهٔ AWS ارایه شده است. بعد از انتخاب زاویهٔ پخی، دهانهٔ ریشه و اندازهٔ الکترود، قبل از شروع جوش‌های اصلی، باید یک سری جوش آزمایشی انجام شده و مورد آزمایش قرار گیرد.

دستورالعمل جوشکاری (WPS)[1]

اتصالات مهم هر سازه نیاز به‌یک دستورالعمل جوشکاری که جزییات آن به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته و طرح‌ریزی شده است، دارند.

بهترین روش برای تدوین دستورالعمل جوشکاری قابل اعتماد، استفاده از نمونه‌های آزمایشی است. دستورالعمل جوشکاری کامل، باید شامل اطلاعات زیر باشد:

۱ ـ جزییات اتصال

۲ ـ هندسه و رواداری‌های درز

۳ ـ روش جوشکاری

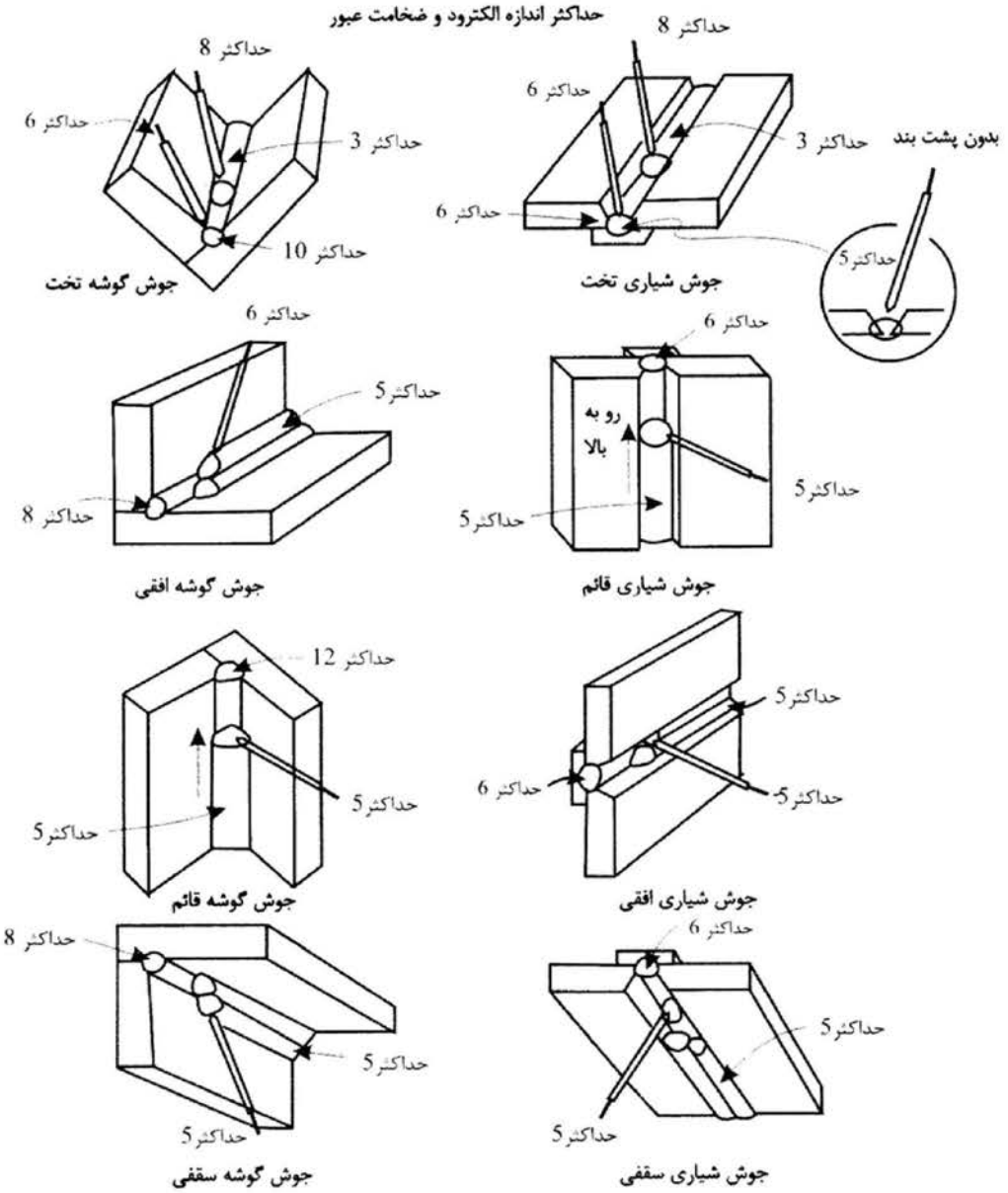
۴ ـ نوع و اندازهٔ الکترود

۵ ـ نوع پودر و یا گاز محافظ

۶ ـ شدت جریان و ولتاژ (و تغییرات آنها در پاس‌های مختلف) و قطبیت

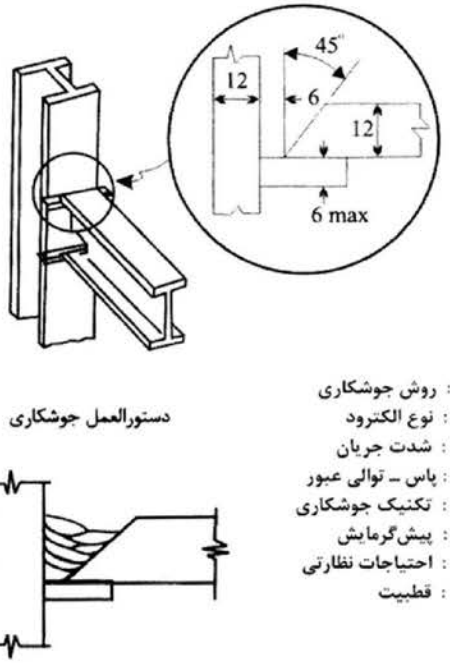
1. Welding Procedure specification

۷ ـ پیش‌گرمایش و درجه حرارت عبورهای میانی
۸ ـ توالی عبورها (همراه با یک طرح)
۹ ـ نوع بازرسی مورد نیاز
۱۰ ـ هر اطلاعات دیگر از قبیل زاویهٔ الکترود، قرارگیری نوار جوش و یا تکنیک‌های خاصی که کمکی برای حصول جوش خوب توسط جوشکار باشد.



شکل ۷ ـ ۴ حداکثر اندازهٔ مجاز الکترود طبق AWS.

در شکل ۷ ـ ۵ یک نمونه از دستورالعمل جوشکاری ارایه شده است. هر چند که انتخاب دستورالعمل جوشکاری مناسب به‌زمان اولیه نیاز دارد، لیکن باید به‌نتایج آن که ایجاد یکنواختی و هماهنگی بین تمام جوشکاران و جلوگیری از اعمال سلیقه‌های شخصی است، توجه داشت. در شکل ۷ ـ ۶ فرم استاندارد دستورالعمل جوشکاری نشان داده شده است.



۷ ـ ۵ مشخصات لازم برای درج در دستورالعمل جوشکاری.

پرسنل

این یک واقعیت است که در جوشکاری با دست، کیفیت جوش نمی‌تواند بهتر از مهارت جوشکار باشد. بنابراین قبل از شروع کار، مهارت جوشکار باید مورد ارزیابی قرار گیرد. روش عملی برای ارزیابی صلاحیت جوشکاران، انجام آزمایش تشخیص صلاحیت جوشکار می‌باشد.

انجام این آزمایش برای تشخیص صلاحیت کافی است. لیکن اغلب این سؤال پیش می‌آید که آیا این آزمایش قابلیت جوشکار را برای انجام جوش واقعی در کارگاه نشان می‌دهد یا نه. غالباً با انجام یک آزمایش در کارگاه، فرآیند تشخیص صلاحیت تمام می‌شود. همچنین اگر در مشخصات فنی انجام آزمایش پرتونگاری لازم باشد، بهتر است این آزمایش نیز در تشخیص صلاحیت جوشکار گنجانده شود. در ضمن ممکن است مهندس کارگاه بر حسب نیاز، انجام آزمایش‌های خاصی را نیز در برنامهٔ تشخیص صلاحیت و ارزیابی جوشکار بگنجاند.

در جوشکاری نیمه و تمام‌خودکار، ممکن است صلاحیت جوشکار خیلی مهم نباشد، لیکن باید جوشکار برای کار با دستگاه مورد آزمایش قرار گیرد.

نام شرکت ..... شماره تجدیدنظر ..... تاریخ ..... توسط .....

شماره دستورالعمل ..... تأییدکننده ..... تاریخ .....

روش جوشکاری ..... دستی ☐ نیمه‌خودکار ☐ خودکار ☐

نوع درز

نوع: یک‌رو ☐ دو رو ☐

پشت‌بند: بله ☐ خیر ☐

مصالح پشت‌بند .....

بازشدگی ریشه ..... ضخامت ریشه .....

زاویه شیار ..... شعاع .....

شیارزنی پشت: بله ☐ خیر ☐ روش .....

وضعیت

جوش شیاری ..... گوشه .....

جوشکاری قائم: سربالا ☐ سرپایین ☐

فلز پایه

مشخصات فنی .....

نوع یا رده .....

ضخامت .....

خواص الکتریکی

نوع انتقال (GXAW):

مدار کوتاه ☐ قطره‌ای ☐ پاشیدنی ☐

جریان: AC ☐ DCEP ☐ DCEN ☐ ضربه‌ای ☐

غیره .....

الکترود تنگستن (GTAW):

اندازه .....

نوع .....

مصالح الکترود

مشخصات فنی AWS

رده طبق AWS

تکنیک جوشکاری

زنجیری ☐ زیگ‌زاگ ☐

یک‌پاسه ☐ چندپاسه ☐

تعداد الکترود .....

فواصل الکترود: طولی .....

عرضی .....

زاویه .....

فاصله با قطعه کار .....

تمیزی میان پاس .....

پوشش

نوع پودر ..... گاز .....

ترکیب .....

نوع روکش الکترود .....

پیش‌گرمایش

دمای پیش‌گرمایش، حداقل .....

دمای میان پاس، حداقل ..... حداکثر .....

عملیات پس‌گرمایش

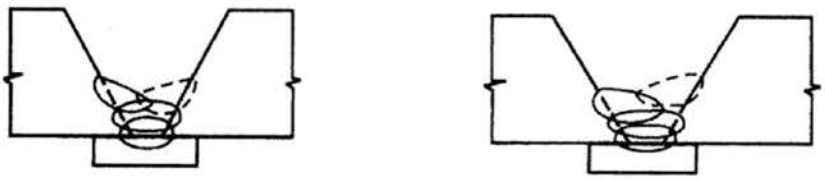
درجه‌حرارت .....

زمان .....

هندسهٔ درز	جریان				الکترود			
	سرعت حرکت mm/min	ولتاژ	آمپراژ	نوع و قطبیت	قطر	رده	روش جوشکاری	عبور
								۱
								۲
								۳

شکل ۷ ـ ۶ فرم استاندارد دستورالعمل جوشکاری (W.P.S).

اگر از موارد استثنا بگذریم، یک جوشکار باوجدان حرفه‌ای با بازرسی عینی می‌تواند بگوید که آیا ذوب خوب حاصل شده یا نه (شکل ۷ ـ ۷). این کار شامل مشاهدات او در حین جوشکاری و اتمام نوار جوش می‌باشد. هندسه بد خطوط تراز نوار جوش و لبه‌های ناصاف، دلایلی برای ذوب ناکافی می‌باشند.



(ب) عرض ریشه برای پاس بعدی در حد فاصل لبه ورق و نوار جوش وجود ندارد و احتمال ذوب ناکافی موجود می باشد

(الف) هیچ مشکلی برای پاس بعدی برای ذوب لبه ورق و پاسهای قبلی وجودندارد

شکل ۷ ـ ۷ یک جوشکار باوجدان حرفه‌ای به‌طور عینی هر نواری را که جوش می‌دهد، بازرسی می‌کند. او می‌داند که خطوط تراز ضرس و لبه‌های ناصاف، دلالت بر وجود مشکل در جوش دارند و سعی می‌کند آنها را در حین جوشکاری اصلاح نماید.

علایم زیادی از بروز مشکل وجود دارد که جوشکار می‌تواند آنها را کشف نماید. در این زمان می‌توان عیب را با سنگ زدن رفع نمود و دستورالعمل جوشکاری را نیز اصلاح کرد. راه غلط این است که تصور نماییم عیب می‌تواند در پاس (عبور) بعدی از بین برود. ضررهای اقتصادی این تصور نادرست در هنگام مردود شدن جوش در بازرسی نهایی روشن می‌شود.

پیش‌آزمایش

بعد از تعیین روش جوشکاری، آماده کردن لبه‌ها، دستورالعمل جوشکاری و انتخاب پرسنل مناسب، باید نمونه‌های واقعی از کار منطبق با شرایط واقعی، جوش شده و مورد آزمایش‌های مخرب یا غیرمخرب قرار گیرند. انجام بعضی از این آزمایش‌ها در مورد نمونه‌های واقعی ممکن است امکان‌پذیر نباشد.

۷ ـ ۴ نظارت پیشگیرانه (PM)

به‌طور خلاصه باید به‌این نکته توجه نمود که اگر انجام بازرسی به‌بعد از اتمام جوش واگذار گردد، خیلی دیر خواهد بود. اگر بعد از اتمام جوش، وقوع ترک، بریدگی لبهٔ جوش، اندازهٔ غلط، ذوب ناقص یا سایر معایب مشاهده گردد، رفع آنها خیلی گران‌قیمت خواهد بود. باید با استفاده از اقدامات پیشگیرانه (مثلاً رعایت پنج دستورالعمل و انجام بازرسی در حین جوشکاری) از وقوع چنین معایبی جلوگیری نمود.

در یک نظارت پیشگیرانه تمام عوامل دست‌اندرکار، مسئولیت کار را بین یکدیگر تقسیم کرده و با برقراری یک نظارت سیستماتیک، در حین و بعد از اتمام جوشکاری، با بازرسی عینی، عیوب احتمالی مورد بررسی قرار گرفته و

روش‌هایی برای رفع عیوب اتخاذ می‌گردد. در این خصوص تهیهٔ چک‌لیست کمک خوبی در رسیدن به‌هدف خواهد بود. در انتهای فصل یک چک‌لیست کامل ارایه گردیده است.

۷ ـ ۵ بازرسی عینی (V.I)

یکی از مؤثرترین روش‌های بازرسی جوش، بازرسی عینی عملیات جوشکاری توسط بازرسان و ناظران آموزش‌دیده است. طبق دستورالعمل آیین‌نامهٔ جوشکاری ساختمانی، صد درصد جوش‌های انجام شده باید بازرسی عینی گردند. بازرسی عینی اگر به‌درستی انجام شود، از ارکان مهم بازرسی جوش می‌باشد. بازرسی‌های عینی غالباً در سه مرحله قبل از جوشکاری و در حین جوشکاری در برنامهٔ تضمین کیفیت و بعد از جوشکاری در برنامهٔ کنترل کیفیت انجام می‌شود.

در تمام موارد اعتقاد همگانی بر این قرار دارد که پیشگیری مقدم بر درمان (یا در ادبیات فنی، تعمیر) است. اصل مهم در برنامهٔ بازرسی عینی، تنظیم برنامه‌های پیشگیرانه است که در طی آن تعداد جوش‌هایی که مورد ترمیم قرار می‌گیرند، کاهش یابند.

۷ ـ ۵ ـ ۱ اصول بازرسی چشمی (عینی) جوش

بازرسی عینی از کاربردی‌ترین روش‌های بازرسی جوش است. این روش سریع بوده و نیازی به‌تجهیزات گران‌قیمت ندارد. در هنگام بازرسی عینی استفاده از یک ذره‌بین (با بزرگ‌نمایی حدود ۱۰ برابر) توصیه می‌شود. زیرا با استفاده از ذره‌بین امکان مطالعهٔ شرایط ظاهری جوشکاری در سطح بزرگتری وجود دارد.

در بسیاری از برنامه‌های کنترل کیفیت محصولات جوشی، از آزمون چشمی به‌عنوان اولین آزمایش و یا در بعضی موارد به‌عنوان تنها روش ارزیابی بازرسی، استفاده می‌شود. اگر آزمون چشمی به‌طور مناسب اعمال شود، ابزار ارزشمندی می‌تواند واقع گردد.

بازرسی چشمی روشی برای شناسایی نواقص و معایب سطحی می‌باشد. شناسایی و تعمیر این عیوب، کاهش هزینهٔ قابل توجهی را در بر خواهد داشت. تأثیر بازرسی چشمی هنگامی بهینه می‌شود که دورهٔ زمانی قبل، حین و بعد از جوشکاری و تمام مراحل فرآیند جوشکاری را پوشش دهد.

بازرسی عینی قبل از جوشکاری

اقداماتی که لازم است توسط بازرس جوش قبل از جوشکاری انجام شوند، عبارتند از:

۱ ـ کنترل نقشه‌ها و مشخصات فنی؛

۲ ـ کنترل دستورالعمل‌های جوشکاری؛

۳ ـ ارزیابی جوشکاران؛

۴ ـ تعیین نقاط کنترل؛

۵ ـ تنظیم برنامهٔ ثبت نتایج؛
۶ ـ کنترل مصالح فلز پایه و فلز جوش؛
۷ ـ کنترل پخی، هندسه، هم‌راستایی و جفت و جوری درزها؛
۸ ـ کنترل پیش‌گرمایش لازم؛
۹ ـ کنترل عملیات برشکاری و تضاریس ناشی از برشکاری؛
۱۰ ـ شرایط عمومی کارگاه جوشکاری.

بازرسی عینی در حین جوشکاری

اقداماتی که توسط بازرس جوش در حین جوشکاری انجام می‌شود، عبارتند از:

۱ ـ کنترل کیفیت نوار ریشه (پاس ریشه)؛
۲ ـ کنترل هندسهٔ درز جوش قبل از جوشکاری روی دیگر؛
۳ ـ دمای پیش‌گرمایش و دمای پاس‌های میانی؛
۴ ـ توالی جوش‌ها؛
۵ ـ کنترل ظاهر جوش؛
۶ ـ تمیزکاری جوش و گل جوش بین دو پاس متوالی؛
۷ ـ کنترل آمپراژ، ولتاژ و سرعت حرکت دست جوشکار؛
۸ ـ نوسان عرضی دست جوشکار (حداکثر ۲/۵ برابر ضخامت مفتول الکترود).

بازرسی عینی بعد از جوشکاری

اقداماتی که توسط بازرس جوش بعد از جوشکاری انجام می‌شود، عبارتند از:

۱ ـ ظاهر نهایی جوش؛
۲ ـ اندازهٔ نهایی جوش؛
۳ ـ طول جوش؛
۴ ـ دقت‌های ابعادی؛
۵ ـ میزان اعوجاج؛
۶ ـ اصلاحات حرارتی؛
۷ ـ عیوب ظاهری شامل:
۷ ـ ۱ تخلخل ظاهری (تخلخل سوزنی)
۷ ـ ۲ عدم امتزاج کامل
۷ ـ ۳ عدم نفوذ کامل جوش در فلز پایه

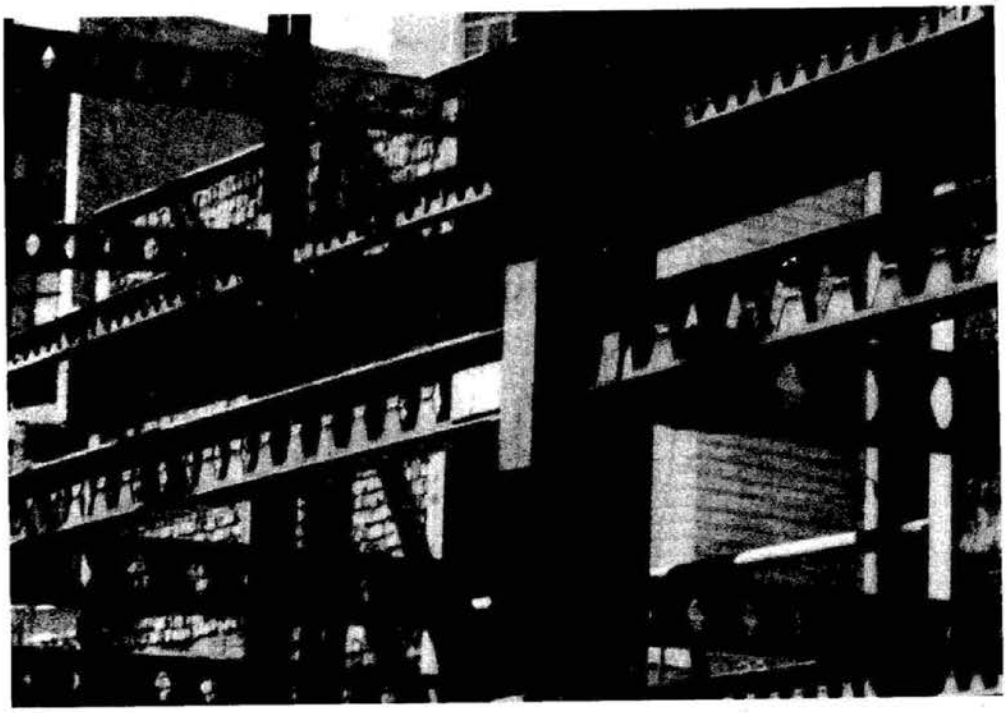
۷ ـ ۴ بریدگی پای جوش
۷ ـ ۵ لوچه
۷ ـ ۶ ترک‌های سطحی
۷ ـ ۷ گردهٔ بیش از حد جوش
۸ ـ عملیات تنش‌زدایی

بازرس جوش باید مجهز به‌ابزاری شامل اندازه‌گیر جوش[۲]، متر، کولیس، چراغ‌قوه و ذره‌بین باشد.
در شکل ۷ ـ ۸ نمونه‌هایی از جوش‌های مردود شده و در شکل ۷ ـ ۹ و ۷ ـ ۱۰ نمونه‌هایی از جوش‌های قبول شده در بازرسی عینی نشان داده شده است.

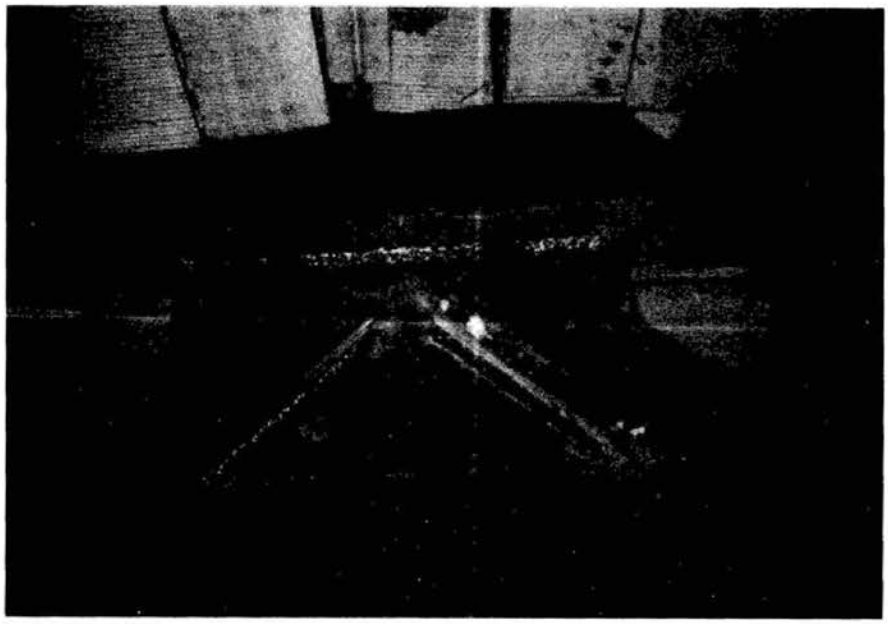
شکل ۷ ـ ۸ نمونهٔ جوش‌های مردودشده در بازرسی عینی.

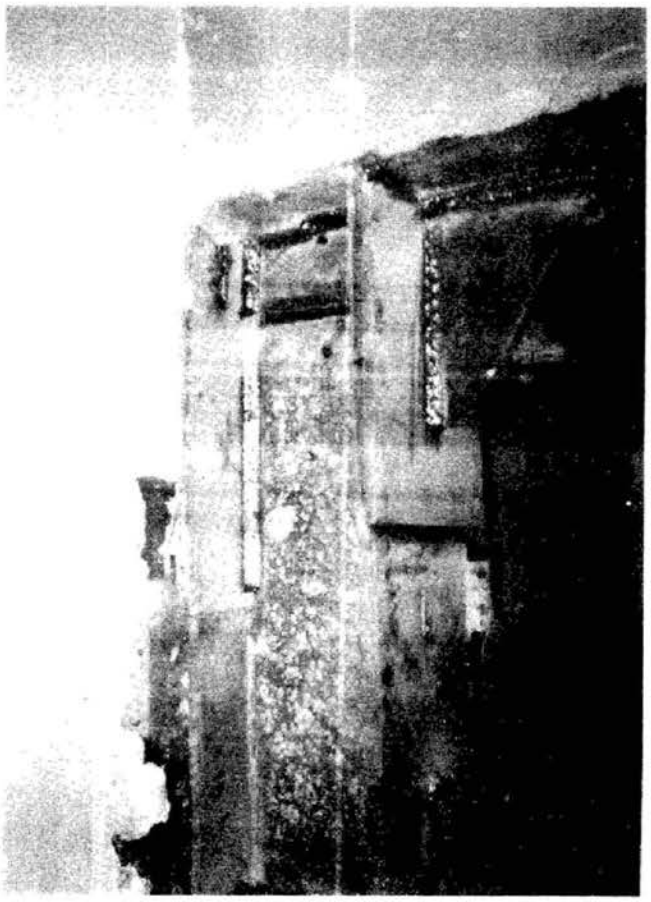
2. *Welding Gauge*

شکل ۷ ـ ۸ نمونهٔ جوش‌های مردودشده در بازرسی عینی (ادامه).



شکل ۷ ـ ۹ نمونهٔ جوش‌های پذیرفته شده در بازرسی عینی.





شکل ۷ ـ ۱۰ نمونهٔ جوش‌های پدبرفته شده در بازرسی عینی

۷ ـ ۵ ـ ۲ وظایف عمدهٔ بازرس جوش

عمدهٔ مسئولیت‌های بازرس جوش عبارتند از:

۱ ـ حضور دائم در محل کار و اشراف کامل به‌نقشه‌های سازه و مشخصات فنی

۲ ـ بررسی و تأیید صلاحیت پیمانکار و جوشکاران مشغول به‌کار

۳ ـ کنترل مواد ورودی مطابق با مشخصات فنی کار

۴ ـ کنترل مواد ورودی مطابق نقشه‌های تأیید شده

۵ ـ کنترل کامل تمام جوش‌های کارگاهی انجام شده

۶ ـ کنترل نحوهٔ آماده‌سازی اتصالات، مونتاژکاری و رواداری‌های آن، نحوهٔ انبارداری و استفاده از الکترودها و کنترل ولتاژ و آمپر دستگاه‌های جوشکاری مطابق دستورالعمل‌های مربوطه

۷ ـ نظارت مداوم بر اجرای جوشکاری مخصوص جوش‌های چند پاسی و اطمینان از نحوهٔ آماده‌سازی، پیش‌گرمایش و دمای بین پاسی مطابق دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی.

۸ ـ کنترل ابعاد جوشکاری مطابق نقشه‌ها

۹ ـ پیگیری رفع نقایص قبلی

۱۰ ـ استفاده از دستورالعمل‌های جوشکاری ساخت و نصب که توسط طراح تأیید شده باشد.

۱۱ ـ تهیهٔ PQR برای جوش‌هایی که پیش‌پذیرفته نباشند.

۱۲ ـ تهیهٔ گزارش‌های بازرسی چشمی، عدم تطابق‌ها، چک‌لیست‌های کنترل روزانه و پیگیری عیوب

۱۳ ـ تفسیر نقشه‌های جوشکاری و مشخصات

۱۴ ـ بررسی سفارش خرید به‌منظور حصول اطمینان از درستی تعیین مواد جوشکاری و مواد مصرفی

۱۵ ـ بررسی و شناسایی مواد دریافت شده طبق سفارش خرید

۱۶ ـ بررسی ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی از روی گزارش نورد طبق نیازمندی‌های معین شده

۱۷ ـ بررسی فلز مبنا از نظر عیوب و انحرافات مجاز

۱۸ ـ بررسی نحوهٔ انبار کردن فلز پرکننده و دیگر عوامل مصرفی

۱۹ ـ بررسی تجهیزات مورد استفاده

۲۰ ـ بررسی آماده‌سازی اتصال جوش

۲۱ ـ بررسی ارزیابی صلاحیت جوشکاران و اپراتورهای جوشکاری

۲۲ ـ انتخاب نمونه‌های آزمایش تولیدی

۲۳ ـ ارزیابی نتایج آزمایشات

۲۴ ـ نگهداری سوابق

مسئولیت ایجاب می‌کند که بازرس جوش دارای شخصیت حرفه‌ای با توانایی و درک خوب باشد، بازرس جوش ممکن است با کارخانجات متعدد ساخت و کارگاه‌های متعددی سر و کار داشته باشد که بایستی در همهٔ موارد ساعات کار و مقررات کاری سازمان‌های مربوطه را رعایت نماید. مراعات دقیق قواعد و مقررات کار خصوصاً در موارد پرسنلی، ایمنی و امنیتی الزامی است. هیچ‌گاه بازرس نباید خود را مستحق امتیازات ویژه بداند.

بازرس باید در مورد کارگاه ساخت بی‌طرف باشد، بی‌معطلی تصمیم بگیرد، بدون آنکه تحت تأثیر نظر دیگران واقع شود و با اتکا به‌حقایق تصمیم بگیرد و تحت تأثیر عقاید مختلف، تصمیم قبلی خود را به‌آسانی عوض نکند.

۷ ـ ۵ ـ ۳ وسایل بازرسی چشمی (عینی) جوش

وسایل گوناگونی برای بازرسی جوش وجود دارد. در این قسمت بعضی از وسایل که بیشتر در بازرسی چشمی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌شرح زیر معرفی می‌شوند:

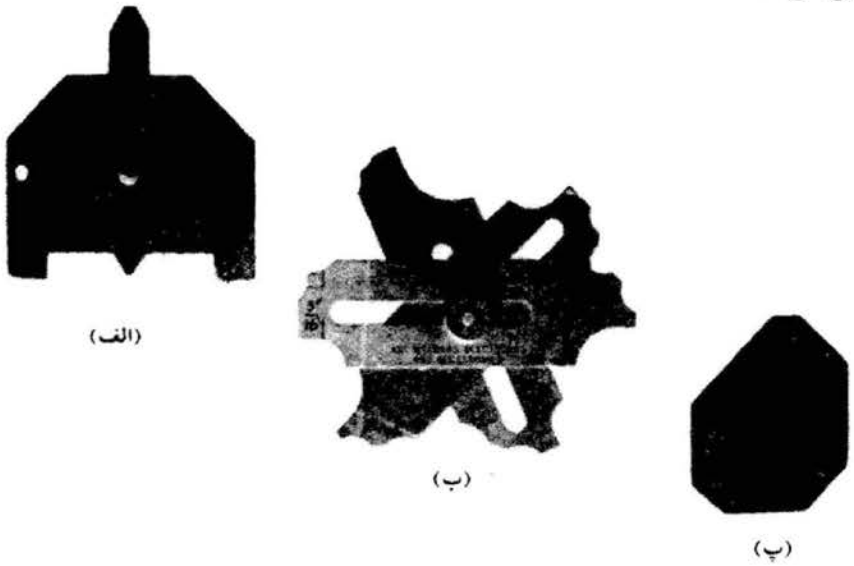
۱ ـ وسایل اندازه‌گیری خطی
۲ ـ آمپرمتر
۳ ـ دماسنج رنگی (گچ حرارتی)
۴ ـ دماسنج سطحی
۵ ـ گیج‌های جوش (گرده‌سنج جوش)
۶ ـ چراغ‌ها و آینه‌های بازرسی
۷ ـ متر نواری
۸ ـ کولیس
۹ ـ ذره‌بین با قدرت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۱۰ برابر
۱۰ ـ وسیله‌ای برای نشانه‌گذاری جوش
۱۱ ـ برای بازرسی چشمی جوش‌های با امکان دسترسی محدود، آینه‌ها، اندوسکوپ‌ها، بورواسکوپ‌ها، فیبرهای نوری و دوربین‌های تلویزیونی ممکن است استفاده شود.

شکل ۷ ـ ۱۱ وسایل بازرسی چشمی جوش.

۷ ـ ۵ ـ ۴ اندازه‌گیری جوش

اندازهٔ نادرست جوش و هندسهٔ غلط، معایبی هستند که با بازرسی‌های عینی و به‌کمک وسایل اندازه‌گیری جوش، آشکار می‌شوند. وسایل اندازه‌گیری جوش ابزاری هستند که جوشکار توسط آنها می‌تواند از قرارگیری ابعاد جوش تکمیل شده در محدودهٔ مشخص طرح هندسی، اطمینان حاصل کند. شکل ۷ ـ ۱۲ سه نوع از این وسایل را نشان می‌دهد: (الف) دستگاه ترکیبی اندازه‌گیری جوش گوشه و یا شیاری؛ (ب) دستگاه اندازه‌گیری جوش گوشه؛ (پ) نوع دومی از دستگاه اندازه‌گیری جوش گوشه که در کارگاه ساخته می‌شود.

شکل‌های ۷ ـ ۱۳ و ۷ ـ ۱۴ روش کاربرد دستگاه اندازه‌گیری جوش گوشه را که در شکل ۷ ـ ۱۲ ـ ب معرفی شد، شرح می‌دهند. شکل ۷ ـ ۱۵ روش کاربرد دستگاه کارگاهی اندازه‌گیری جوش گوشه معرفی شده در شکل ۷ ـ ۱۲ ـ پ را شرح می‌دهد.

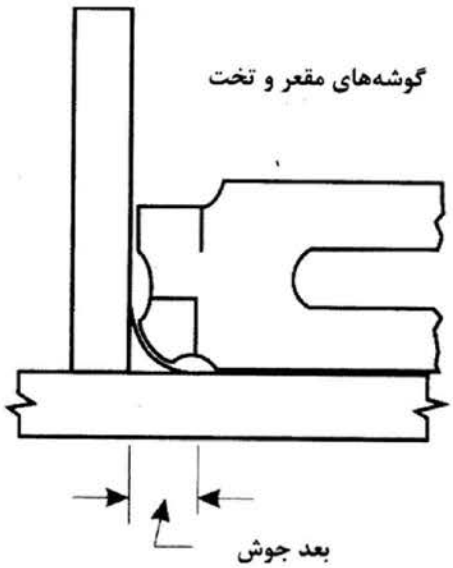


شکل ۷ ـ ۱۲ سه نوع از وسایل اندازه‌گیری جوش که عموماً توسط جوشکاران و بازرسان برای تعیین اندازهٔ جوش به‌کار می‌روند.

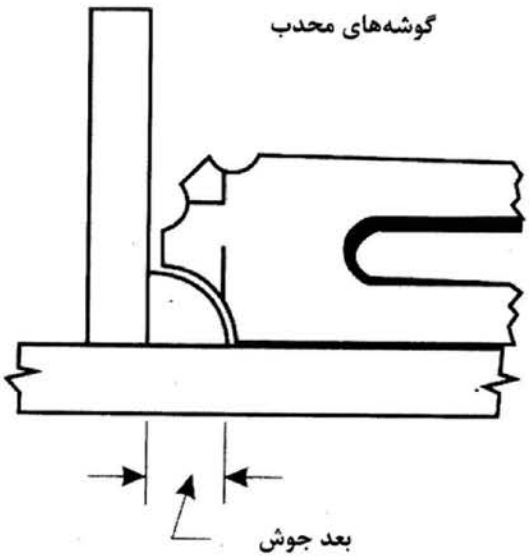
آزمایش مناسب در عمل

جوشکاری نیازمند بازرسی‌های عینی به‌طور پیوسته در خلال پیشرفت کار می‌باشد.

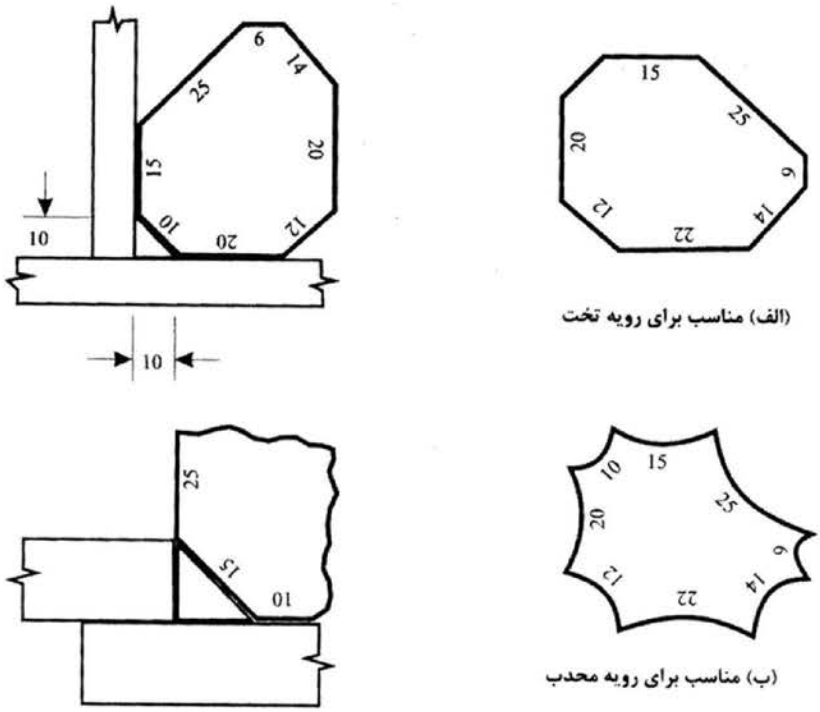
جوش تکمیل شده باید از لحاظ صحت ابعاد و طرح جوش، معایب سطحی و تابیدگی و اعوجاج قطعهٔ جوش‌شده، مورد آزمایش و اندازه‌گیری دقیق قرار گیرد. توجه خاصی باید بر روی چاله‌های پر نشدهٔ جوش، شروع و توقف ناقص جوشکاری، ترک‌های عمقی و ترک‌های موجود در لبهٔ (کنج) جوش اعمال شود. جدول‌های ۷ ـ ۱ و ۷ ـ ۲ روش‌های مناسب بازرسی و آزمایش‌های تعیین معایب فلز جوش و پایه را توصیف می‌کنند.



شکل ۷ ـ ۱۳ روش کاربرد ابزار اندازه‌گیری جوش گوشه جهت تعیین بعد جوش گوشهٔ تخت و مقعر.



شکل ۷ ـ ۱۴ روش کاربرد ابزار اندازه‌گیری جوش گوشه جهت تعیین بعد جوش گوشهٔ محدب.



شکل ۷ ـ ۱۵ روش کاربرد دستگاه اندازه‌گیری کارگاهی جوش گوشه.

جدول ۷ ـ ۱ روش‌های ارزیابی برای جوش‌های گوشه و شیاری

بازرسی توصیه‌شده		
جوش شیاری	**جوش گوشه**	**نوع عیب**
عینی	عینی[1]	جوش با بعد کم
عینی	عینی	تخلخل سطحی
پرتونگاری	مخرب	تخلخل داخلی
عینی	عینی	بریدگی
ذرات مغناطیسی نفوذ مادهٔ رنگی عینی فراصوتی پرتونگاری[3]	ذرات مغناطیسی نفوذ مادهٔ رنگی عینی مخرب[2]	ترک
پرتونگاری فراصوتی	مخرب فراصوتی	نفوذ ناقص
پرتونگاری فراصوتی	مخرب فراصوتی	اختلاط

۱ ـ از ابزار اندازه‌گیری جوش گوشه استفاده کنید.

۲ ـ آزمایش‌های مخرب وجود ترک‌های داخلی را آشکار خواهد کرد.

۳ ـ آزمایش پرتونگاری نوع ترک‌های موجود در محدودهٔ آزمایش را آشکار خواهد ساخت.

جدول ۷ ـ ۲ آزمایش‌های معایب فلز جوش و فلز پایه

روش‌های آزمایش	معایب
	معایب هندسی
بازرسی عینی با ابزار اندازه‌گیری دقیق	اعوجاج
بازرسی عینی با وسایل اندازه‌گیری دقیق	فاصلهٔ نامناسب قطعات
بازرسی عینی با اندازه‌گیری تقریبی جوش	بعد جوش نادرست
بازرسی عینی با اندازه‌گیری تقریبی جوش	نیمرخ نامناسب جوش
	معایب متالورژی
پرتونگاری، شکست، میکروسکوپی، ماکروسکوپی، فراصوتی	تخلخل
پرتونگاری، شکست، میکروسکوپی، ماکروسکوپی، فراصوتی	حبس سرباره
پرتونگاری، شکست، میکروسکوپی، ماکروسکوپی، فراصوتی	امتزاج ناقص
بازرسی عینی، آزمایش خمش، پرتونگاری، میکروسکوپی، ماکروسکوپی، ذرات مغناطیسی، فراصوتی	ترک‌خوردگی
بازرسی عینی، آزمایش خمش، پرتونگاری، فراصوتی، رنگ نافذ	بریدگی لبهٔ جوش
بازرسی عینی	معایب سطحی
پرتونگاری، شکست، میکروسکوپی، ماکروسکوپی، فراصوتی	نفوذ ناقص
	معایب مکانیکی
کلیهٔ آزمایش‌های کشش فلز جوش، کشش عرضی، برش جوش گوشه، کشش فلز پایه	مقاومت کششی کم
کلیهٔ آزمایش‌های کشش فلز جوش، کشش عرضی، کشش فلز پایه	مقاومت تسلیم کم
کلیهٔ آزمایش‌های کشش فلز جوش، آزمایش خمش آزاد، خمش هدایت‌شده، کشش فلز پایه	شکل‌پذیری
آزمایش سختی	سختی نامناسب
آزمایش ضربه	شکست ضربه‌ای
تجزیهٔ شیمیایی	ترکیب ساختمانی نامناسب
آزمایش خوردگی	مقاومت خوردگی کم

۷ ـ ۶ ضوابط پذیرش بازرسی چشمی (عینی) جوش

پس از آشنایی با ضوابط ارزیابی و بازرسی جوش و همچنین آشنایی با عیوب جوشکاری این سؤال پیش می‌آید که پس از بازرسی، تحت چه شرایطی می‌توان جوش را قابل قبول دانست. همان‌طور که در ساخت اعضای ساختمانی ضوابطی برای رواداری‌های هندسی وجود دارد، وجود هر عیب در جوش به‌معنای مردود اعلام نمودن آن نیست و تحت رواداری‌هایی می‌توان عیوبی را در جوش پذیرفت.

جوشی تحت آزمایش‌های غیرمخرب قرار می‌گیرد که در بازرسی‌های عینی مورد پذیرش قرار گرفته باشد. شرایط پذیرش AWS به‌شرح زیر می‌باشد:

ضوابط پذیرش در بازرسی عینی مطابق AWS

تمام جوش‌ها باید مورد بازرسی عینی قرار گیرند و در صورتی که شرایط زیر اقناع گردد، می‌توانند مورد پذیرش قرار گیرند (فقط بارهای استاتیکی):

۱ ـ جوش باید فاقد هر گونه ترک باشد.

۲ ـ بین لایه‌های جوش مجاور و بین لایهٔ جوش و فلز پایه، باید امتزاج کامل برقرار باشد.

۳ ـ تمام چاله‌های انتهایی نوار جوش باید به‌اندازهٔ سطح مقطع کامل جوش پُر شوند. این چاله‌ها می‌توانند حاوی ترک‌های ستاره‌ای باشند.

۴ ـ مقطع جوش باید مطابق شکل ۷ ـ ۱۶ باشد.

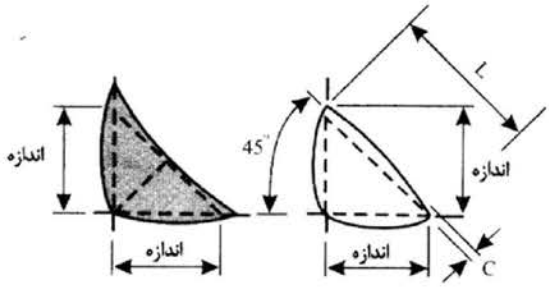
۵ ـ برای مصالحی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و کمتر، میزان بریدگی لبهٔ جوش باید کمتر از ۱ میلی‌متر باشد، لیکن در طولی معادل ۵۰ میلی‌متر در هر ۳۰۰ میلی‌متر طول نوار، می‌توان بریدگی تا ۱/۵ میلی‌متر را پذیرفت.

۶ ـ در جوش‌های گوشه مجموع قطر تخلخل‌های سطحی با قطر ۱ میلی‌متر و بزرگتر، نباید از ۱۰ میلی‌متر در هر ۲۵ میلی‌متر طول جوش و از ۲۰ میلی‌متر در هر ۳۰۰ میلی‌متر طول جوش بیشتر باشد.

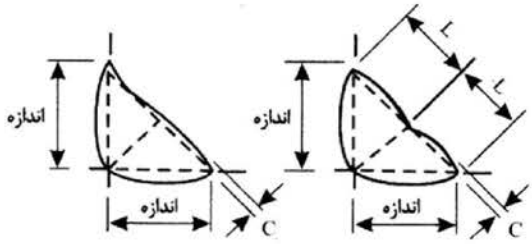
۷ ـ مجموعاً ۱۰ درصد از طول کل نوار جوش می‌تواند دارای اندازه‌ای به‌مقدار ۱/۵ میلی‌متر کوچکتر از اندازهٔ نقشه باشد. در جوش گوشهٔ متصل‌کنندهٔ بال به‌جان، در طولی معادل دو برابر عرض بال از انتهای تیر، هیچ‌گونه کمبود اندازه مجاز نیست.

۸ ـ در درزهای لب به‌لب با جوش شیاری تمام نفوذی که امتداد درز عمود بر امتداد تنش کششی است، نباید هیچ‌گونه تخلخل سطحی قابل ملاحظه باشد. در سایر موارد جوش‌های شیاری، مجموع قطر تخلخل‌های سوزنی با قطر ۱ میلی‌متر و بزرگتر، نباید از ۱۰ میلی‌متر در هر ۲۵ میلی‌متر طول جوش و ۲۰ میلی‌متر در هر ۳۰۰ میلی‌متر طول جوش بیشتر باشد.

۹ ـ بازرسی عینی جوش‌ها می‌تواند به‌محض خنک شدن جوش تا دمای محیط آغاز گردد. در فولادهای خیلی پُر مقاومت با تنش تسلیم بزرگتر از ۶۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، بازرسی‌های عینی باید ۴۸ ساعت بعد از تکمیل جوش انجام شود.



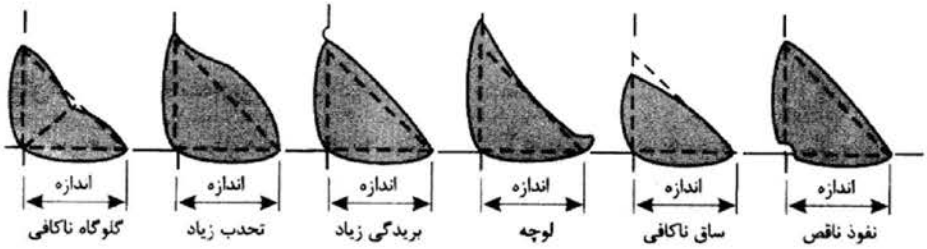
(الف) مقطع مطلوب برای جوش گوشه



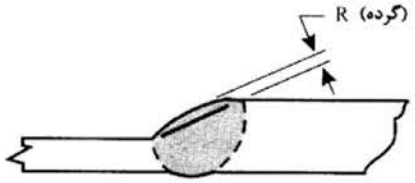
(ب) مقطع قابل پذیرش جوش گوشه

توجه: میزان تحدب C نباید از مقادیر زیر تجاوز نماید:

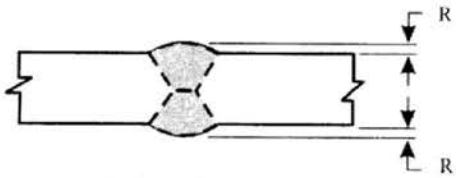
اندازه وتر (L)	حداکثر تحدب (mm)
$L \geq 8$ mm	1.5 mm
8 mm < L < 25 mm	3 mm
L > 25 mm	5 mm



(پ) مقاطع غیرقابل پذیرش جوش گوشه



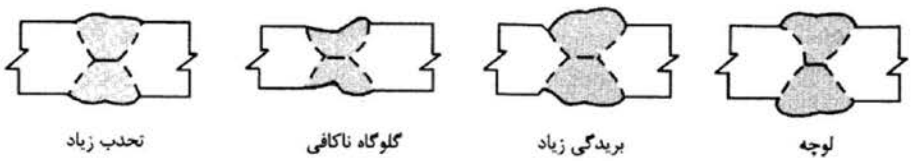
درز لب به لب (دو ورق غیر هم ضخامت)



درز لب به لب (ورق با ضخامت یکسان)

توجه: میزان گرده جوش نباید بیش از 3 میلی متر باشد

(ت) مقاطع جوش های شیاری قابل پذیرش در درزهای لب به لب



لوجه — بریدگی زیاد — گلوگاه ناکافی — تحدب زیاد

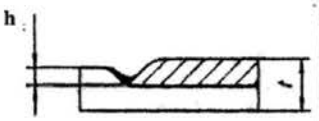
(ث) مقاطع غیر قابل پذیرش جوش شیاری در درزهای لب به لب

نکته: کلیهٔ جوش‌ها باید شرایط پذیرش در بازرسی چشمی را مطابق بخش ۷ ـ ۶ برآورده نماید.

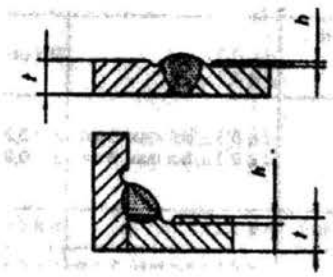
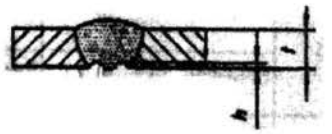
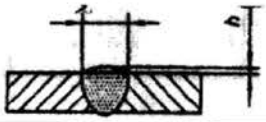
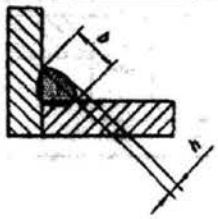
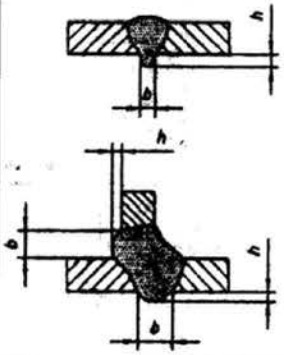
شکل ۷ ـ ۱۶ مقطع قابل پذیرش جوش‌ها.

۷ ـ ۷ رواداری‌های عیوب ظاهری جوش در بازرسی چشمی (عینی) طبق ISO 5817

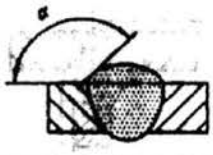
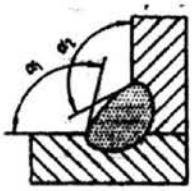
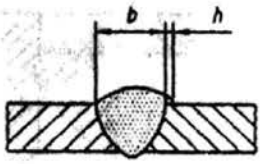
جدول ۷ ـ ۳ رواداری‌های عیوب جوش مطابق ISO 5817

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
۱ ـ عیوب سطحی							
1.1	100	ترک	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست
1.2	104	ترک ستاره‌ای	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست
1.3	2017	تخلخل سطحی	بزرگترین اندازه یک تخلخل منفرد برای: ـ جوش لب به‌لب ـ جوش گوشه	3 تا 0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	d≤0.3s d≤0.3a
			بزرگترین اندازه یک تخلخل منفرد برای: ـ جوش لب به‌لب ـ جوش گوشه	>3	مجاز نیست	d≤0.2s، max,2mm d≤0.2a، max,2mm	d≤0.3s، max,3mm d≤0.3a، max,3mm
1.4	2025	تخلخل انتهای چاله جوش		3 تا 0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	h≤0.2t
				>3	مجاز نیست	h≤0.1t max,1mm	h≤0.2t max,2mm
1.5	401	ذوب ناقص دیواره	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست
		ذوب ناقص میکروسکوپی	فقط با آزمایشات میکروسکوپی قابل رؤیت است		مجاز نیست	مجاز است	مجاز است
1.6	4021	نفوذ ناقص در ریشه جوش	فقط برای جوش‌های لب به‌لب یک‌طرفه 	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک d≤0.2t، max,2mm

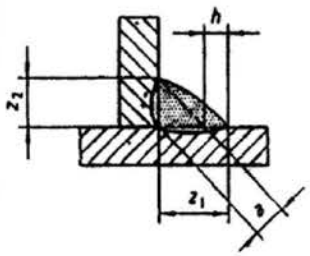
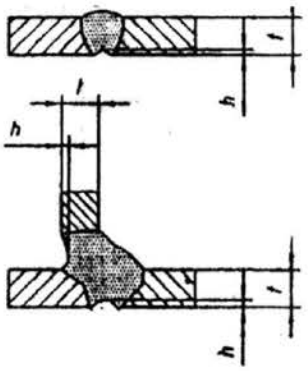
جدول ۷ ـ ۳ رواداری‌های عیوب جوش مطابق ISO 5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
1.7	5011 5012	بریدگی کناره جوش ممتد بریدگی کناره جوش منقطع	باید سطح انتقال به‌صورت نرم و نه تیز باشد. این عیب به‌صورت یک عیب منظم دیده شده است.	3 تا 0.5 مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک $h \le 0.1t$	عیوب کوچک $h \le 0.2t$
				>3	$h \le 0.05t$ max, 0.5mm	$h \le 0.1t$ max, 0.5mm	$h \le 0.2t$ max, 1mm
1.8	5013	کشیدگی جوش در جوش شیاری	باید محل انتقال به‌صورت نرم و نه تیز باشد.	3 تا 0.5	مجاز نیست	عیوب کوچک $h \le 0.1t$	$h \le 0.2$ mm $+0.1t$
				> 3	عیوب کوچک $h \le 0.05t$, max, 0.5 mm	عیوب کوچک $h \le 0.1t$, max, 1 mm	عیوب کوچک $h \le 0.2t$, max, 2 mm
1.9	502	گرده جوش اضافی در جوش‌های لب به‌لب	باید محل انتقال به‌صورت نرم و نه تیز باشد.	≥0.5	$h \le 1$mm $+ 0.1b$, max, 5 mm	$h \le 1$mm $+ 0.15b$, max, 7mm	$h \le 1$mm $+ 0.25b$, max, 10 mm
							
1.10	503	تحدب اضافی جوش در جوش‌های گوشه		≥0.5	$h \le 1$mm $+ 0.1b$, max, 3 mm	$h \le 1$mm $+ 0.15b$, max, 4 mm	$h \le 1$mm $+ 0.25b$, max, 5 mm
1.11	504	نفوذ اضافی جوش		>3	$h \le 1$mm $+ 0.2b$, max, 3mm	$h \le 1$mm $+ 1.0b$, max, 5 mm	$h \le 1$mm $+ 1.0b$, max, 5 mm
				3 تا 0.5	$h \le 1$mm $+ 0.1b$	$h \le 1$mm $+ 0.3b$	$h \le 1$mm $+ 0.6b$

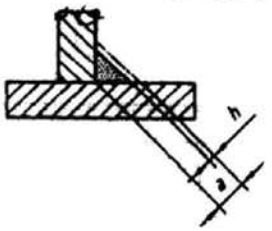
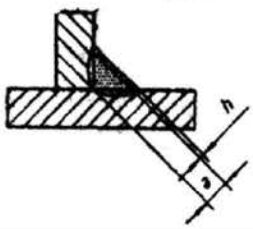
جدول ۷ ـ ۳ رواداری‌های عیوب جوش مطابق ISO 5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
1.12	505	پنجه جوش نامناسب	ـ جوش‌های لب به لب 	≥0.5	α≥150°	α≥110°	α≥90°
			ـ جوش‌های گوشه  $\alpha_1 \geq a$ $\alpha_2 \geq a$	≥0.5	α≥150°	α≥110°	α≥90°
1.13	506	رویهم افتادگی جوش		≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	h ≤0.2b
1.14	509 511	عدم پرشدگی سطح جوش‌های شیاری	باید محل انتقال به‌صورت نرم و نه تیز باشد.	0.5 تا 3	مجاز نیست	عیب کوچک h ≤0.1t	عیب کوچک h ≤0.25t
				> 3	عیوب کوچک h ≤0.05t max, 0.5mm	عیوب کوچک h ≤0.1t max, 1mm	عیوب کوچک h ≤0.25t max, 2mm
1.15	510	سوختگی (burn threugh)	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست

جدول ۷ ـ ۳ رواداری‌های عیوب جوش مطابق ISO 5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
1.16	512	ساق‌جوش نامساوی	در مواردی که تقارن جوش گوشه تعیین نشده باشد. 	≥0.5	h ≤2mm+0.15a	h ≤2mm+0.15a	h ≤2mm+0.2a
1.17	515	تقعر ریشه جوش	باید سطح انتقال نرم و نه تیز باشد. 	0.5 تا 3	مجاز نیست	عیوب کوچک h ≤0.1t	h ≤2mm+0.1t
				> 3	عیوب کوچک h ≤0.05t max. 0.5mm	عیوب کوچک h ≤0.1t max. 1mm	عیوب کوچک h ≤0.2t max. 2mm
1.18	516	تخلخل ریشه جوش	شکل‌گیری اسفنجی در ریشه جوش که به‌علت حباب‌زایی در فلز جوش در لحظهٔ انجماد جوش آن اتفاق می‌افتد.	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	به‌طور محدود مجاز است.

جدول ۷ ـ ۳ رواداری‌های عیوب جوش مطابق ISO 5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	*l* mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
1.19	517	شروع مجدد نامناسب	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز است، و محدوده آن وابسته به‌نوع عیب به‌وجود آمده در اثر شروع مجدد نامناسب می‌باشد.
1.20	5213	گلوی جوش ناکافی	برای فرایندهایی با مقیاس عمق نفوذ بیشتر کاربرد ندارد. 	0.5 تا 3	مجاز نیست	عیوب کوچک $h \le 0.2mm$	عیوب کوچک $h \le 0.2mm + 0.1a$
				>3	مجاز نیست	عیوب کوچک $h \le 0.3mm + 0.1a$, max.1mm	عیوب کوچک $h \le 0.3mm + 0.1a$, max.2mm
1.21	5214	گلوی جوش اضافی	ضخامت گلوی جوش واقعی جوش گوشه خیلی بزرگ باشد. 	≥0.5	$h \le 1mm + 1.5a$, max. 3mm	$h \le 1mm + 0.2a$ max. 4mm	نامحدود
1.22	601	اثر قوس (لکهٔ قوس)	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز است، به شرطی‌که بر خواص فلز مبنا تأثیری نداشته باشد.
1.23	602	پاشش جوش	ـ	≥0.5	حد پذیرش بستگی به‌کاربرد دارد مانند نوع مواد، حفاظت از خوردگی و		

۷ ـ ۸ چک‌لیست بازرسی چشمی (عینی)

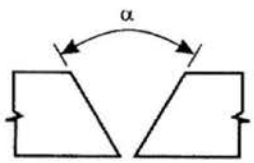
نکاتی که قبل، حین و بعد از جوشکاری باید مورد بازرسی عینی قرار گیرند:

●○○ کنترل قبل از جوشکاری

○●○ کنترل در حین جوشکاری

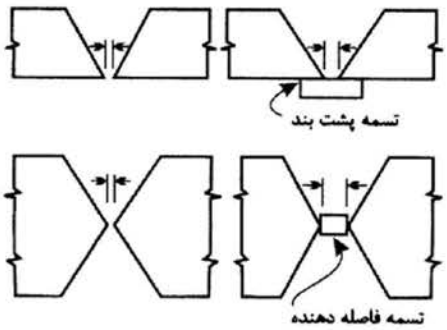
○○● کنترل بعد از جوشکاری

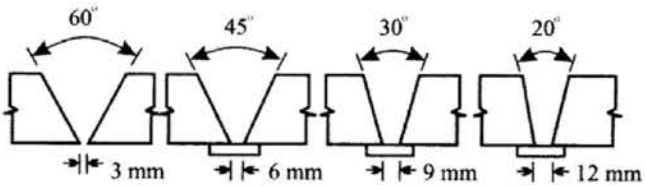
۱ ـ زاویهٔ پخی (Included angle) ●○○



زاویهٔ پخی باید به‌اندازه‌ای باشد که الکترود به‌راحتی به‌ریشهٔ جوش برسد و در عبورهای متوالی، از ذوب کامل جداره‌ها اطمینان حاصل گردد. در حالت عمومی هر چه این زاویه بزرگتر باشد، مصرف مصالح جوش افزایش می‌یابد.

۲ ـ دهانهٔ ریشه (Root opening) ●○○



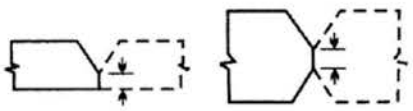


در صورت عدم استفاده از تسمهٔ پشت‌بند، امکان سوختن ریشه در عبور (پاس) اول وجود دارد. در نتیجه، در این حالت دهانهٔ ریشه قدری کاهش داده می‌شود. در صورتی که امکان سنگ زدن ریشه از پشت کار وجود داشته باشد،

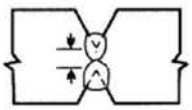
عدم ذوب کامل ریشه در عبور (پاس) اول خیلی جدی نیست. در صورت استفاده از تسمهٔ پشت‌بند، دهانهٔ ریشه افزایش داده می‌شود تا ذوب کامل ریشه و تسمهٔ پشت‌بند امکان‌پذیر باشد. در این حالت نیازی به‌سنگ زدن ریشه از پشت کار نمی‌باشد و امکان سوختن ریشه نیز در میان نیست. در پخ دو طرفه، تسمهٔ فاصله‌دهنده نقش ورق پشت را بازی می‌کند. لیکن قبل از جوش، پشت کار باید سنگ زده و کاملاً برداشته شود.

تذکر: برای دستیابی به‌ذوب کامل ریشه و لبه‌ها، زاویهٔ پخی و دهانهٔ ریشه، اثر عکس روی یکدیگر دارند. یعنی هر چه زاویهٔ پخی کم باشد، باید دهانهٔ ریشه افزایش داده شود و هر چه دهانهٔ ریشه کم باشد، باید زاویهٔ پخی افزایش داده شود. در عمل باید به‌کمک آزمون و خطا، مطلوب‌ترین حالت تعیین شود.

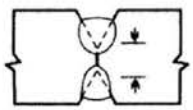
۳ ـ ضخامت ریشه (Root face) ●○○



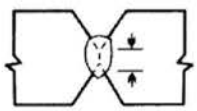
رعایت ضخامت ریشه به‌منظور جلوگیری از سوختن ریشه می‌باشد و معمولاً در جوش‌های خودکار زیرپودری مقرر می‌گردد. ضخامت ریشه دارای یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر است و در صورت عدم رعایت مقدار حداقل، ریشهٔ جوش می‌سوزد و در صورت عدم رعایت مقدار حداکثر، ذوب ریشه کامل نخواهد بود.



(الف) ضخامت ریشه کم باعث سوختن ریشه می‌شود

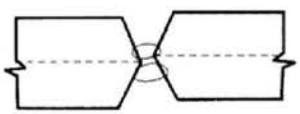


(ب) ضخامت ریشه زیاد باعث عدم نفوذ کامل می‌شود



(پ) ضخامت ریشه مناسب باعث نفوذ مناسب می‌شود

۴ ـ هم‌محوری درز (Align ment) ●○○



عدم هم‌محوری صحیح باعث تشکیل قسمت‌هایی با نفوذ ناقص جوش می‌شود.

۵ ـ تمیزی درز (Cleanliness of Joint) ●●●

سطوح درز باید تمیز و عاری از هر گونه آلودگی، گرد و غبار و رطوبت باشند.

۶ ـ نوع و اندازهٔ مناسب الکترود ((Proper type and size of electrode) ○●○

نوع و اندازهٔ الکترود باید برای نوع فلز مورد جوش، وضعیت جوشکاری، وظیفهٔ جوش، ضخامت ورق، اندازهٔ درز و غیره مناسب باشد.

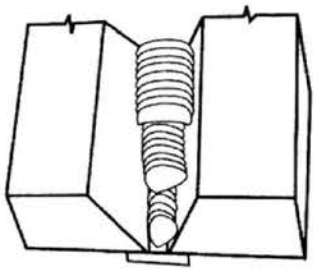
۷ ـ قطبیت و شدت جریان مناسب (Proper welding current and Polarity) ○●○

برحسب نوع و قطر الکترود، نوع درز و وضعیت جوشکاری باید شدت جریان و قطبیت جوشکاری مناسب انتخاب شود.

۸ ـ خال جوش مناسب (Proper tack weld) ○●○

خال‌جوش‌ها باید کوچک و بلند باشند، به‌طوری که با جوش اصلی تداخلی نداشته باشند. در ورق‌های ضخیم، برای اجرای خال‌جوش‌ها باید از الکترودهای کم‌هیدروژن استفاده نمود.

۹ ـ ذوب خوب (Good Fusion) ○●●



هر عبور (پاس) جوش باید به‌طور کامل با ورق پشت‌بند، عبور قبلی و فلز پایه هم‌جوش شده و امتزاج کامل به‌وجود آورد، به‌طوری که هیچ‌گونه حفرهٔ هوا در فصل مشترک به‌وجود نیاید.

۱۰ ـ پیش‌گرمایش و درجه حرارت پاس‌های میانی

○●○ (Proper Preheat and interpass temperature)

مقدار پیش‌گرمایش و درجه حرارت مناسب برای عبورهای میانی، بستگی به‌ضخامت ورق، نوع فولاد، روش جوشکاری و درجه حرارت محیط دارد. در صورتی که شرایط گفته شده، پیش‌گرمایش و درجه حرارت خاصی برای جوش‌های میانی لازم بدارند، در حین عملیات جوشکاری این موضوع باید به‌طور پیوسته مورد بررسی قرار گیرد.

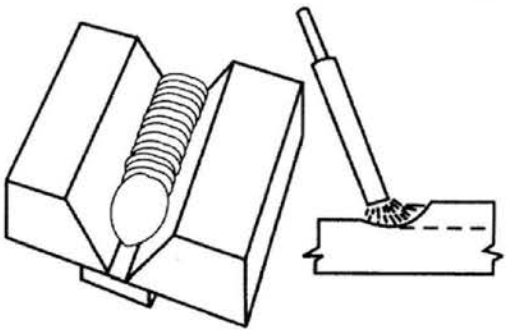
۱۱ ـ توالی و ترتیب پاس‌های جوش (Proper sequencing of Passes) ○●○

(ب) به علت فضای محدود امکان تولید حفرات هوا وجوددارد

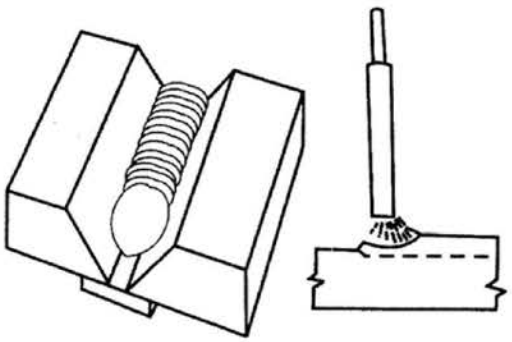
(الف) هیچ مشکلی برای عبور بعدی وجودندارد

ترتیب و توالی پاس‌ها باید طوری باشد که امکان وقوع حفرات هوا در حد فاصل عبورهای جوش وجود نداشته باشد.

۱۲ ـ سرعت مناسب حرکت نوک الکترود (Proper travel speed) ○●○



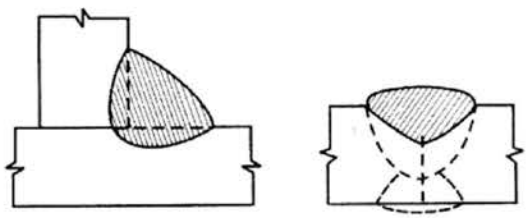
اگر سرعت حرکت خیلی آهسته باشد، فلز جوش ذوب شده و گل جوشکاری، به‌سمت جلوی الکترود فرار کرده و شروع به‌سرد شدن می‌نمایند. در نتیجه جوش اصلی که به‌روی این قسمت اجرا می‌گردد، شانس نفوذ کافی به‌ریشه را از دست می‌دهد.



اگر سرعت حرکت افزایش داده شود، امکان فرار مواد مذاب به‌جلوی الکترود وجود نداشته و نفوذ کامل صورت می‌گیرد.

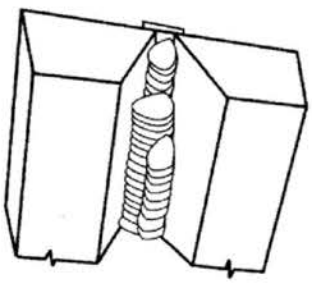
۱۳ ـ لوچه (شره) جوش (Over lap) ○●●

اگر سرعت نوک الکترود خیلی آهسته باشد، هم مقادیر زیادی از فلز جوش در حال رسوب، از لبه‌های نوار جوش به‌سمت بیرون سرریز (شره) کرده و هم‌جوشی کامل به‌وجود نمی‌آید. عمل سرریز به‌سهولت در حین جوشکاری قابل مشاهده بوده و روش اصلاح آن افزایش سرعت جوشکاری است (شکل زیر).

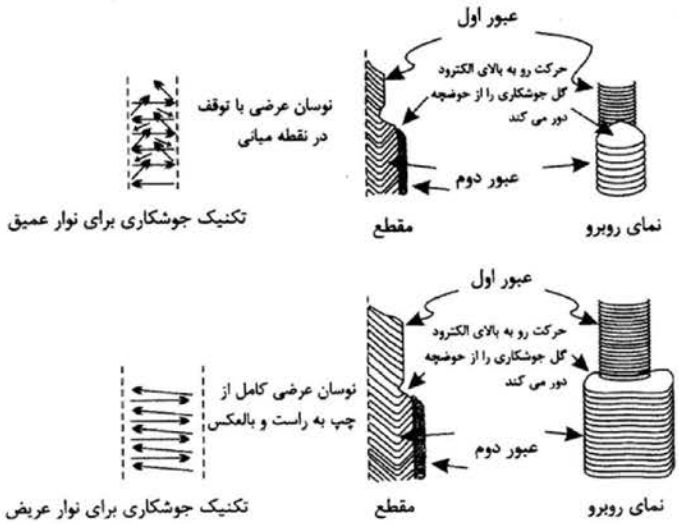


۱۴ ـ غلتاندن حوضچهٔ مذاب نوک الکترود در جوش‌های سربالا (قائم)

○●○ (Tilt of crater in vertical welding)



در جوش‌های سربالا (قائم) با دادن حرکت زیگ‌زاگ به‌نوک الکترود و غلتاندن حوضچهٔ مذاب، گل جوشکاری را به‌طرف جلو رانده و از تداخل آن با جوش جلوگیری می‌شود.



۱۵ ـ چالهٔ انتهای جوش (Filled crater) ●●○

چالهٔ دو انتهای جوش از دو نقطه‌نظر زیر ممکن است بحث‌برانگیز باشد:

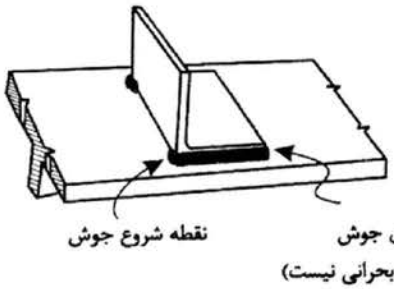
۱ ـ ضخامت گلوی جوش کمتر از سایر قسمت‌های نوار جوش است.

۲ ـ با توجه به‌اینکه سطح مقعری دارند، امکان وقوع ترک ستاره‌ای در آنها در هنگام سرد شدن وجود دارد. در جوش‌های گوشه پیوسته، خطر چالهٔ انتهای جوش وجود ندارد، زیرا جوشکار در هنگام تعویض الکترود، چالهٔ انتهای جوش قبلی را با جوش پُر می‌کند.

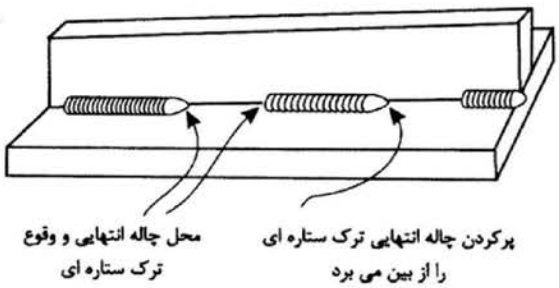
در جوش‌ها با طول محدود، لازم است انتهای جوش در محلی واقع گردد که میزان تنش کم است، در غیر این صورت باید دقت گردد که در انتهای جوش چاله کاملاً پر شود.

مثال: در جوش گوشه ورق فوقانی اتصال صلب به‌بال تیر، در شروع و ختم جوش باید دقیق بود تا چاله ایجاد نشود.

مثال: در جوش نبشی نشیمن، جوش از پشت بال نبشی شروع شده و به‌لبهٔ آن ختم می‌گردد، به‌طوری که چاله در این محل که تنش‌های کمتری دارد، ایجاد شود.

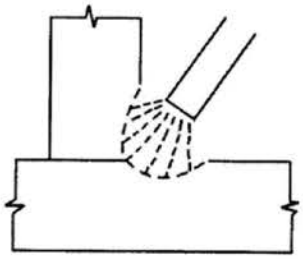


مثال: در جوش‌های منقطع، تشکیل چاله در دو انتهای هر قطعه، مشکل مهمی نیست، لیکن با روش کار مناسب نباید اجازهٔ تشکیل آن را بدهیم. مکث جوشکار در انتها و کمی برگشت دست به‌عقب مشکل را حل می‌نماید.

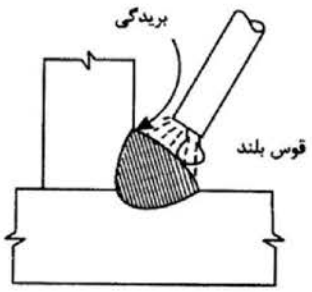


۱۶ ـ بریدگی لبه‌های جوش (Under cut) ●●○

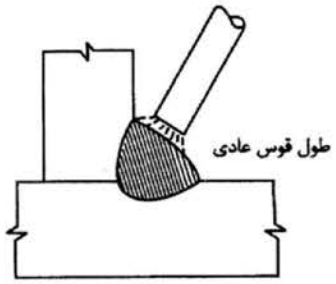
الف: قوس الکتریک قادر به‌ذوب قسمت‌هایی از فلز پایه می‌باشد.



ب: اگر طول قوس بلند باشد (فاصلهٔ نوک الکترود تا سطح جوش)، مصالح جوش نمی‌تواند تمام فضای ذوب شده را پُر کند، در نتیجه در لبهٔ جوش گودافتادگی یا بریدگی به‌وجود می‌آید.

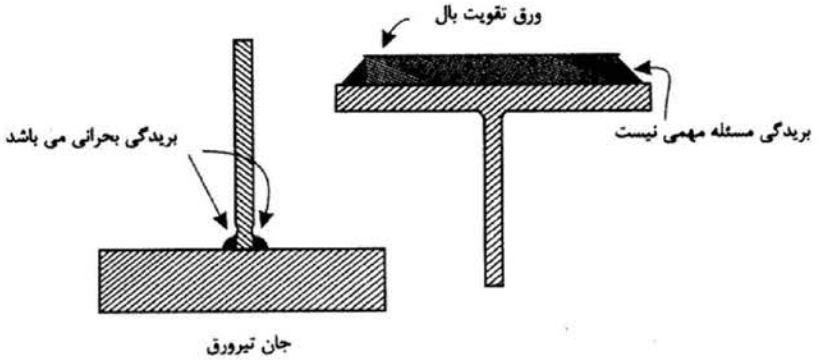


پ: با کاهش طول قوس (نزدیک کردن نوک الکترود به‌سطح جوش)، مصالح جوش تمام فضای ذوب شده را پر می‌کند.

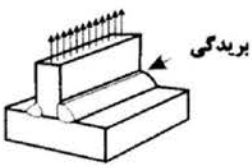


با توجه به‌اینکه بریدگی به‌راحتی با اصلاح دستورالعمل جوشکاری قابل اصلاح است، وقوع آن قابل پذیرش نیست. اما این سؤال پیش می‌آید که بریدگی در چه مواردی مضر بوده و باید اصلاح گردد.

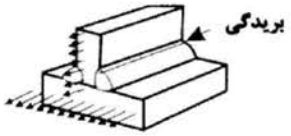
۱ ـ اگر بریدگی باعث کاهش عمده در ضخامت یا سطح مقطع گردد، وقوع آن مردود است.



۲ ـ اگر تنش در امتداد عرضی اعمال گردد، بریدگی همانند یک زخم عمل کرده و زیان‌بار خواهد بود.

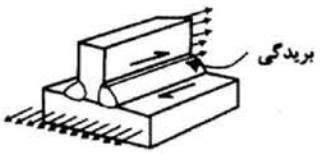


در شکل رو به‌رو بریدگی زیان‌بار است.



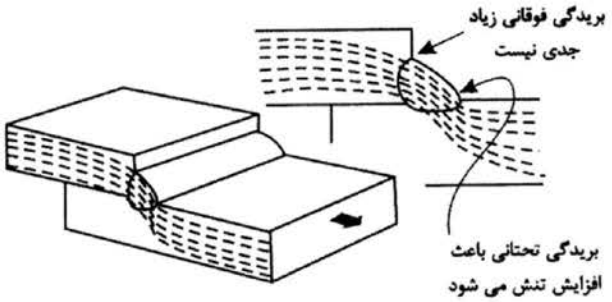
در شکل رو به‌رو بریدگی خیلی مضر نیست.

در شکل رو به‌رو نیز تنش برشی به‌موازات بریدگی عمل نموده و زیان‌بار نخواهد بود.

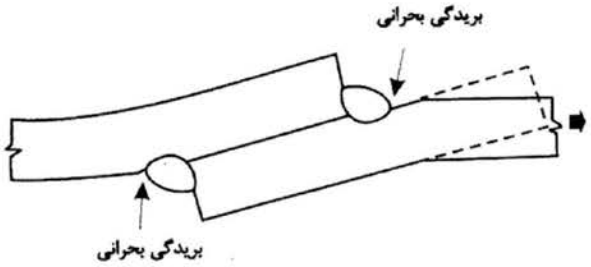


طبق آیین‌نامهٔ AWS، در حالتی که نیرو به‌طور عرضی بر بریدگی اعمال می‌گردد، بریدگی تا عمق ۰/۲۵ میلی‌متر و در صورتی که نیرو به‌موازات بریدگی باشد، تا عمق ۰/۸ میلی‌متر قابل قبول است.

به‌عنوان آخرین مطلب، توجه گردد که بریدگی تحتانی دارای تأثیر زیان‌بارتری نسبت به‌بریدگی فوقانی است.

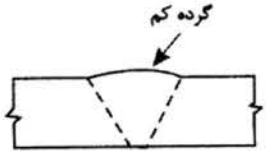


هر گونه برون‌محوری، باعث ایجاد تنش خمشی در بریدگی تحتانی می‌گردد.



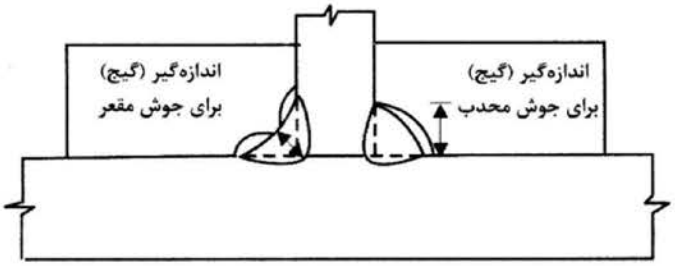
۱۷ ـ گرده در جوش‌های شیاری (Slight Reinforcement on Groove Welds) ○●●

وجود گرده تا ۱/۵ میلی‌متر در جوش‌های شیاری قابل پذیرش است. مقادیر بیشتر باعث افزایش مخارج و کاهش مقاومت خستگی می‌گردد.



۱۸ ـ اندازهٔ جوش گوشه (Full size of fillet weld) ●○○

با استفاده از اندازه‌گیری‌های مخصوص، اندازهٔ جوش گوشه باید کنترل گردد.



۱۹ ـ وقوع ترک (Cracks) ●●○

وقوع هر گونه ترک به‌هر صورت (سطحی یا عمقی)، باعث مردود شدن جوش خواهد شد.

۸ آزمایش‌های ارزیابی

۸ـ۱ معرفی ۲۳۱
۸ـ۲ آزمایش‌های ارزیابی و تأیید ۲۳۱
۸ـ۳ آزمایش‌های مخرب ۲۳۲
۸ـ۴ آزمایش‌های غیرمخرب ۲۵۷
۸ـ۵ برنامه‌ریزی آزمایش‌های غیرمخرب ۳۰۱
۸ـ۶ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO 5817 ..... ۳۰۲

۸ آزمایش‌های ارزیابی

۸ـ۱ معرفی

از هنگام کاربرد جوشکاری به‌عنوان ابزار ساخت اسکلت‌های فولادی، مقاوم بودن درز اتصال جوش‌شده در مقابل شرایط بهره‌برداری و شرایط بحرانی (مثل نیروهای زلزله) امر مهمی گردید. به‌همین جهت در کنار گسترش کاربرد جوش، باید روش‌هایی جهت ارزیابی کیفیت جوش و ارزیابی صلاحیت فنی جوشکار و در نهایت بازرسی و تأیید کار تمام‌شده، تدوین گردد.

قابلیت اعتماد از عملکرد سازه ایجاب می‌نماید که فلز جوش و درز جوشکاری‌شده از لحاظ مقاومت، سلامت و دیگر خصوصیات مورد نظر سازه‌ای و عاری بودن از عیوب جوشکاری مورد آزمایش و ارزیابی قرار گیرد.

۸ـ۲ آزمایش‌های ارزیابی و تأیید

آزمایش‌های جوش با اهداف عمده زیر انجام می‌شوند:

الف) آزمایش‌های ارزیابی شامل:

۱ـ آزمایش‌های ارزیابی و تأیید صلاحیت دستورالعمل جوشکاری (W.P.S)

۲ـ آزمایش‌های ارزیابی، تعیین صلاحیت و رده‌بندی جوشکاران

ب) آزمایش‌های تأیید شامل:

۳ـ آزمایش‌های بازرسی و تأیید

آزمایش‌های ردیف ۱ و ۲ در قالب برنامه تضمین کیفیت بوده و در قالب آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب انجام می‌شوند. به‌عنوان مثال در آزمایش ارزیابی دستورالعمل جوشکاری (W.P.S) ، یک قطعه با درز جوشی با طول محدود

(حدود ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) مطابق با مشخصات و روش ارایه شده در دستورالعمل جوشکاری (که از طرف پیمانکار ارایه شده) توسط یک جوشکار با صلاحیت، جوشکاری می‌شود و پس از تأیید در آزمایش‌های غیرمخرب نمونه‌هایی از این قطعه اخذشده و تحت آزمایش‌های مکانیکی نظیر کشش و یا خم که در قسمت‌های بعدی به‌طور کامل در مورد آنها بحث می‌گردد، قرار می‌گیرد. در صورت قابل پذیرش بودن نتایج، نوع الکترود، شدت جریان، اختلاف پتانسیل، قطبیت، هندسه درز، تعداد پاس‌ها و تمام اطلاعاتی از این قبیل که در دستورالعمل جوشکاری معرفی شده است، قابل پذیرش خواهد بود. این آزمایش‌ها در برنامهٔ QA قرار می‌گیرد.

ازمایش‌های ارزیابی و رده‌بندی جوشکاران (پیوست ۲) نیز کم و بیش مطابق فوق است و در این آزمون‌ها، یک جوش که دستورالعمل آن مورد تأیید است، توسط جوشکار در وضعیت مورد نظر انجام می‌گردد. از قطعه جوشکاری‌شده نمونه‌هایی اخذ شده و تحت آزمایش‌های مکانیکی تا نقطه خرابی قرار می‌گیرد. برحسب نتایج حاصل، صلاحیت جوشکار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ارزیابی جوشکار، می‌توان از آزمایش‌های غیرمخرب UT و RT نیز استفاده نمود.

ازمایش‌های بازرسی و تأیید اساساً با ازمایش‌های فوق متفاوت است و غالباً در رده ازمایش‌های غیرمخرب قرار می‌گیرند. هدف از انجام ازمایش‌های بازرسی و تأیید، اطمینان از کیفیت جوشی است که مقاومت آن در ارزیابی دستورالعمل جوشکاری به‌تأیید رسیده و توسط جوشکاری انجام می‌شود که صلاحیت آن نیز مورد تأیید است. آزمایش‌های بازرسی و تأیید از بازرسی عینی درز جوش و نحوه نگهداری الکترودها اغاز شده و با بازرسی در حین عملیات جوشکاری ادامه می‌یابد و در نهایت به‌بازرسی عینی درز جوش شده و بالاخره با انجام آزمایش‌های تکمیلی نظیر پرتونگاری، فراصوت، نفوذ و پودر مغناطیسی به‌اتمام می‌رسد. نتیجه کار می‌تواند مبین بی‌عیبی و قابل پذیرش بودن کار و یا مردود بودن و تعمیری شدن کار باشد. این آزمایش‌ها در برنامه Q.C قرار می‌گیرد.

۸ ـ ۳ آزمایش‌های مخرب

ازمایش‌های مخرب عبارتند از ازمایش‌های مکانیکی روی نمونه جوش‌شده جهت تعیین مقاومت و سایر خواص مکانیکی. روش‌های ازمایش از این نوع نسبتاً ارزان‌قیمت و بسیار کاربردی هستند، به‌همین جهت در سطح وسیعی جهت ارزیابی دستورالعمل جوشکاری و صلاحیت جوشکار به‌کار می‌روند. آزمایش مخرب معمولا روی نمونه اخذشده از ورق یا لوله جوش‌شده انجام می‌شود که در حقیقت نمونه‌ای از مصالح و دستورالعمل‌های جوشکاری به‌کار رفته در کارگاه یا کارخانه می‌باشند. آزمایش‌های مخرب در برنامه تضمین کیفیت مورد توجه قرار می‌گیرند.

۸ ـ ۳ ـ ۱ مراحل انجام آزمایش‌های مخرب

در ازمایش‌های مخرب، ابتدا جوش با مشخصات مورد نظر روی ورق یا قطعه ازمون[1] در وضعیت مورد نظر توسط

1. Test plate or test piece

جوشکار اجرا می‌شود.

در صورتی که هدف آزمایش مصالح و یا wps باشد، جوشکار باید دارای صلاحیت مربوطه باشد. سپس از این نمونه، آزمونه‌هایی[2] با عرض مشخص بریده می‌شود و هر آزمونه تحت آزمایش خاصی قرار می‌گیرد. مطابق شکل‌های ۸ ـ ۱ تا ۸ ـ ۹ ، مراحل انجام آزمایش‌های غیرمخرب به‌شرح زیر است:

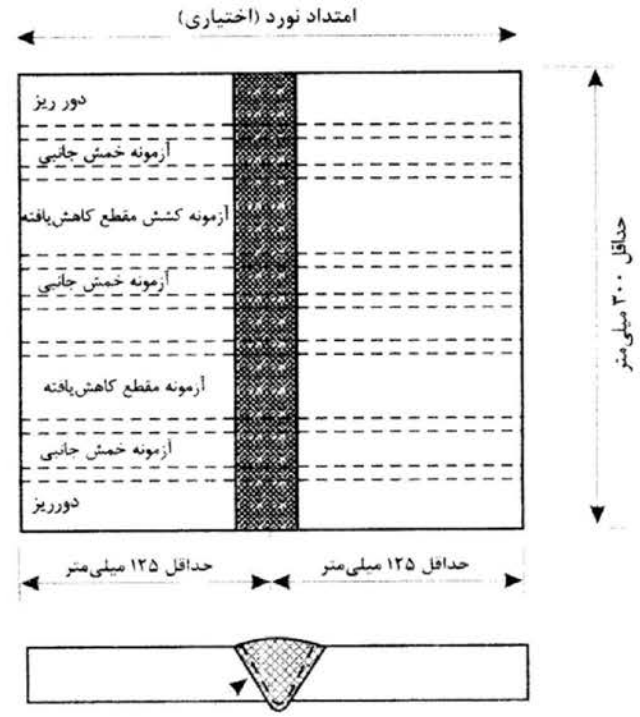
۱ ـ تهیه تجهیزات لازم برای عملیات جوشکاری آزمایشی.

۲ ـ تهیه نمونه آزمایشی که ورقی با ضخامت ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر و عرض ۲۵۰ میلی‌متر (شامل دو قطعه هر یک به‌عرض ۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد).

۳ ـ انجام جوش در وضعیت موردنظر توسط جوشکار (تخت، افقی، قائم و یا سقفی) در ورق آزمایشی.

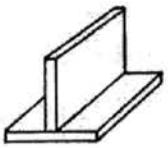
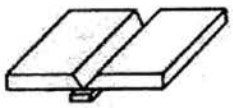
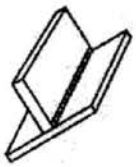
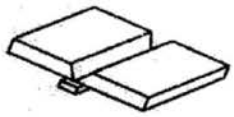
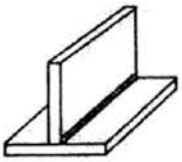
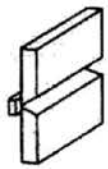
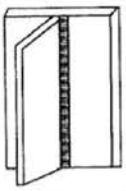
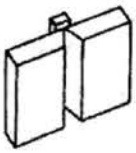
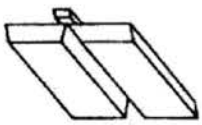
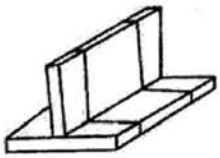
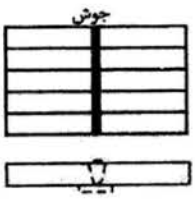
۴ ـ تهیه آزمونه از نمونه آزمایشی با برش آن در عرضی حدود ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر.

۵ ـ انجام آزمایش‌های لازم بر روی آزمونه‌ها.



شکل ۸ ـ ۱ قطعه آزمون و برش‌های لازم برای تهیه آزمونه‌ها.

2. *Sample*

	آزمون جوش گوشه	آزمون جوش شیاری
آزمون آماده‌سازی درز		
وضعیت تخت		
وضعیت افقی		
وضعیت قائم (سربالا)		
وضعیت بالای سر (سقفی)		
آماده‌سازی نمونه		

شکل ۸ ـ ۲ نمونه آزمایشی و وضعیت‌های جوشکاری.

شکل ۸ ـ ۳ تجهیزات تهیه نمونه آزمایشی.

تجهیزات شامل دو بخش است:

(الف) قطعه آزمون و متعلقات:

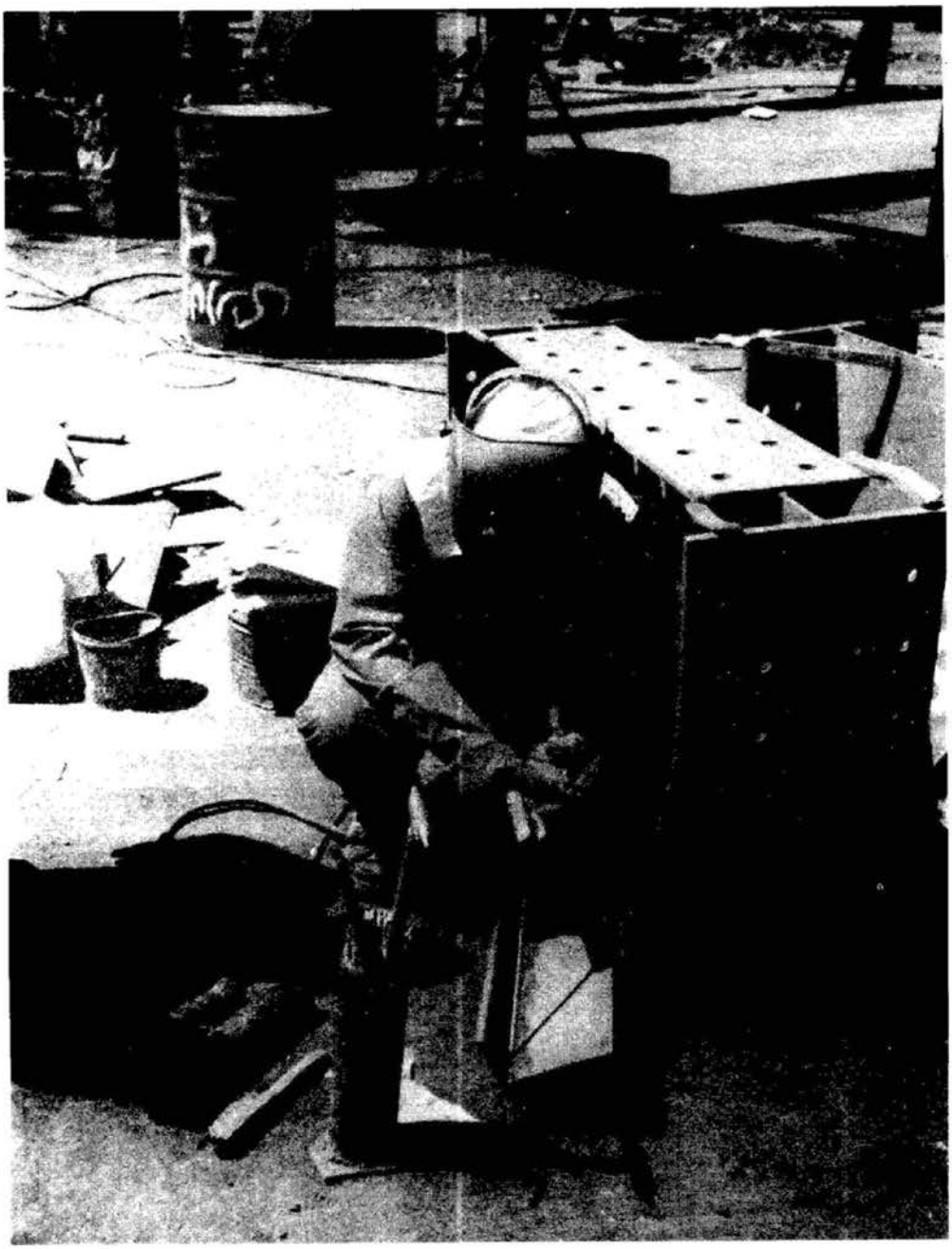
- **قطعه آزمون:** که قبل از انجام آزمون، عملیاتی شامل: بریدن، پخ‌سازی لبه و تمیزکاری بر روی آن انجام شده.
- **قید یا گیره:** که جهت مهار اتصال و جلوگیری از تغییرشکل و انطباق دو لبه قطعه استفاده می‌شود.
- **ناودان انتهایی:** در ابتدا و انتهای درز جوش جهت جلوگیری از شره کردن، ذوب ناقص لبه‌های کار مونتاژ می‌گردد.

(ب) تجهیزات جوشکاری و فردی جوشکاران:

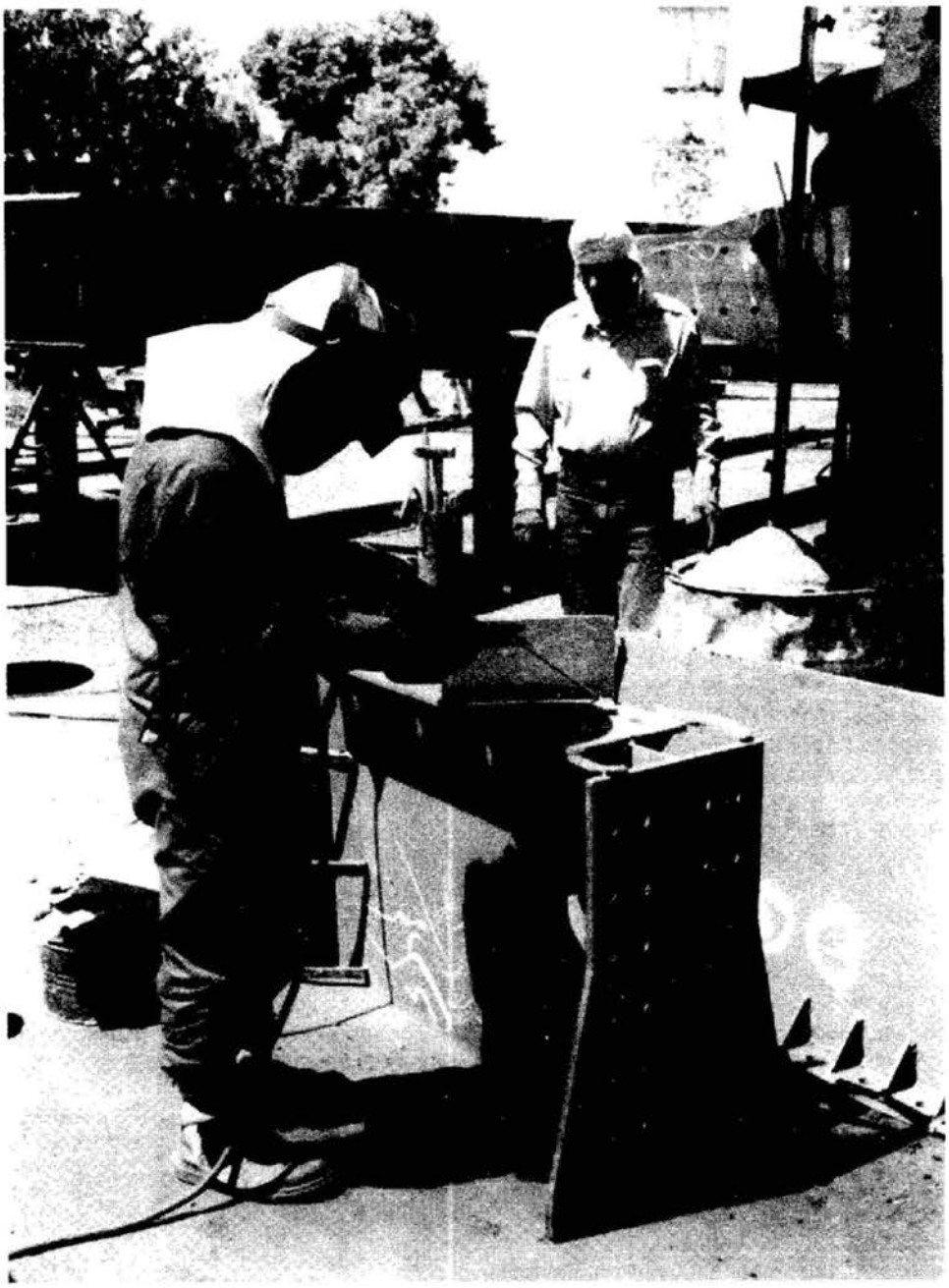
دستگاه جوش، کابل و انبر جوشکاری، الکترود (متناسب با جنس فولاد و خواص مورد نظر و وضعیت جوشکاری) فرچه برقی یا دستی، ماسک جوشکاری، دستکش و در صورت لزوم تجهیزات مربوط به‌پیش‌گرم.

شکل ۸ ـ ۴ قطعه آزمون آماده برای جوشکاری.

شکل ۸ ـ ۵ جوشکار در حین انجام جوش شیاری در وضعیت تخت (G ۱).

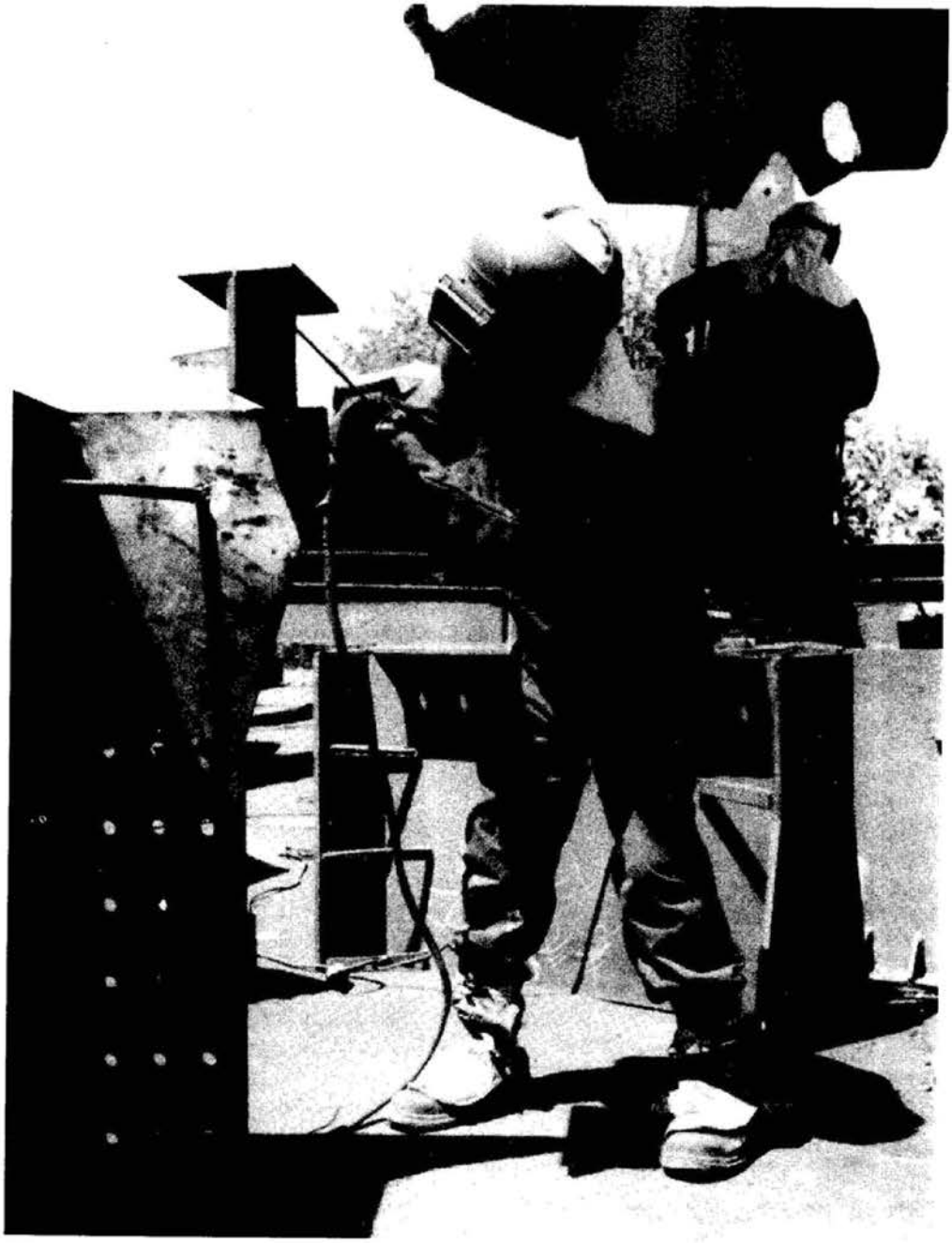


شکل ۸ ـ ۶ انجام جوش گوشه آزمایشی در وضعیت تخت (۱F).



شکل ۸ ـ ۷ انجام جوش گوشه آزمایشی در وضعیت افقی (۲F).

شکل ۸ ـ ۸ انجام جوش گوشه آزمایشی در وضعیت سربالا (۳F).



شکل ۸ ـ ۹ انجام جوش گوشه آزمایشی در وضعیت سقفی (۴F).

۸ ـ ۳ ـ ۲ آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی

نکته قابل توجه برای کارآموزان جوشکاری و جوشکاران در ارتباط با جوشکاری قطعه آزمون این است که با وجودی که این آزمایش‌ها برای تعیین توانایی جوشکاران طرح شده است، بسیاری از آنها به‌دلایلی که ارتباطی به‌قابلیت‌شان در جوشکاری ندارد، در امتحانات قبول نمی‌شوند. علت این امر بی‌دقتی در کاربرد جوش و بی‌توجهی نسبت به‌آماده‌سازی قطعه آزمایش و نمونه‌های آزمایشی است.

انتخاب و آماده‌سازی ورق‌ها. در هنگام آزمون ضروری است که ورق و تسمه پشت‌بند، جوش‌پذیر، شکل‌پذیر و از جنس فولاد کم‌کربن باشند. آزمایش به‌گونه‌ای طراحی شده است که هم ورق و هم خط جوش تحت خمش و کشش قرار می‌گیرند. اگر مقاومت کششی ورق خیلی بیشتر از مقاومت فلز جوش باشد، در حین آزمایش از محدوده تغییرشکل‌های خطی فراتر نرفته و تمام تغییرشکل‌ها به‌جوش اعمال می‌شود و در نتیجه تغییرشکل جوش فراتر از نقطه تسلیم شده و موجب گسیختگی در منطقه فلز جوش می‌گردد.

جوشکاری ورق‌ها. انتخاب صحیح الکترود، اولین گام در تولید جوش سالم می‌باشد. با توجه به‌اینکه ورق‌ها عموماً در تمام وضعیت‌ها جوشکاری می‌شوند، الکترود مورد استفاده برای ورق‌ها باید مناسب برای تمام وضعیت‌ها بوده و شکل‌پذیری مناسبی داشته باشد، به‌همین جهت باید از طبقه E6010، E6011، E6017 یا E6018 باشند. از سیم‌جوش E70S در جوشکاری ورق‌ها با جوش قوسی تحت حفاظت گاز استفاده می‌شود.

مهمترین مرحله در اجرای جوش، پاس اول (یا پاس ریشه) در جوش شیاری و پاس ریشه در جوش گوشه می‌باشد. باید کوشش کافی از طرف جوشکار جهت نفوذ کافی، ذوب مناسب و سلامت فلز جوش در پاس ریشه انجام گیرد.

هیچ‌گونه عملیات اصلاحی توسط پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش برای پذیرفتن آزمایش مجاز نیست. این امر باعث گرم شدن تدریجی ورق شده و باعث می‌گردد ورق بعد از تکمیل عملیات جوشکاری به‌ملایمت سرد شود. جوشکار تحت هیچ شرایطی مجاز نیست که قطعه جوش شده را در آب سرد قرار داده و یا از هر طریق دیگری سرد شدن قطعه را پس از جوشکاری تسریع کند.

عملیات پرداخت نمونه آزمایشی. توجه کافی به‌پرداخت سطحی نمونه آزمایش ضروری است و عدم دقت در انجام آن می‌تواند باعث مردود شدن جوش سالم شود. پس از پایان جوش، عملیات تراشکاری و سنگ‌زنی قطعه باید در امتداد طولی بر روی نمونه انجام شود. انجام این عمل در جهات دیگر موجب اثراتی خواهد شد که به‌شکست قطعه منجر می‌شود. هرقدر در عملیات پرداخت، سطح صاف‌تری ایجاد گردد، شانس پذیرفتن نمونه آزمایشی بیشتر است. حتی یک شکاف عرضی باریک ممکن است تحت شرایط سخت تنشی آزمایش باز شود.

هرگونه گرده جوش (پاس تقویتی) چه در سطح رویی و چه در جوش ریشه باید زدوده شود. همواری لبه‌های نمونه آزمایشی باید شعاعی معادل ۱/۵ میلی‌متر داشته باشد که با برش تأمین می‌شود. پس از سنگ‌زنی نمونه و

هنگامی که نمونه گرم است، هیچ‌گاه آن را در داخل آب قرار ندهید. این عمل موجب ایجاد ترک‌های ریز سطحی خواهد شد که تحت آزمایش خمش بزرگتر می‌شوند.

پس از آنکه نمونه آزمایشی تحت خمش قرار گرفت، سطح محدب نمونه باید از لحاظ ترک، شکست و دیگر معایب کنترل شود. هر نمونه‌ای که ترک و دیگر معایب (بازشدنی) آن ناشی از آزمایش خمش، بیش از ۳ میلی‌متر در هر جهت دلخواه اندازه‌گیری شود، قابل قبول نیست. البته ترک‌های ایجادشده در کنج‌های نمونه در حین انجام آزمایش شامل این مطلب نیست.

۸ ـ ۳ ـ ۳ آزمایش‌های مخرب جوش شیاری

پس از تهیه نمونه آزمایشی و برش آن به‌قطعات کوچکتر و تهیه آزمونه‌ها، آزمایش‌های لازم روی آنها انجام می‌شود. آزمایش‌های مخرب جوش شیاری عبارتند از:

(الف) آزمایش کشش مقطع کاهش‌یافته

(ب) آزمایش خمش هدایت‌شده

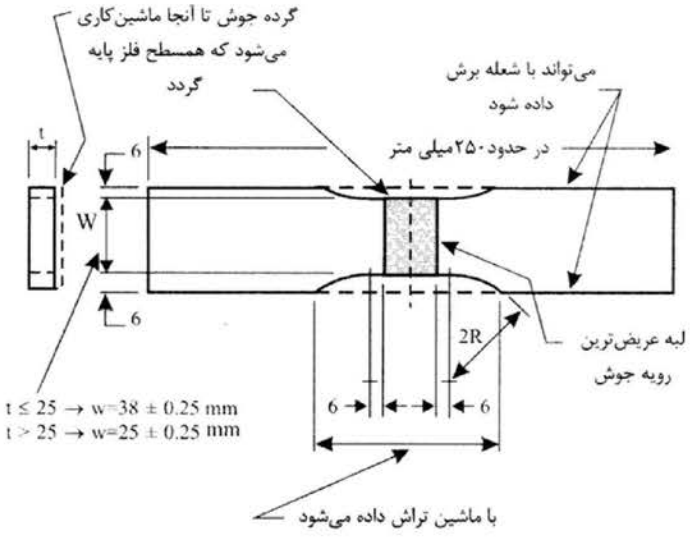
(پ) آزمایش شکست نمونه زخم‌دار

(ت) آزمایش کشش روی نمونه تمام مصالح

الف) آزمایش کشش مقطع کاهش‌یافته

این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی جوش و تنها به‌منظور ارزیابی دستورالعمل جوشکاری به‌کار می‌رود. این آزمایش می‌تواند برای اتصالات لب به‌لب با جوش شیاری هم در ورق و هم در لوله‌ها به‌کار رود.

اندازه و شکل نمونه‌های آزمایشی. هندسه و شکل نمونه‌ها در شکل ۸ ـ ۱۰ ارایه شده است.



شکل ۸ ـ ۱۰ آزمایش کشش مقطع کاهش‌یافته.

روش آزمایش. این آزمایش با اعمال نیروی کششی طولی بر نمونه انجام می‌شود و مقدار بار تا آنجا افزایش می‌یابد که موجب شکست نمونه یا جدا شدن آن به‌دو قسمت مجزا شود. این عمل معمولاً با استفاده از ماشین آزمایش کشش انجام می‌شود. قبل از انجام آزمایش، کمترین عرض و ضخامت ورق در محل کاهش مقطع برحسب میلی‌متر یا سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شود.

نمونه آزمایشی تحت اثر بار کششی گسیخته شده و حداکثر بار وارده در لحظه گسیختگی برحسب کیلونیوتن یا تن تعیین می‌گردد.

سطح مقطع عرضی طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

ضخامت × عرض = سطح مقطع عرضی

مقاومت کششی جوش برحسب N/mm^2 یا kg/cm^2 از تقسیم حداکثر بار اندازه‌گیری شده بر سطح مقطع عرضی به‌دست می‌آید.

در انجام یک آزمایش دقیق، محاسبات فوق لازم است، ولی برای آزمایشی که در آن فقط تعیین مقاوم‌تر بودن اتصال جوشی نسبت به‌ورق مورد نظر است، گرده جوش حذف نمی‌شود و نمونه آزمایشی تا حد گسیختگی کشیده می‌شود. در کنار انجام این نوع آزمایش هیچ‌گونه محاسبه‌ای انجام نمی‌گیرد.

نتایج مورد نیاز. نمونه آزمایشی باید دارای مقاومت کششی، برابر یا بزرگتر از موارد زیر باشد:

- حداقل مقاومت کششی فلز پایه
- پایین‌ترین مقاومت کششی از میان مصالح غیر هم‌جنس
- مقاومت کششی فلز جوش، اگر مقاومت فلز جوش کمتر از مقاومت فلز پایه باشد.
- ۵ درصد کمتر از حداقل مقاومت کششی فلز پایه در صورتی که در هنگام آزمایش، نمونه در قسمت فلز پایه و خارج از قسمت جوش شکسته شده باشد.

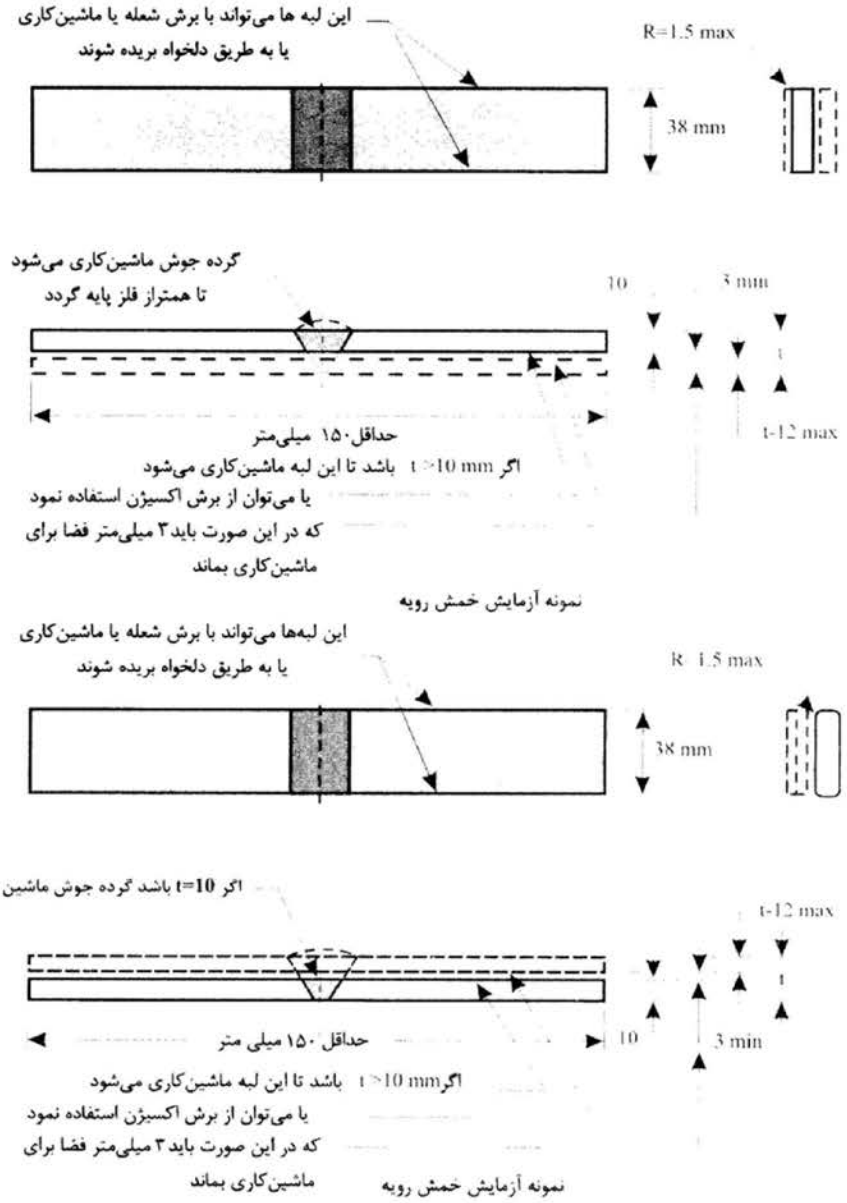
ب) آزمایش خمش هدایت‌شده

آزمایش‌های خمش ریشه، خمش رویه و خمش جانبی (خمش‌گونه)

این آزمایش‌ها با هدف آشکارسازی عدم سلامت جوش، عدم نفوذ و امتزاج فلز جوش انجام می‌شود و برای ارزیابی دستورالعمل جوشکاری و صلاحیت جوشکاران مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش در مورد جوش‌های شیاری در ورق‌ها و لوله اعمال می‌شود. آزمایش خمش رویه (خمش سطحی) کیفیت امتزاج فلز جوش در دیواره‌ها و سطح درز اتصال، تخلخل، حبس سرباره و حفره‌های گازی و دیگر معایب احتمالی را کنترل می‌کند. این آزمایش همچنین میزان شکل‌پذیری جوش را اندازه می‌گیرد. آزمایش خمش ریشه، میزان نفوذ و امتزاج فلز جوش را در داخل ریشه درز اتصال کنترل می‌کند. آزمایش خمش جانبی به‌منظور کنترل سلامت و میزان ذوب فلز جوش می‌باشد.

اندازه و شکل نمونه‌های آزمایش. هندسه نمونه‌های آزمایشی مطابق شکل‌های ۸ ـ ۱۱ تا ۸ ـ ۱۳ می‌باشد.

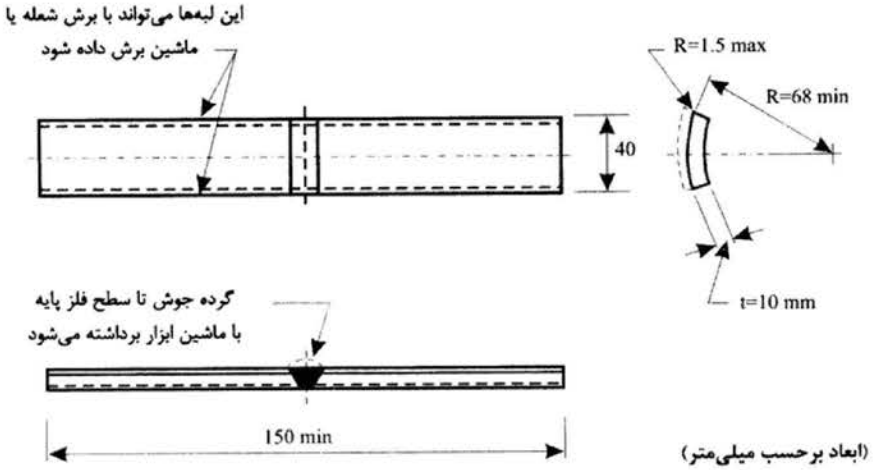
روش آزمایش. نمونه در داخل دستگاهی با مشخصات نشان داده شده در شکل ۸ ـ ۱۴ قرار گرفته و با اعمال فشار سنبه، خمیده می‌شود. توجه کنید که برای ورق و لوله یک اندازه وجود دارد. از هر وسیله‌ای، اعم از دستی، مکانیکی، الکتریکی و یا هیدرولیکی می‌توان برای رانش سنبه به‌داخل گیره استفاده نمود (شکل۸ ـ ۱۵).



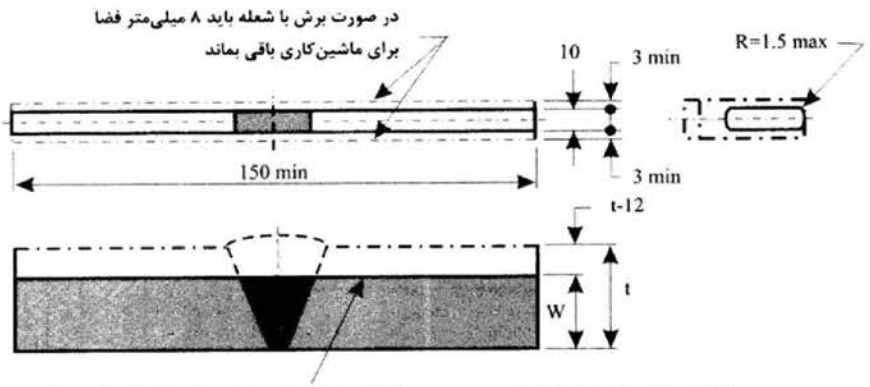
توجه: انجام آزمایش‌های خمش رویه و خمش ریشه بر روی ورق‌های نازکتر از ۱۰ میلی‌متر امکان‌پذیر نیست.

شکل ۸ ـ ۱۱ نمونه‌های آزمایش خمش رویه و خمش ریشه.

نمونه آزمایشی بر روی شکاف دستگاه طوری قرار داده شود که جوش در وسط دهانه قرار گیرد. نمونه‌های آزمایش خمش رویه طوری قرار می‌گیرند که سطح جوش به‌سمت شکاف، و نمونه‌های آزمایش خمش ریشه طوری قرار می‌گیرند که ریشه جوش به‌سمت شکاف، و نمونه‌های آزمایش خمش جانبی طوری قرار می‌گیرند که گونه دارای معایب و شکاف‌های بزرگتر (البته در صورت وجود) به‌سمت شکاف وسیله باشند. پس از قرارگیری نمونه در محل و جهت مناسب، سنبه به‌سمت قالب فشار داده می‌شود تا میزان انحنای نمونه به‌مقداری برسد که یک سیم به‌قطر ۰/۸ میلی‌متر از میان فضای انحنای تحتانی گیره و نمونه آزمایشی عبور نکند. سپس نمونه آزمایشی از داخل گیره خارج می‌شود.

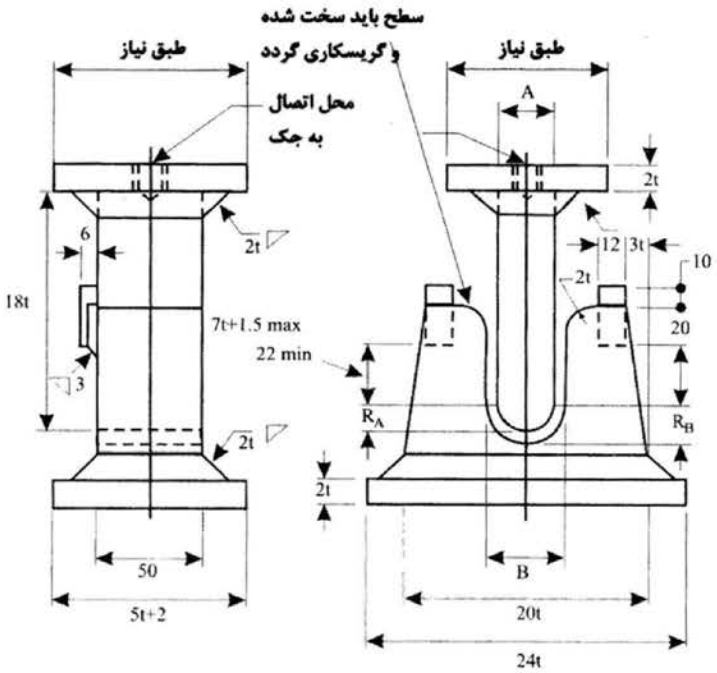


شکل ۸ ـ ۱۲ نمونه آزمایش خمش رویه و خمش ریشه جوش در لوله‌ها.

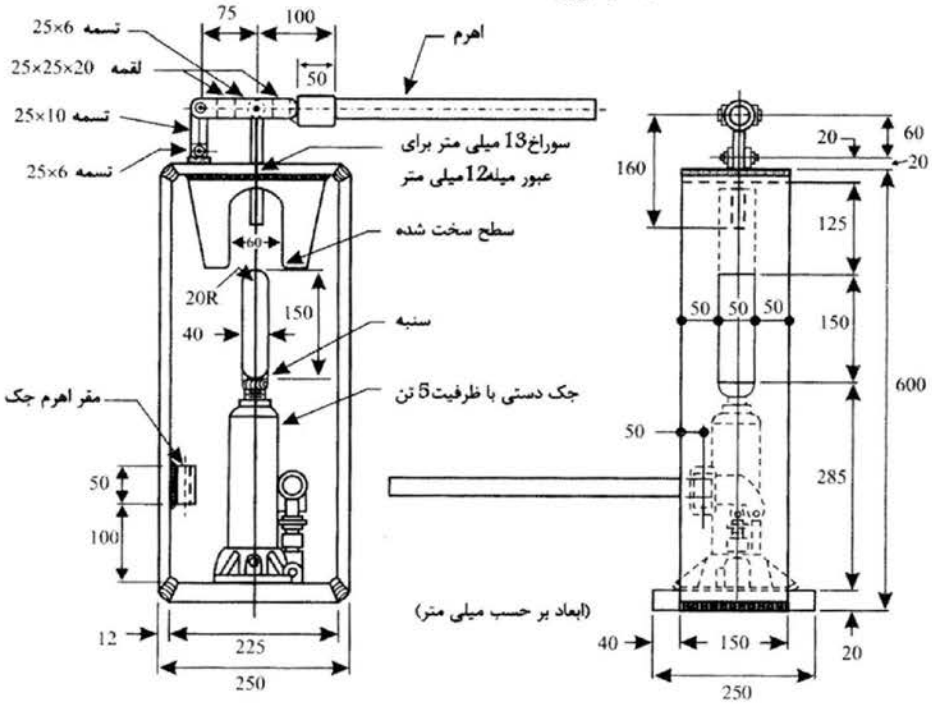


t(mm)	W(mm)
12-40	t
>40	40

شکل ۸ ـ ۱۳ نمونه آزمایش خمش جانبی.



شکل ۸ ـ ۱۴ دستگاه مورد استفاده در آزمایش خمش هدایت‌شده که برای ارزیابی صلاحیت جوشکاران در جوشکاری طبق ضوابط آیین‌نامه AWS و API به‌کار می‌رود.



شکل ۸ ـ ۱۵ دستگاه آزمایش خمش هدایت‌شده با جک دستی قابل تهیه در کارگاه‌های جوشکاری و آموزشگاه‌های جوشکاری.

پذیرش نتایج. سطح محدب نمونه پس از انجام آزمایش از لحاظ ظهور ترک‌ها و شکاف‌های طولی و دیگر معایب بازرسی می‌شود. هر نمونه‌ای که طول ترک‌ها و دیگر معایب ایجادشده بر سطح آن پس از اعمال خمش در هر جهت دلخواه بیش از ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شود، مردود اعلام می‌شود. ترک‌های ایجادشده در کنج نمونه مشمول محدودیت فوق نیستند مگر اینکه طول ترک بیش از ۳ میلی‌متر تا ۶ میلی‌متر باشد و مدرکی دال بر حبس سرباره یا معایب داخلی وجود داشته باشد.

شکل‌های ۸ ـ ۱۶ و ۸ ـ ۱۷ را برای تطابق و مقایسه نمونه‌های مناسب و معیوب مطالعه کنید.

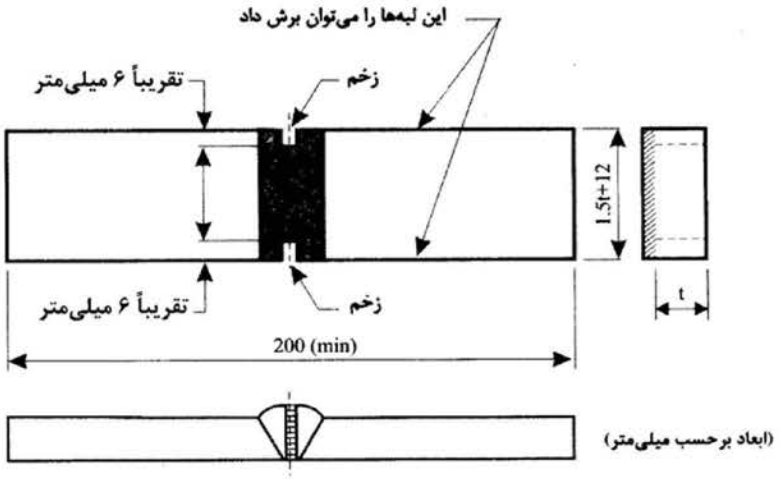
شکل ۸ ـ ۱۶ نمونه‌های آزمایش خمش رویه. نمونه سمت راست به‌طور رضایت‌بخشی در آزمایش مقاومت کرد در حالی که نمونه سمت چپ قبل از خمش کامل ترک خورد و شکست.

شکل ۸ ـ ۱۷ نمونه آزمایش خمش ریشه. نمونه سمت راست به‌طور رضایت‌بخشی در آزمایش مقاومت کرده در حالی که نمونه سمت چپ قبل از خمش کامل ترک خورده و شکسته شده است. به‌نفوذ کامل جوش در نمونه مورد قبول توجه کنید.

پ) آزمایش شکست نمونه زخم‌دار

آزمایش شکست بر روی نمونه زخم‌دار با هدف تعیین سلامت جوش انجام می‌شود. این آزمایش در یک دوره زمانی کاربرد نسبتاً وسیعی داشت، ولی امروزه تعداد افراد کمی هستند که صلاحیت ارزیابی ساختمان بلورین مقطع شکسته‌شده جوش را داشته باشند. بنابراین این آزمایش به‌رغم دیگر آزمایش‌ها چندان قابل اطمینان نیست.

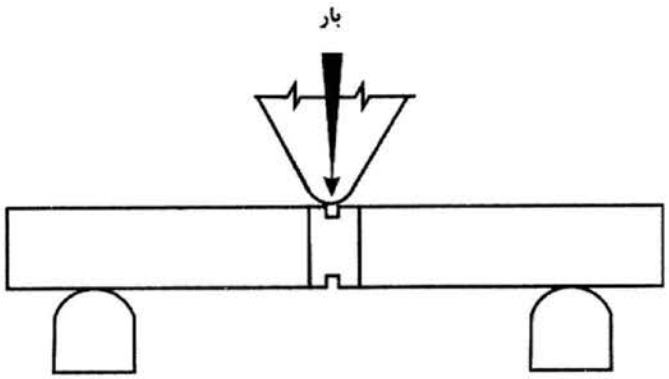
اندازه و شکل نمونه‌ها. مطابق شکل ۸ ـ ۱۸ می‌باشد.



شکل ۸ ـ ۱۸ آزمونه شکست نمونه زخم‌دار (ورق).

روش انجام آزمایش. گرده جوش از روی نمونه مورد آزمایش برداشته نمی‌شود. شیاری در هر دو وجه نمونه به‌کمک اره ایجاد می‌گردد. سپس نمونه بر روی دو تکیه‌گاه ثابت قرار گرفته و با استفاده از چکش ضربه‌ای سریع و تیز مطابق شکل ۸ ـ ۱۹ به‌آن وارد می‌شود. این عمل باعث ایجاد شکست در قسمت زخم‌دار نمونه می‌گردد. فلز جوش از لحاظ معایبی نظیر حبس سرباره و اکسید، حفره‌های گازی و امتزاج ناقص فلز جوش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (شکل ۸ ـ ۲۰).

پذیرش نتایج. شرایط لازم برای پذیرش نمونه آزمایشی آن است که میزان تخلخل سطح شکسته شده نباید بیش از یک حفره گازی در هر سانتی‌متر مربع از سطح جوش باشد. حداکثر بعد هریک از حفره‌های فوق در هر امتداد نباید بزرگتر از ۱/۵ میلی‌متر باشد. همچنین مطالعه سطح شکسته باید امتزاج کامل فلز جوش و عاری بودن آن از اختلاط سرباره را نشان دهد.



شکل ۸ ـ ۱۹ روش شکستن نمونه زخم‌دار.

شکل ۸ ـ ۲۰ نمونه زخم‌دار بعد از شکست. مطالعه نشان می‌دهد جوش سالم و عاری از سرباره و اختلاط اکسید و سرباره و حفره‌های گازی بوده و میزان ذوب نیز کامل است.

ت) آزمایش کشش تمام مصالح

در این آزمایش مطابق شکل ۸ ـ ۲۱ نمونه‌ای از داخل جوش شیاری توسط عملیات ماشین‌کاری حاصل می‌گردد. این نمونه که جنس آن تماماً از مصالح جوش‌شده می‌باشد، تحت آزمایش کشش قرار گرفته و نمودار تنش ـ کرنش برای آن رسم می‌گردد. کرنش نظیر گسیختگی در این آزمایش بستگی به‌مصالح الکترود دارد.

۸ ـ ۳ ـ ۴ آزمایش‌های مخرب جوش گوشه

آزمایش‌های مخرب جوش گوشه عبارتند از:

(الف) آزمایش کشش مستقیم برای برش طولی و برش عرضی

(ب) آزمایش خمش هدایت‌شده جوش گوشه

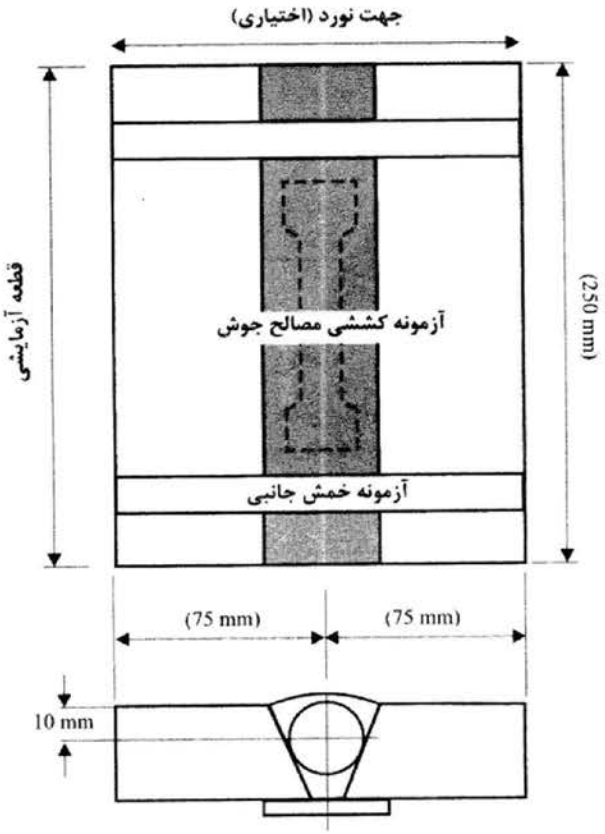
(پ) آزمایش شکست نمونه کنج

الف) آزمایش کشش مستقیم برای برش طولی و برش عرضی

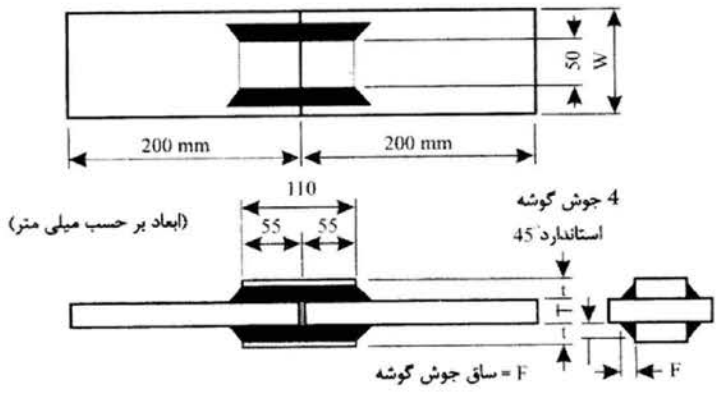
این آزمایش‌ها مقاومت برشی جوش گوشه را تعیین می‌کنند و معمولاً برای ارزیابی نحوه اجرای جوشکاری به‌کار می‌روند.

اندازه و شکل نمونه‌های آزمایشی. هندسه نمونه‌ها مطابق شکل‌های ۸ ـ ۲۲ تا ۸ ـ ۲۴ می‌باشد.

روش آزمایش. نمونه مورد نظر با کشیدن توسط دستگاه آزمایش کششی گسیخته می‌گردد. حداکثر بار وارده برحسب تن یا کیلونیوتن تعیین می‌شود.

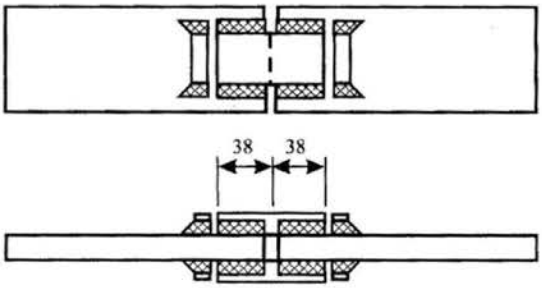


شکل ۸ ـ ۲۱ نمونه آزمایش کشش تمام مصالح.

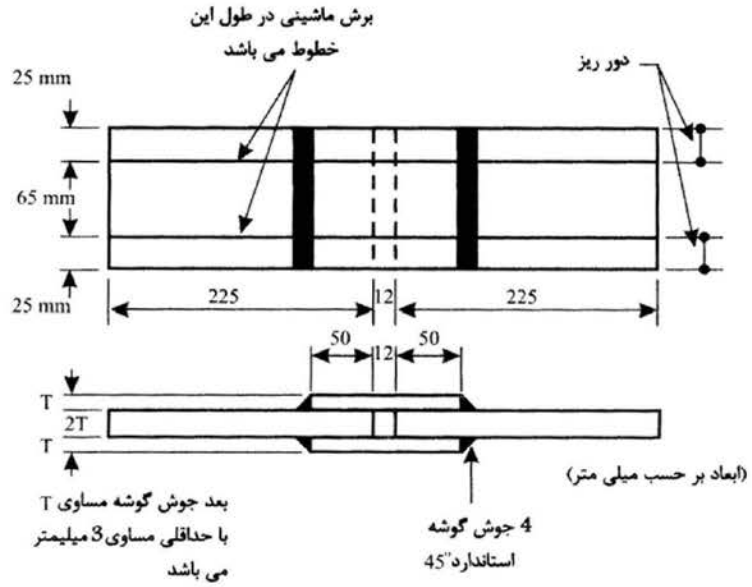


ابعاد				
ساق جوش	3	6	10	12
ضخامت (t) (میلی متر)	10	12	20	25
ضخامت (T) (میلی متر)	10	10	25	32
عرض(W) (میلی متر)	75	75	75	90

شکل ۸ ـ ۲۲ نمونه آزمایش برش طولی جوش گوشه.



شکل ۸ ـ ۲۳ نمونه آزمایش برش طولی جوش گوشه که برای آزمایش آماده‌سازی شده است.



شکل ۸ ـ ۲۴ نمونه آزمایش برش عرضی جوش گوشه.

الف ـ ۱) جوش عرضی. مقاومت برشی جوش برحسب kg/cm یا N/mm با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\text{ظرفیت برشی جوش عرضی (نیرو بر واحد طول)} = \frac{\text{حداکثر بار}}{\text{عرض نمونه} \times 2} \qquad (۸ ـ ۱)$$

تنش مقاوم برشی جوش برحسب kg/cm^2 یا N/mm^2 با استفاده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{تنش برشی نهایی جوش عرضی (نیرو بر واحد سطح)} = \frac{\text{ظرفیت برشی جوش عرضی (نیرو بر واحد طول)}}{\text{اندازهٔ گلوی جوش عرضی (واحد طول)}} \qquad (۸ ـ ۲)$$

الف ـ ۲) جوش طولی. ظرفیت برشی جوش برحسب kg/cm یا N/mm از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

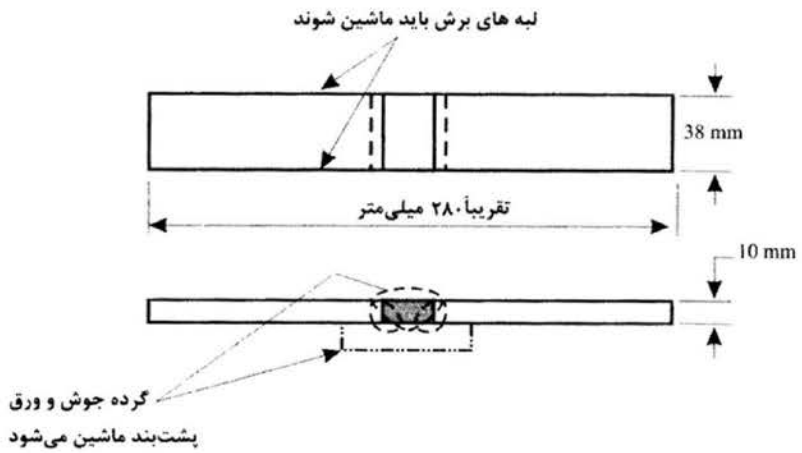
$$\text{ظرفیت برشی جوش طولی (نیرو بر واحد طول)} = \frac{\text{حداکثر بار}}{\text{کل طول جوش}} \qquad (۸ ـ ۳)$$

$$\text{تنش برشی نهایی جوش طولی (نیرو بر واحد سطح)} = \frac{\text{ظرفیت برشی جوش طولی (نیرو بر واحد طول)}}{\text{اندازهٔ گلوی جوش طولی (واحد طول)}} \qquad (۸ ـ ۴)$$

ب) آزمایش خمش هدایت‌شده جوش گوشه[3]

این آزمایش عدم سلامت فلز جوش در جوشکاری گوشه را مشخص می‌کند:

اندازه و شکل نمونه‌های آزمایش. هندسه نمونه مطابق شکل ۸ ـ ۲۵ می‌باشد.



شکل ۸ ـ ۲۵ نمونه آزمایش خمش هدایت‌شدهٔ جوش گوشه.

روش آزمایش. هر نمونه در قالبی که دارای سنبه و دیگر ملحقات نشان داده شده در شکل ۸ ـ ۱۴ می‌باشد، خمیده می‌شود. از هر وسیله مناسبی می‌توان جهت رانش سنبه به‌داخل قالب استفاده نمود. نمونه آزمایشی به‌گونه‌ای در روی دهانه قالب قرار می‌گیرد که جوش در وسط دهانه باشد. نمونه در جهتی قرار می‌گیرد که ریشه جوش رو به‌شکاف دستگاه باشد. پس از اعمال خمش، نمونه از داخل گیره خارج می‌شود.

پذیرش نتایج. سطح محدب نمونه از لحاظ ظهور ترک‌های سطحی و دیگر معایب، بعد از آزمایش کنترل می‌شود. نمونه‌هایی که طول ترک ایجادشده در آنها در هر جهت دلخواه بعد از انجام آزمایش خمش بیش از ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شود، مردود می‌باشد. ترک‌های با طول کمتر از ۱/۵ میلی‌متر که در کنج‌های نمونه در حین آزمایش ایجاد می‌شود، شامل محدودیت فوق نیستند.

3. Guided - bend test

پ) آزمایش شکست جوش گوشه

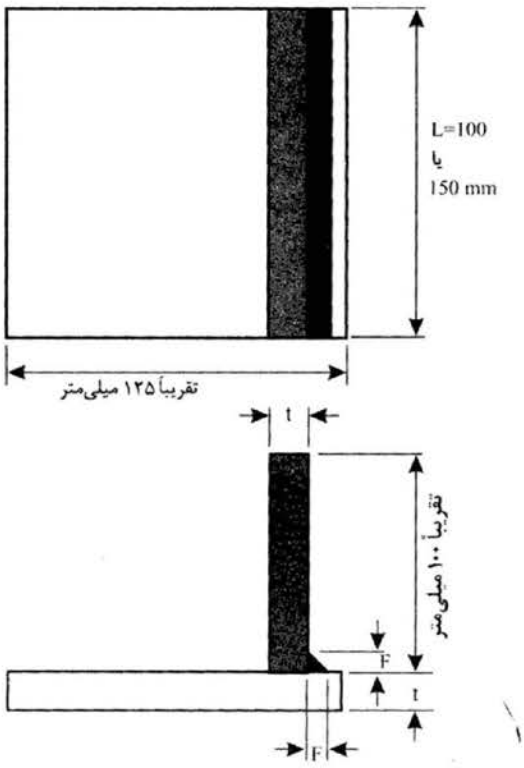
این آزمایش با هدف تعیین سلامت جوش گوشه انجام می‌شود.

اندازه و شکل نمونه آزمایشی. نمونه آزمایشی برای ارزیابی جوشکاران طبق آیین‌نامه AWS در شکل ۸ ـ ۲۶ نشان داده شده است.

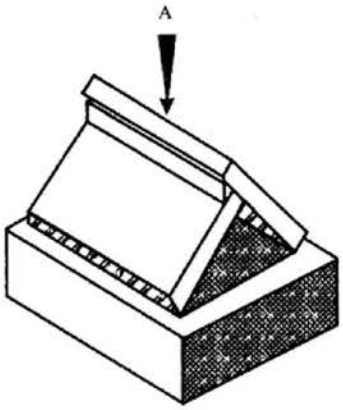
روش آزمایش. نمونه آزمایشی با اتصال یک ورق به‌ورق دیگر (تحت زاویه قائمه) مطابق شکل ۸ ـ ۲۶ توسط جوش گوشه ساخته می‌شود. سپس مطابق شکل ۸ ـ ۲۷ نمونه با اعمال فشار از طریق دستگاه آزمایش یا استفاده از چکش دستی شکسته می‌شود. با انجام این عمل جوش گوشه از ناحیه ریشه شکسته می‌شود (شکل ۸ ـ ۲۸).

فلز جوش شکسته از لحاظ معایبی نظیر حبس سرباره و اکسیدها در فلز جوش، وجود حفره‌های هوا، امتزاج ناقص، نفوذ ریشه و توزیع غیریکنواخت فلز جوش بررسی می‌شود.

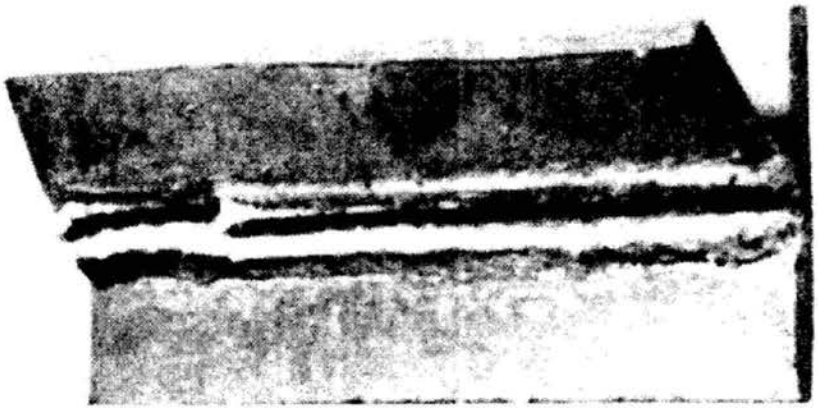
پذیرش نتایج (روش AWS). جوش طبق شکل ۸ ـ ۲۸ باید در ناحیه گلو گسیخته شود. جوش انجام‌شده باید دارای نفوذ کامل در ریشه بوده و فاقد اثر حبس سرباره یا حفره گازی باشد.



شکل ۸ ـ ۲۶ نمونه آزمایش شکست جوش گوشه.



شکل ۸ ـ ۲۷ روش شکستن نمونه آزمایش شکست جوش گوشه.



شکل ۸ ـ ۲۸ یک نمونه گسیخته‌شده در آزمایش شکست جوش‌گوشه. ملاحظه کنید که جوش در قسمت مرکزی شکسته است. این نفوذ و توزیع یکنواخت فلز جوش را نشان می‌دهد.

۸ ـ ۳ ـ ۵ آزمایش‌های دیگر

علاوه‌بر آزمایش‌های مخرب که در قسمت‌های قبل شرح داده شد، روش‌های آزمایش دیگر نیز در صنعت جوشکاری نظیر آزمایش حک، ضربه و خستگی وجود دارند.

۸ ـ ۳ ـ ۵ ـ ۱ آزمایش حک

اغلب باید مقطعی از جوش تهیه شده و پس از حک‌کاری برای عیب‌یابی مورد بررسی قرار گیرد. روش حک‌کاری میزان نفوذ فلز جوش و همچنین سلامت جوش را در مقطع مورد نظر مشخص می‌کند (شکل ۸ ـ ۲۹). بررسی جوش در مقطع مورد نظر با اهداف زیر دنبال می‌شود:

- تعیین سلامت جوش
- آشکار شدن مرزهای بین فلز جوش و فلز پایه و همچنین بین لایه‌های مختلف فلز جوش
- تعیین محل و عمق نفوذ جوش
- بررسی متالورژی ناحیه تفتیده (HAZ)

شکل ۸ ـ ۲۹ نمونه حک‌کاری‌شده فولاد کرم‌دار که جوش شیاری چند پاسه را در یک اتصال جناغی یکطرفه نشان می‌دهد.

حک‌کاری عمیق، معایب بی‌ضرری نظیر ترک‌ها و تخلخل‌های کوچک را به‌طور اغراق‌آمیزی بزرگ نشان می‌دهد. بنابراین بازبینی سطحی باید به‌محض مشخص شدن واضح جوش انجام شود و حک‌کاری نباید به‌میزانی باشد که موجب تخریب حجم داخلی نمونه گردد. سطح مورد مطالعه ممکن است با استفاده از لایه نازکی از رنگ شفاف محافظت شود. در این صورت بازبینی سطح با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شده یا با دوربین‌های مخصوص از ساختار داخلی آن عکس تهیه کرد.

در این روش، یک مقطع عرضی از اتصال جوش‌شده جهت عملیات حک‌کاری بریده می‌شود. عمل برش درز اتصال با استفاده از یک اره دنده ریز انجام می‌شود. سطح فلز جوش و فلز پایه باید سوهان شود تا به‌یک سطح صاف تبدیل شده و سپس با سنباده ریز پرداخت شود. این سطح با یکی از انواع محلول‌های حک‌کاری پرداخت می‌شود که معروف‌ترین آنها اسیدنیتریک می‌باشد.

اسید نیتریک. این محلول از اختلاط ۱ واحد اسید نیتریک غلیظ و ۳ واحد حجمی آب به‌دست می‌آید. در هنگام استفاده از اسیدنیتریک دقت کنید زیرا موجب سوختگی شدید خواهد شد. همیشه اسید نیتریک را با مخلوط کردن در آب رقیق کنید.

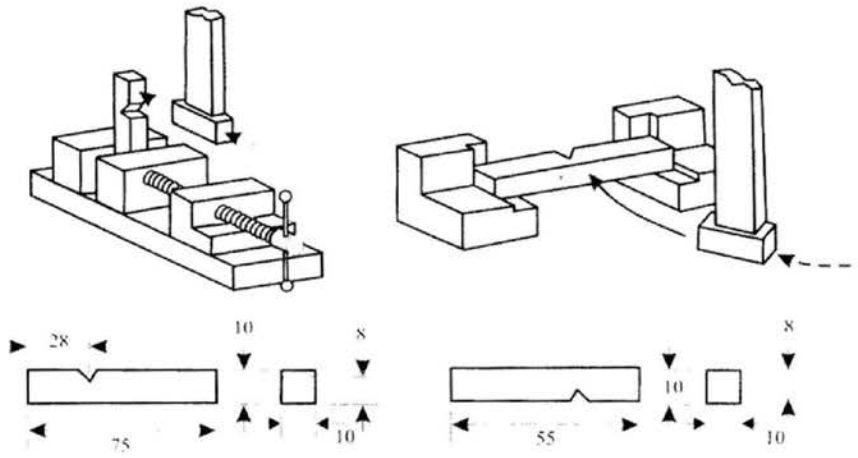
اسید نیتریک تهیه‌شده ممکن است توسط یک میله شیشه‌ای (نظیر لوله پیتوت آزمایشگاه) بر روی سطح جوش پرداخت شده و در دمای معمولی اتاق ریخته شود، یا ممکن است نمونه مورد نظر در محلول جوشیده مستغرق شود. در هنگام آزمایش از تهویه مناسب هوای اتاق مطمئن باشید. انجام حک‌کاری با اسید نیتریک باید سریع انجام شود. پس از حک‌کاری، نمونه باید بلافاصله توسط آب گرم شسته شود. پس از آن آب اضافی را خشک کرده و سطح حک‌کاری‌شده را در الکل قرار دهید. سپس نمونه را خارج کرده و با قرار دادن نمونه در معرض وزش هوای گرم آن را خشک کنید. ظاهر جوش ممکن است با پوششی از لایه نازک و شفاف محافظت شود.

۸ ـ ۳ ـ ۵ ـ ۲ آزمایش ضربه

هدف از انجام آزمایش ضربه، تعیین مقاومت ضربه‌ای جوش و فلز پایه در یک سازه جوش‌شده می‌باشد. منظور از مقاومت ضربه‌ای، طاقت فلز در مقابل ضربه ناگهانی و سریع می‌باشد. این آزمایش اطلاعات لازم در مورد مقایسه طاقت ضربه‌ای فلز جوش و فلز پایه را فراهم می‌کند. یک جوش یا فلز ممکن است مقاومت کششی زیادی داشته و شکل‌پذیری بالایی در تنش‌های کششی از خود نشان دهد ولی تحت اثر ضربات ناگهانی و سریع دچار شکستگی شود که به‌خاطر فقدان طاقت ضربه‌ای مصالح است.

آزمون‌های شارپی و ایزود

دو روش استاندارد برای آزمایش ضربه وجود دارد: آزمایش ایزود و آزمایش شارپی. در این روش‌ها نمونه آزمایشی با یک ضربه می‌شکند و مقاومت ضربه‌ای نمونه برحسب واحد نیرو ـ طول که واحد کار و انرژی است، سنجیده می‌شود. (در فیزیک کار به‌صورت حاصل‌ضرب نیرو در جابه‌جایی نقطه اثر نیرو تعریف می‌شود) دو نوع نمونه آزمایشی مورد استفاده در این روش‌ها و در ضمن شیوه اعمال بار در مورد آنها در شکل ۸ ـ ۳۰ نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۸ ـ ۳۰ نمونه آزمایشی آزمون ضربه ایزود (شکل الف) و آزمون ضربه شارپی (شکل ب) و روش اعمال بار در هر روش. نمونه‌های زخم‌دار (شیار V) مطابق شکل دارای زاویه پخی ۴۵ درجه و شعاع کف معادل ۰/۲۵ میلی‌متر در محل شیار می‌باشند.

۸ ـ ۴ آزمایش‌های غیرمخرب

آزمایش‌های غیرمخرب در برنامه کنترل کیفیت (QC) قرار می‌گیرند و از آن برای تأیید جوش تمام‌شده استفاده می‌شود. انواع آزمایش‌های غیرمخرب عبارتند از:

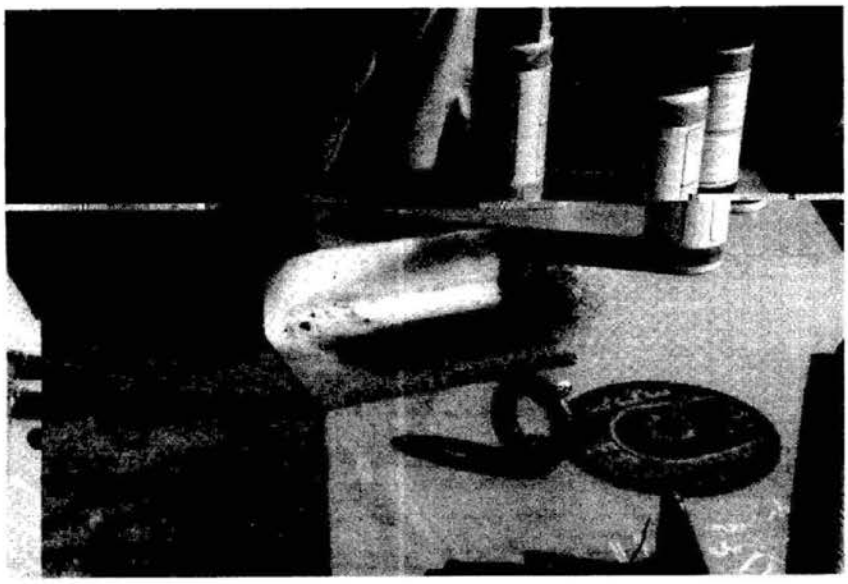
۸ ـ ۴ ـ ۱ بازرسی با مواد نافذ[4] (PT)

بازرسی با مواد نافذ یکی از شیوه‌های غیرمخرب برای محل‌یابی معایب سطحی می‌باشد. مشابه روش پرتونگاری، این آزمایش برای فلزات غیرمغناطیسی نظیر فولاد ضدزنگ، آلومینیوم، منیزیم و تنگستن و پلاستیک‌ها نیز قابل کاربرد است. آزمایش با مواد نافذ جهت تشخیص عیوب داخلی قابل استفاده نمی‌باشد. محدودیت این آزمایش عدم امکان استفاده از آن برای مواد متخلخل (Porous) می‌باشد.

آزمایش با رنگ نافذ قرمز

سطح مورد بازرسی باید در ابتدا از لکه‌های روغن، گریس و مواد ناخالص و خارجی توسط ماده آماده‌ساز (پرایمر) تمیز شود. سپس ماده نافذ قرمز رنگی روی سطح پاشیده می‌شود که در داخل ترک‌ها و سایر ناهمواری‌ها نفوذ می‌کند. رنگ اضافی از روی سطح پاک‌شده و سپس یک مایع فوق‌العاده فرار حاوی ذرات ریز سفید رنگ بر روی سطح پاشیده می‌شود. این ماده به‌نام ماده ظهور (ظاهرکننده) خوانده می‌شود.

تبخیر مایع فرار باعث برجای ماندن گرد خشک سفید رنگ بر روی ماده قرمز نفوذ کرده در ترک‌ها می‌گردد و بر اثر عمل موبینگی، ماده قرمز از ترک بیرون کشیده شده و پودر سفید کاملاً قرمز می‌شود. به‌همین جهت ترک مورد نظر به‌وضوح با این روش قابل شناسایی است (شکل ۸ ـ ۳۱).



شکل ۸ ـ ۳۱ آزمایش با رنگ نافذ در یک اتصال جوشی.

4. *Penetration test*

ضوابط پذیرش در آزمایش با رنگ نافذ، مطابق آیین‌نامهٔ AWS، مانند ضوابط پذیرش بازرسی عینی می‌باشد.

۸ ـ ۴ ـ ۲ آزمون ذرات مغناطیسی[5] (MT)

آزمون ذرات مغناطیسی یکی از آسان‌ترین آزمایش‌های غیرمخرب جوشکاری است. این آزمایش برای بررسی و بازبینی عیوب سطحی و نزدیک به‌سطح ورق‌ها قبل از جوشکاری و برای معایبی از قبیل ترک‌های سطحی، ذوب ناقص، تخلخل،بریدگی، نفوذ ناقص ریشه و اختلاط سرباره در نوار جوش به‌کار می‌روند. این روش محدود به مواد مغناطیسی‌شونده نظیر چدن، فولاد، نیکل و کروم بوده و برای مواد و فلزات غیرمغناطیسی مانند فولاد ضدزنگ، آلومینیوم و مس کاربرد ندارد. نام دیگر این آزمایش، روش پودر یا گرد مغناطیسی است.

این آزمایش که در شکل ۸ ـ ۳۲ نشان داده شده، محل ترک‌های داخلی و سطحی بسیار ریز را برای رؤیت با چشم غیرمسلح آشکار می‌کند. معایب موجود توسط این روش در عمقی معادل ۵ تا ۷ میلی‌متر زیر سطح جوش قابل تشخیص هستند. معایب عمیق‌تر با این روش قابل شناسایی نیستند.

قطعه مورد آزمایش با استفاده از جریان الکتریکی جهت ایجاد میدان مغناطیسی در داخل مصالح، مغناطیسی می‌گردد. سطح مغناطیسی‌شده قطعه، با لایه نازکی از یک گرد مغناطیسی نظیر اکسید آهن قرمز پوشیده می‌شود. این لایه گرد در صورت عدم وجود عیب در جوش یا فلز پایه به‌شکل میدان مغناطیسی و در راستای خطوط میدان در می‌آید، ولی در صورت وجود هر گونه ناپیوستگی که موجب ایجاد نشت میدان گردد، با ایجاد دو قطبی جدید در محل عیب در آن نقطه تجمع پودر اتفاق می‌افتد که از این طریق ناپیوستگی مذکور آشکار می‌گردد.

ضوابط پذیرش در آزمایش ذرات مغناطیسی مطابق آیین‌نامهٔ AWS، مانند ضوابط پذیرش بازرسی عینی است.

مطابق استاندارد ASME، بازرس آزمایشات PT و MT فقط مجاز به تعیین خطی یا کروی بودن عیب بوده و حد پذیرش و یا رد این عیوب نیز در استاندارد به‌شرح زیر می‌باشد:

۱ ـ کلیهٔ نشانه‌ها (Indications) کوچکتر از ۱/۶ میلی‌متر قابل پذیرش می‌باشند.

۲ ـ کلیهٔ عیوب خطی با ابعاد بزرگتر از ۱/۶ میلی‌متر غیرقابل پذیرش بوده و باید تعمیر گردد.

۳ ـ کلیهٔ عیوب کروی با ابعاد بزرگتر از ۴/۸ میلی‌متر غیرقابل پذیرش بوده و باید تعمیر گردد.

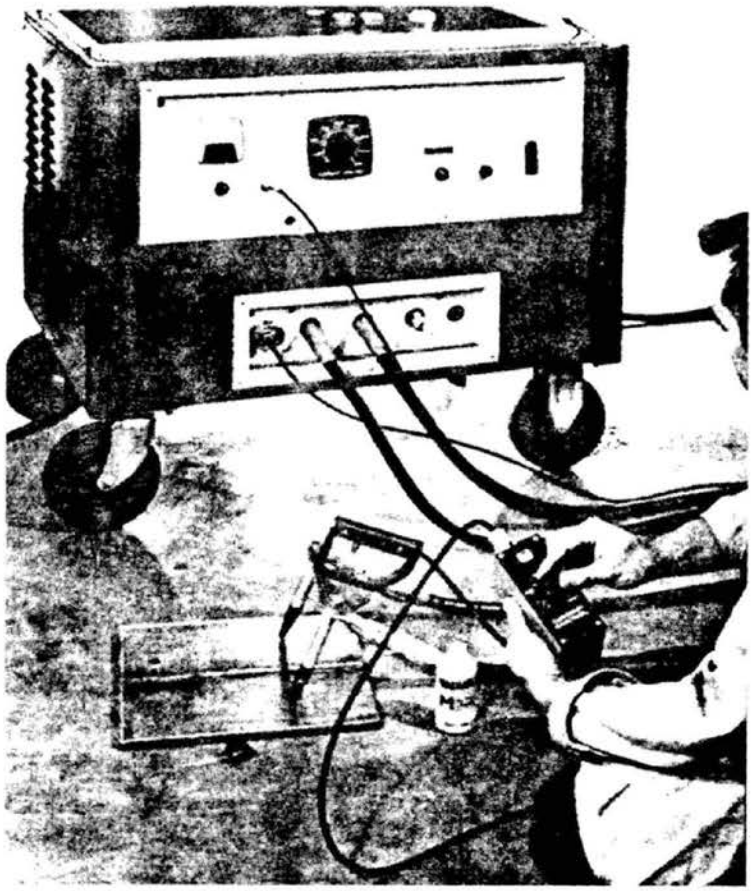
لازم به‌ذکر است علایمی که طول آنها بزرگتر از سه برابر عرض آنها باشد به‌عنوان عیوب خطی ارزیابی می‌شوند.

۸ ـ ۴ ـ ۳ آزمون فراصوتی[6]

آزمون فراصوتی یکی از آزمایش‌های نسبتاً پیشرفته در رده آزمایش‌های غیرمخرب می‌باشد. این روش سریع بوده و قادر به‌تشخیص معایب داخلی بدون نیاز به‌قطعه جوش‌شده می‌باشد. چون این روش از نزدیک کنترل می‌شود، قابلیت ارایه اطلاعات دقیق و مورد نیاز قطعه جوش‌شده، بدون نیاز به‌یک‌سری عملیات پر کار را دارا می‌باشد. این روش هم معایب سطحی و هم نواقص داخلی فلز جوش و فلز پایه را مشخص، مکان‌یابی و اندازه‌گیری می‌کند.

5. *Magnetic Particle testing (MT)*
6. *Ultrasonic Testing*

آزمایش فراصوتی با انتشار امواج از یک فرستنده (بلور کوارتز تحت جریان متناوب)، که مشابه یک موج صوتی ولی با فرکانس بالاتری است، انجام می‌شود. موج‌های فراصوتی از داخل قطعه مورد آزمایش عبور داده می‌شوند و با هرگونه تغییر در تراکم داخلی قطعه، منعکس می‌شوند. امواج منعکس‌شده توسط گیرنده جذب شده و پس از تقویت، روی صفحه نمایشگر (اسیلوسکوپ) به‌صورت منحنی‌های ضربانی ظاهر می‌گردند. ارتفاع این منحنی‌های ضربانی نسبت به‌یک خط مبنا قابل تنظیم است.

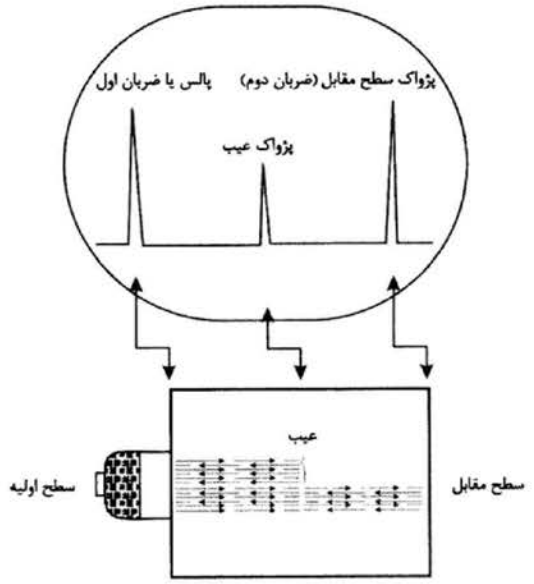


شکل ۸ ـ ۳۲ دستگاه آزمایش ذرات مغناطیسی.

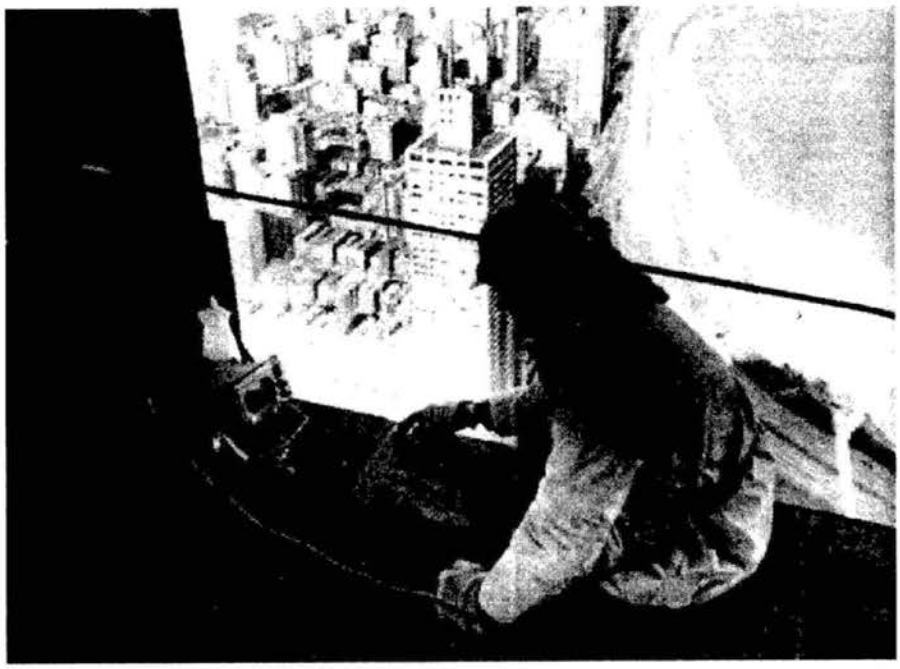
هنگامی که واحد جستجوگر (پروب) روی مصالح مورد نظر قرار داده می‌شود (حدفاصل سطح پروب و سطح جسم باید به‌یک ماده روغنی به‌نام کوپلنت آغشته شود)، دو نوع پژواک بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شود. ضربان اول، انعکاس صدا از سطح رویی جسم که در تماس با دستگاه است و ضربان دوم مربوط به‌انعکاس موج از سطح مقابل است. فاصله بین این دو ضربان با دقت کالیبره می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که مصالح در شرایط مناسبی از نظر معایب و نواقص داخلی قرار دارد. هنگامی که یک عیب یا ترک داخلی توسط واحد جستجو (پروب) پیدا شود، ضربان سومی بین ضربان اول و دوم بر روی صفحه نمایش ثبت می‌شود (شکل ۸ ـ ۳۳).

بنابراین مشخص می‌شود که محل این عیب بین سطوح بالا و پایین مصالح (در داخل جسم مصالح) می‌باشد. فاصله میان ضربان‌ها و ارتفاع نسبی آنها، محل و میزان سختی (تراکم) عیب مزبور را مشخص می‌کند.

یک مورد از کاربرد روش آزمایش فراصوتی در شکل ۸ ـ ۳۴ برای بازرسی اتصال جوشی بال فوقانی تیر به‌ستون نشان داده شده است.



شکل ۸ ـ ۳۳ انعکاس امواج در برخورد با سطوح ورق و عیب، به‌صورت امواج ضربانی بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شوند.



شکل ۸ ـ ۳۴ کاربرد یک دستگاه آزمایش فراصوتی قابل حمل در کنترل جوش ساختمانی در طبقه ۷۶ یک آسمان خراش.

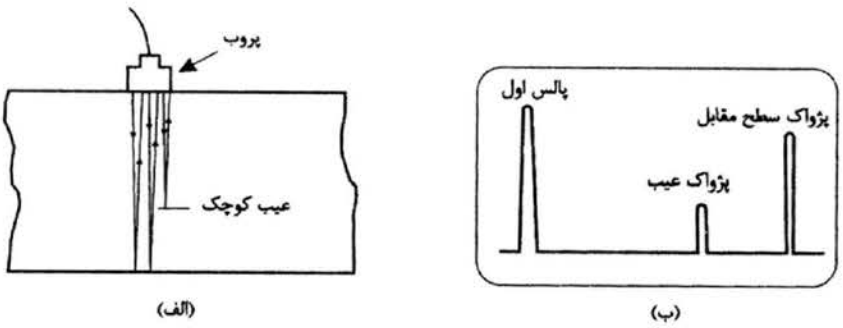
۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۱ نوع نمایش تصویری در آزمون فراصوتی

اطلاعاتی را که طی آزمون فراصوتی به‌دست می‌آیند به‌چند طریق می‌توان به‌صورت تصویر نمایش داد.

● نمایش تصویری A

معمول‌ترین سیستمی که مورد استفاده قرار می‌گیرد نمایش تصویری روبشی "A" است. یک موج ناقص در سمت چپ صفحه اسیلوسکوپ ظاهر می‌شود که مربوط به‌پالس اولیه است، موج‌های ناقص دیگری نیز در سمت چپ صفحه اسیلوسکوپ ظاهر می‌شوند که مربوط به‌علامت پژواک‌های دریافتی هستند. ارتفاع پژواک معمولاً متناسب با اندازه سطح بازتاب است، ولی مسافتی که پژواک طی می‌کند و اثرات تضعیف درون ماده روی آن تأثیر دارد. در هر صورت، با فرض یک مبنای خطی زمان، موقعیت خطی پالس (پژواک) متناسب با فاصله سطح بازتاب از پروب است. این نوع نمایش تصویری در تکنیک‌های بازرسی با پروب دستی معمول است.

از معایب نمایش تصویری روبشی "A" این است که ثبت دائم تصویر ممکن نیست، مگر اینکه از تصویر اسیلوسکوپ عکس گرفته شود. البته دستگاه‌های جدید پیشرفته دارای وسایل ثبت دیجیتال هستند.

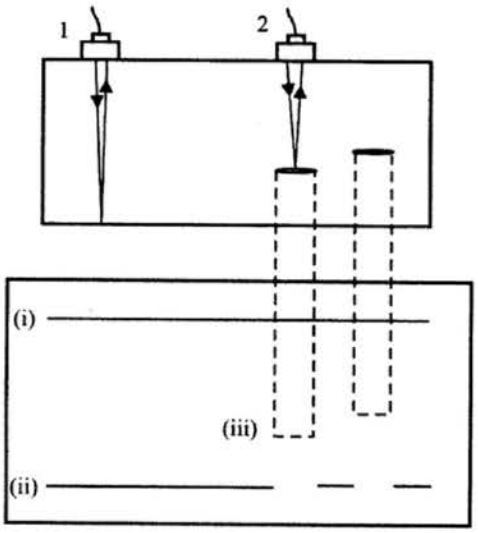


شکل ۸ ـ ۳۵ نمایش تصویری روبشی"A": (الف) بازتاب‌هایی که از دیواره پشتی قطعه و یک عیب داخلی به‌دست آمده‌اند؛ (ب) نحوهٔ نمایش تصویری روبشی "A".

● نمایش تصویری B

با نمایش تصویری روبشی "B" می‌توان موقعیت عیب درون قطعه را ثبت کرد. این سیستم در شکل ۸ ـ ۳۶ نشان داده شده است. لازم است که بین موقعیت پروب و اثر عیب، ارتباط مختصاتی به‌وجود بیاید. استفاده از نمایش تصویری روبشی "B" به‌تکنیک‌های آزمون اتوماتیک و نیمه‌اتوماتیک محدود می‌شود.

هنگامی که پروب در موقعیت (۱) است علایم روی صفحه اسیلوسکوپ مطابق شکل هستند، (i) نشان‌دهنده پالس اولیه و (ii) نمودار دیواره پشتی قطعه است. وقتی که پروب به‌موقعیت (۲) می‌رسد، خط (iii) روی تصویر نشان‌دهنده عیب است. این طرز نمایش از مقطع قطعه کار می‌تواند روی یک نمودار کاغذی ثبت عکاسی، و یا اینکه روی مانیتور ثابت نمایش داده شود.



شکل ۸ ـ ۳۶ نمایش تصویری روبشی "B".

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۲ تکنیک‌های بازرسی در آزمون فراصوتی

وجود یک عیب در داخل یک ماده را می‌توان با استفاده از تکنیک امواج فراصوتی عبوری یا بازتابی پیدا کرد.

● روش بازتابی با پروب عمودی

این روش در آزمون فراصوتی از معمولی‌ترین تکنیک‌هاست و در شکل ۸ ـ ۳۵ یا ۸ ـ ۳۶ نمایش داده شده است. تمام یا بخشی از پالس توسط عیب داخل ماده، بازتاب یافته و به‌وسیله پروب دریافت می‌شود. این پروب به‌صورت فرستنده و گیرنده عمل می‌کند. فاصله زمانی بین ارسال پالس و دریافت پژواک برای محاسبه فاصله عیب از پروب به‌کار می‌رود.

روش بازتابی نسبت به‌روش عبوری دارای مزایای معینی است که عبارتند از:

الف) قطعه کار به‌هر شکلی می‌تواند باشد.

ب) فقط دسترسی به‌یک طرف قطعه کار مورد نیاز است.

پ) فقط یک نقطه تماس وجود دارد و در نتیجه مقدار خطا حداقل می‌شود.

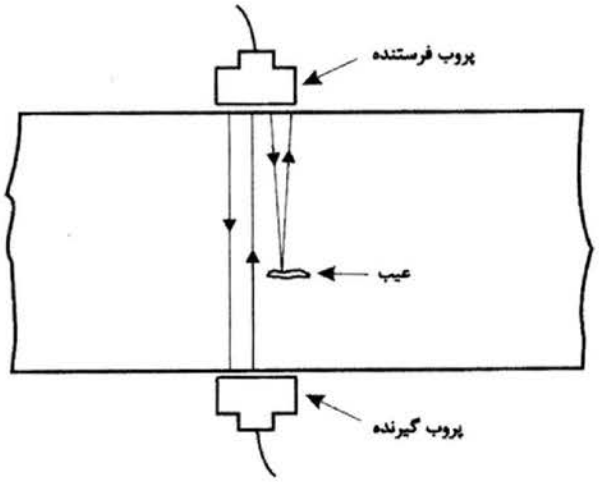
ت) فاصله عیب‌ها از پروب می‌تواند اندازه‌گیری شود.

● روش عبوری با پروب عمودی

در این روش فرستنده با استفاده از روغن کوپلنت با سطح قطعه کار تماس برقرار می‌کند. یک پروب دریافت‌کننده روی سطح مقابل ماده نصب می‌شود (شکل ۸ ـ ۳۷).

اگر در داخل ماده هیچ‌گونه عیبی وجود نداشته باشد، علامتی با یک شدت معین به‌گیرنده خواهد رسید. اگر

مابین پروب فرستنده و گیرنده عیبی وجود داشته باشد، شدت علامت دریافتی کاهش خواهد یافت. این امر به‌علت بازتاب جزئی پالس عیب است که بدین ترتیب می‌توان به‌وجود عیب پی برد.



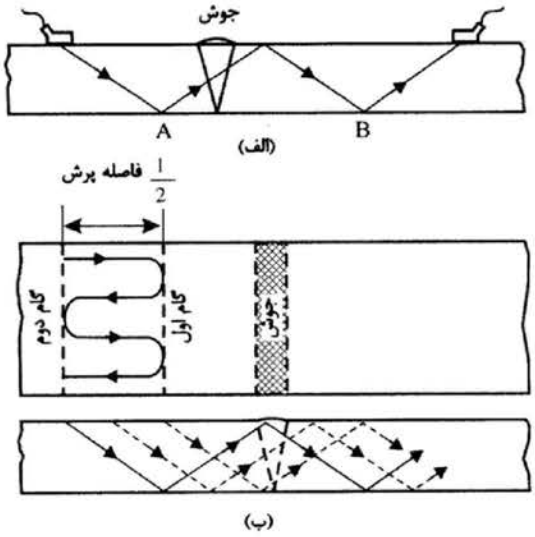
شکل ۸ ـ ۳۷ روش عبوری با پروب عمودی.

این روش معایبی دارد که عبارتند از:

الف) قطعه کار باید دارای دو سطح موازی باشد و به‌هر دو سطح آن نیز باید دسترسی داشت.
ب) دو عدد پروب مورد نیاز است لذا جفت کردن آنها ممکن است عمل سیال اتصالی را کم بهره کند.
پ) باید دقت کافی به‌خرج داد تا دو پروب کاملاً در مقابل یکدیگر قرار گیرند.
ت) علایمی از عمق عیب نمی‌توان به‌دست آورد.

• روش عبوری با پروب زاویه‌ای

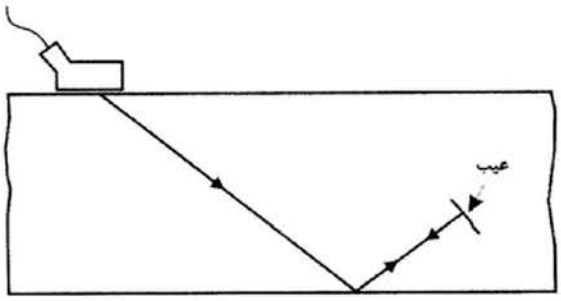
وضعیت‌های بخصوص آزمون وجود دارند که در آن‌ها امکان به‌کارگیری از پروب‌های عمودی برای شناسایی عیب وجود ندارد و تنها راه‌حل معقول این است که از یک پروب زاویه‌ای استفاده شود. مثال خوبی از این روش بازرسی جوش‌های لب به‌لب صفحات هم امتداد است. اگر درمنطقه جوش عیبی وجود داشته باشد، شدت علامت دریافتی کاهش خواهد یافت. فاصله AB را فاصله/پرش می‌نامند و برای روبش کامل ناحیهٔ جوش، پروب‌ها باید مطابق شکل روی سطح قطعه جابه‌جا شوند. در عمل هر دو پروب باید در یک حامل نصب شوند تا همیشه فاصله درستی از هم داشته باشند (شکل ۸ ـ ۳۸).



شکل ۸ ـ ۳۸ روش عبوری با پروب زاویه‌ای: (الف) موقعیت پروب‌ها و فاصله پرش؛ (ب) روش روبش برای بازرسی کامل یک جوش لب‌به‌لب.

● روش بازتابی با پروب زاویه‌ای

همچنان که در شکل ۸ ـ ۳۹ دیده می‌شود با به‌کاربردن یک پروب زاویه‌ای در حالت بازتابی می‌توان عیب‌ها را ردیابی کرد. ذکر این نکته مهم است، هنگامی که در این‌گونه آزمون‌ها از پروب زاویه‌ای استفاده می‌شود، آشکارساز عیب باید به‌دقت با استفاده از یک قطعه مرجع، کالیبره شود. طراحی و استفاده از قطعات مرجع در بخش بعدی شرح داده می‌شود.



شکل ۸ ـ ۳۹ روش بازتابی با پروب زوایه‌ای.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۳ اصول تشخیص عیوب در آزمایش فراصوتی

بازرسین آزمایش فراصوتی باید درک خوبی از فرآیند آزمایش فراصوتی و محدودیت‌های آن جهت اطمینان از به‌کارگیری پارامترهای مناسب آزمایش داشته باشند. بازرس فراصوتی باید انواع عیوب و ناپیوستگی‌های ممکن را که

احتمال دارد در فرآیند تولید به‌وجود آمده باشد، بشناسد. شناخت متغیرها و انتخاب تجهیزات مناسب، امکان دستیابی شرایط بهینه آزمایش را افزایش می‌دهد.

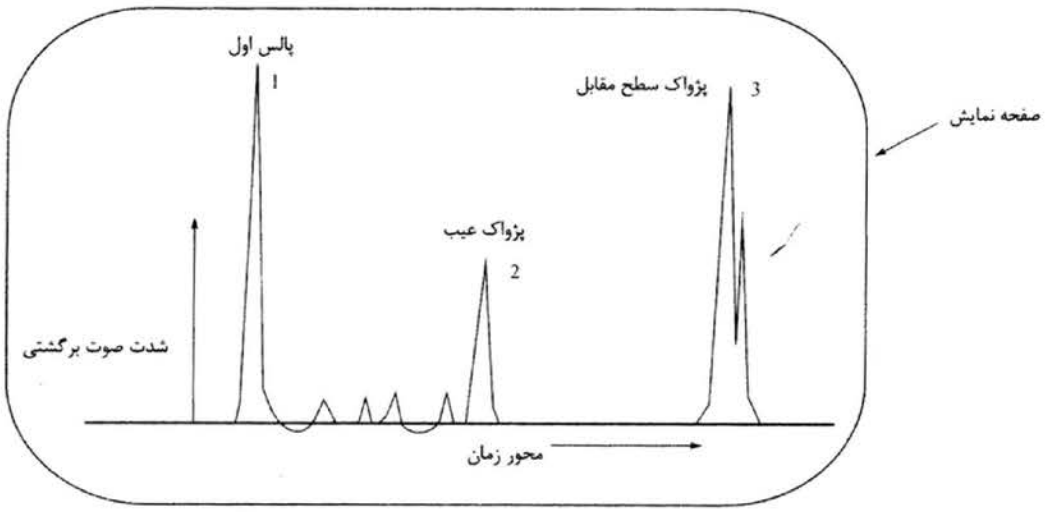
برای رسیدن به‌حساسیت مناسب، طول موج پرتوهای فراصوتی و دامنه فراوانی سیگنال منتشرشده باید به‌طور صحیحی انتخاب شود، طول موج صوت نباید بزرگتر از دو برابر کوچکترین اندازه عیوب (عمود بر جهت انتشار صوت) باشد. گاهی اوقات، اندازه، شکل، نوع، جهت‌گیری و محل ناپیوستگی بر قابلیت آن جهت ایجاد انعکاس فراصوتی مؤثر است. با فرض اینکه طول آنقدر کوتاه باشد که بتوان موج بازتاب ناپیوستگی را دید، ناپیوستگی مدور، مانند تخلخل، کمترین پژواک و عیوب تخت بیشترین پژواک را دارند.

الگوهای اسکن باید براساس دانش انتشار موج و محل انجام بازرسی انتخاب گردد.

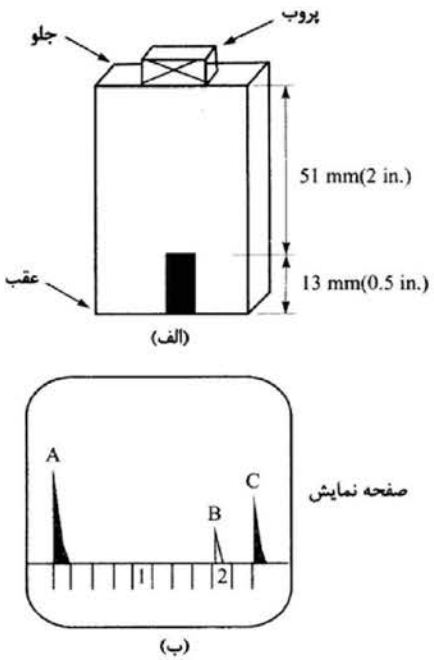
الف ـ تخمین اندازه عیوب

در صفحهٔ نمایشی نوع A ، امواج برگشتی (پژواک) از نمونه مورد آزمایش به‌پالس‌های (سیگنال‌های) الکتریکی قابل نمایش روی صفحه دستگاه تبدیل می‌شوند. فراوانی این امواج برگشتی متناسب با ارتفاع پالس نشان داده شده روی صفحه نمایش می‌باشد، در حالی‌که فاصله تا عیب (زمان برگشتی) در محور افقی دستگاه از سمت چپ به‌راست خوانده شود (شکل ۸ ـ ۴۰). در شکل ۸ ـ ۴۱ ـ الف واحد جستجوگر را روی قطعه مرجع با ارتفاع ۶۴ میلی‌متر که در کف آن سوراخی با ارتفاع ۱۳ میلی‌متر است، نشان می‌دهد. در شکل ۸ ـ ۴۱ ـ ب، نمایش اسکن این عیب در عمق ۲ اینچی از سطح می‌باشد. ارتفاع پالس برگشتی، شدت امواج برگشتی را نشان می‌دهد. محور عمودی روی صفحه نمایش (شکل ۸ ـ ۴۲) جهت اندازه‌گیری فراوانی سیگنال‌های متناسب با درصدی از ارتفاع به‌کار می‌رود.

ممکن است که ناپیوستگی، جهت نامناسبی با جهت امواج صوتی منتشرشده داشته باشد، بنابراین باید واحد جستجوگر دستگاه (پروب) را با مهارت لازم حرکت داده تا بیشترین و بالاترین پالس برگشتی از ناپیوستگی حاصل گردد. در حالت استفاده از پروب نرمال (عمودی) این عمل با حرکت جلو و عقب دست انجام می‌شود و در پروب‌های زاویه‌دار حرکت دست به‌صورت عقب جلو کردن با حرکت دایره‌ای در اطراف محل ناپیوستگی انجام می‌شود.



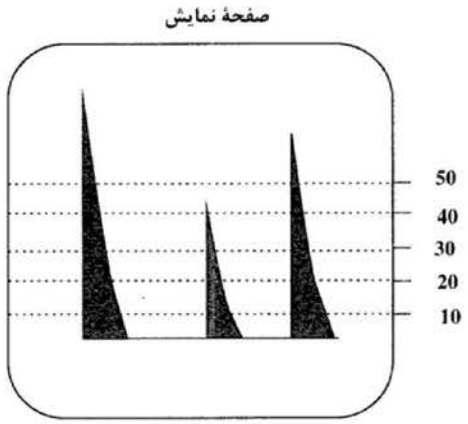
شکل ۸ ـ ۴۰ محورهای افقی و عمودی صفحه نمایش دستگاه فراصوتی.



شکل ۸ ـ ۴۱ بلوک مرجع و نمایش مرتبط با آن.

تخمین اولیه اندازه ناپیوستگی معمولاً با مقایسه کردن بیشترین پالس به‌دست آمده از این عیب با عیوب ساختگی در بلوک‌های مرجع استاندارد به‌دست می‌آید.

به علت اینکه فراوانی امواج برگشتی با تغییر هر دو عامل فاصله از عیب و سطح عیب متناسب است، باید از یک منحنی فاصله ـ فراوانی به‌دست آمده از قطعات مرجع با اندازه یکسان جهت مقایسه استفاده شود. پژواک عیب با این منحنی‌ها مقایسه شده و اندازه عیوب تخمین‌زده می‌شود.



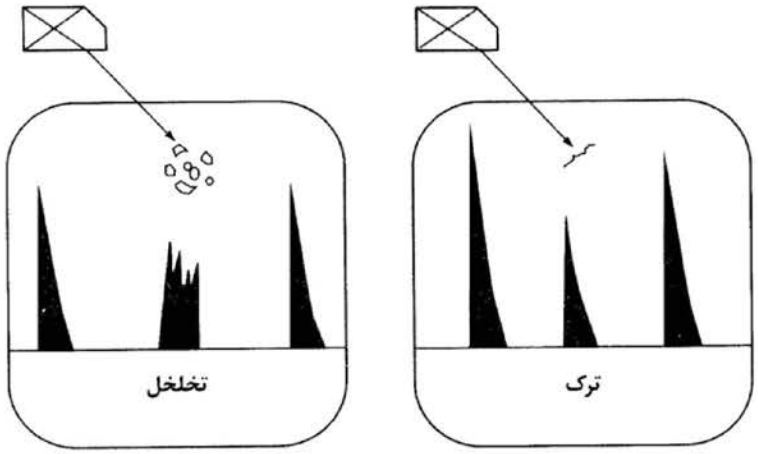
شکل ۸ ـ ۴۲ مقیاس محور عمودی صفحه نمایش.

اندازه‌های تخمین‌زده شده در این روش اغلب از اندازه واقعی عیب کوچکتر است، زیرا پژواک به‌دست آمده متأثر از عواملی نظیر جهت‌گیری عیب و ناصافی سطح، مقاومت قطعه و یا شکل عیب می‌باشد. به‌طور مثال ممکن است پژواک یک عیب سرباره یا آخال محبوس شده در داخل قطعه با اندازه‌ای به‌مراتب بزرگتر از یک حفره تخت، کوچکتر باشد؛ که دلیل آن وجود مقاومت ظاهری بسیار پایین‌تر عیب و فلز پایه می‌باشد.

ب ـ ارزیابی الگوهای پژواک عیوب

از روی شکل و عرض پژواک بازگشتی روی صفحه نمایش، می‌توان به‌طور تقریبی نوع عیب را پیش‌بینی نمود. این اطلاعات غیرعینی بوده و با این فرض می‌باشد که تکنیک آزمایش طوری انتخاب شده که امواج بازگشتی در حالت بیشینه ممکن (با فرض اینکه بازتابنده یک شکل ساده و نامنظمی داشته باشد) می‌باشد.

به‌عنوان مثال، شکل ۸ ـ ۴۳ شکل عمومی پژواک‌های به‌دست آمده از عیوب تخلخل و عیوب ترک مانند را نشان می‌دهد.



شکل ۸ ـ ۴۳ پژواک به‌دست آمده از عیوب رایج تخلخل و ترک.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۴ قطعات مرجع

در آزمون‌های فراصوتی نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌ها با نشانه‌های به‌دست آمده از استانداردهای مرجع مقایسه می‌گردند. قطعات مرجع متعددی برای آزمون‌های فراصوتی وجود دارند که هر یک از آنها با هدف خاصی ساخته شده است.

واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه به‌دو منظور انجام می‌گیرد:

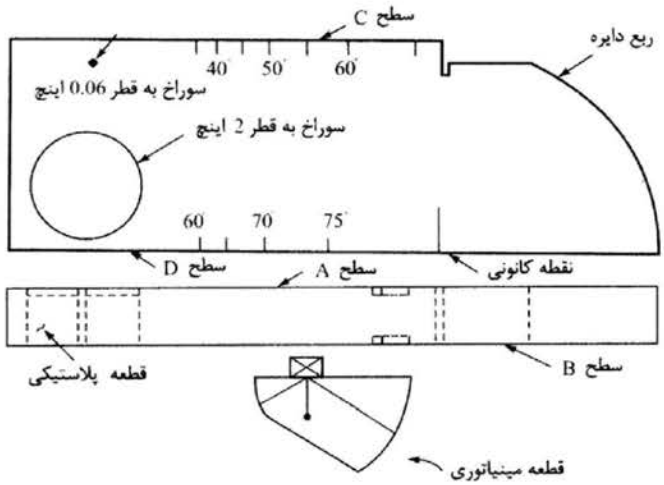
۱) اطمینان از عملکرد صحیح مجموعه دستگاه و پروب؛

۲) تعیین معیار رد و قبول ناپیوستگی.

مقایسه پالس‌های حاصل از ناپیوستگی‌های موجود در نمونه‌های مورد آزمون با پالس‌های ناشی از عیوب مصنوعی که با اندازه و عمق مشخصی در داخل قطعات مرجع استاندارد تعبیه می‌شود، می‌تواند معیار خوبی برای

تشخیص نوع عیب باشد. توجه داشته باشید که تخمین اندازه ناپیوستگی، متأثر از عوامل دیگری چون نوع ناپیوستگی، جهت قرار گرفتن آن و... نیز می‌باشد.

مواد خام مورد استفاده برای ساخت قطعات مرجع با دقت از میان نمونه‌هایی انتخاب می‌شوند که به‌وسیله امواج فراصوتی بازرسی شده و از نظر میزان استهلاک صوت، اندازه دانه‌بندی، و نوع عملیات حرارتی از استانداردهای معینی برخوردارند. ناپیوستگی‌ها ممکن است به‌شکل سوراخ‌های کف تخت[۷]، سوراخ‌های جانبی[۸] و یا شیارهای سطحی در قطعات مرجع ایجاد شوند. قطعات مرجع با دقت بسیار بالایی ساخته شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرند تا اطمینان حاصل شود که تنها ناپیوستگی موجود در این قطعات ناپیوستگی‌ای است که عمداً در قطعه تعبیه شده است.



شکل ۸ ـ ۴۴ قطعات مرجع IIW و مینیاتوری.

قطعه مرجع IIW[۹] و قطعه مرجع مینیاتوری[۱۰] که در شکل ۸ ـ ۴۴ نشان داده شده‌اند، نمونه‌هایی از قطعات مرجع مورد استفاده در صنعت ساختمان هستند که به‌طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی دیگر از قطعات مرجع، قطعه ASME برای کالیبراسیون لوله‌ها[۱۱] است. مشخصات این قطعه در کد ASME برای بویلرها و مخازن تحت فشار[۱۲] آمده است و بسیاری از صنایع از این قطعه استفاده می‌کنند. بسته به‌جنس قطعه، راستای قرار گرفتن ناپیوستگی و نوع کاربرد، قطعات دیگری نیز برای کالیبراسیون دستگاه‌ها ساخته شده است.

---

7. Flat- Bottomed Holes (FBH)

8. Side- Drilled Holes

۹. IIW مخفف نام مؤسسهٔ International Institute of Welding است. به‌قطعهٔ IIW، قطعه (یا بلوک) V1 نیز گفته می‌شود.

۱۰. به‌قطعهٔ مینیاتوری، قطعه V2 یا بلوک قلوه‌ای نیز گفته می‌شود. در انگلیسی به‌قطعهٔ مینیاتوری Romp as Blok نیز می‌گویند.

11. ASME Piping Calibration Block

12. ASME Boiler and Pressure Vessel Code

۸ـ۴ـ۳ـ۵ مراحل انجام آزمون فراصوت

در آزمون‌های فراصوتی نیز مانند دیگر آزمون‌های غیرمخرب، برای دستیابی به‌نتایجی یکسان و تکرارپذیر، باید مراحل خاصی دنبال شود. این مراحل عبارتند از:

۱ ـ واسنجی (کالیبراسیون)

۲ ـ انجام آزمون

۳ ـ تفسیر نتایج

۸ـ۴ـ۳ـ۶ واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه فراصوتی

واسنجی دستگاه فراصوتی یکی از مراحل اساسی در انجام آزمون است. واسنجی عبارت است از تنظیم دستگاه به‌نحوی که کاربر از تشخیص صحیح ناپیوستگی‌های مورد نظر اطمینان داشته باشد. برای واسنجی سیستم فراصوتی باید ابتدا دستگاه به‌همان نحوی که در انجام آزمون‌های واقعی به‌کار برده می‌شود، آماده گردد. سپس دستگاه به‌نحوی تنظیم می‌شود که از ناپیوستگی مصنوعی ایجاد شده در یک قطعه مرجع، پاسخ‌های مناسبی به‌دست آید. نوع، اندازه و محل قرار گرفتن ناپیوستگی‌های مصنوعی در قطعه مرجع معلوم هستند.

۸ـ۴ـ۳ـ۶ـ۱ مراحل انجام واسنجی

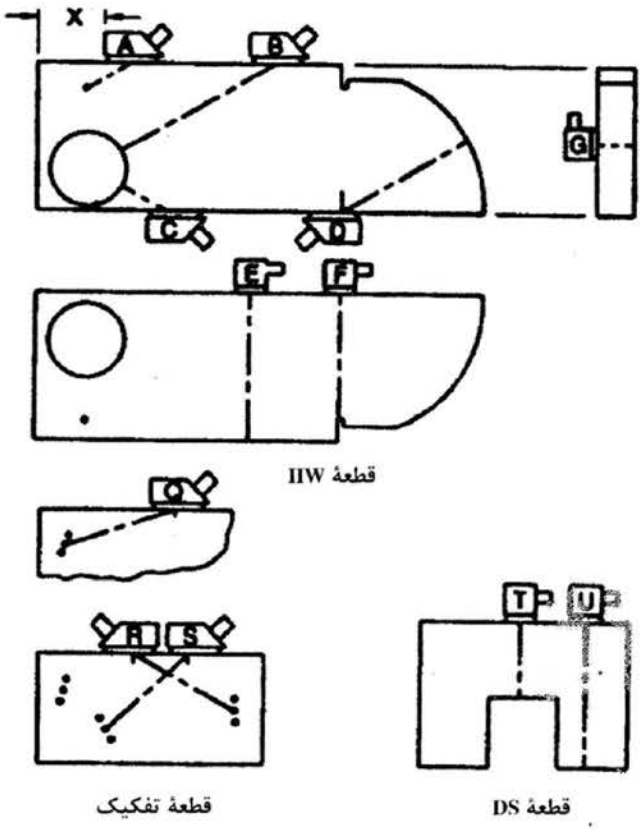
دستگاه‌های فراصوتی باید در فواصل زمانی معینی از نظر الکترونیکی توسط کارخانه سازنده کالیبره شوند تا از عملکرد صحیح و خطی بودن پاسخ دستگاه اطمینان حاصل گردد. پس از واسنجی الکترونیکی دستگاه طبق استانداردهای موجود، کاربر می‌تواند با اطمینان خاطر دستگاه را برای انجام آزمون فراصوتی کالیبره و یا تنظیم نماید. پس از انجام مراحل فوق، می‌توان اطمینان داشت که اندازه‌گیری‌های به‌عمل آمده صحیح و دقیق هستند. اگر دستورالعمل صریحی برای رد یا قبول قطعه وجود نداشته باشد، مرحله انجام واسنجی دستگاه باید با دقت بیشتری انجام گیرد. واسنجی دستگاه با استفاده از قطعات خاصی به‌نام قطعات مرجع استاندارد[۱۳] انجام می‌شود. در بعضی موارد، عیوب واقعی نیز در نمونه‌هایی از قطعات مورد آزمون ایجاد می‌کنند تا ناپیوستگی‌هایی را که احتمال تشکیل آنها در قطعه وجود دارد شبیه‌سازی کنند.

در واسنجی دستگاه فراصوتی، فراهم بودن لوازم و شرایط زیر ضروری است:

- **دستگاه فراصوتی:** یکی از انواع مختلف دستگاه‌های فراصوتی که معمولاً به‌صورت تجاری در بازار موجود است.
- **پروب:** پروب با فرکانس اسمی مناسب.
- **منبع تغذیه:** جریان متناوب برق شهر که ولتاژ آن توسط مبدل ولتاژ تنظیم می‌گردد.
- **ماده واسط (Couplant)**

13. *Standard Reference Blocks*

- **قطعات مرجع:** برای واسنجی دستگاه لازم است مجموعه قطعات مرجع مساحت ـ دامنه و مجموعه قطعات مرجع فاصله ـ دامنه در دسترس باشند. از مجموعه قطعات اصلی ASTM که به‌نوعی هر دو مجموعه مساحت ـ دامنه و فاصله ـ دامنه را در یک مجموعه فراهم می‌سازند نیز می‌توان استفاده کرد.



شکل ۸ ـ ۴۵ وضعیت پروب برای کالیبراسیون روی قطعه IIW.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۶ ـ ۲ واسنجی دستگاه فراصوتی به‌روش AWS روی قطعه IIW (بلوک V1)

الف) واسنجی با پروب نرمال

۱ ـ واسنجی مقیاس طولی:

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب در وضعیت G قرار داده می‌شود. دستگاه باید طوری تنظیم شود که به‌ترتیب فواصل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر را نشان دهد. مقیاس افقی صفحه نمایش دستگاه باید بعد از هر ۴۰ ساعت کار مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد.

۲ ـ واسنجی مقیاس قائم (دامنه Amplitude)

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب در وضعیت G قرار داده می‌شود. دگمه دسی‌بل آنقدر تنظیم می‌شود که ارتفاع پژواک سطح مقابل به ۵۰ و ۷۵ درصد ارتفاع صفحه‌نمایش برسد. دگمه تنظیم دسی‌بل باید در فواصل ۲ ماه واسنجی شود.

۳ ـ تفکیک (Resolution)

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب در وضعیت F قرار داده می‌شود. پروب در دستگاه باید قادر به‌تشخیص جداگانه هر سه فاصله باشد.

ب ـ واسنجی با پروب زاویه‌ای

۱ ـ تعیین نقطه ورود موج از پروب (نقطه شاخص Index Point) به‌این ترتیب که:

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب در وضعیت D قرار داده می‌شود. سپس پروب حرکت داده می‌شود تا پژواکی با دامنه حداکثر به‌دست آید. نقطه‌ای از پروب که در امتداد خط شعاعی از قطعه تنظیم قرار می‌گیرد، نقطه شاخص می‌باشد.

۲ ـ کنترل زاویه انتشار موج:

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب باید در وضعیت B (برای زوایای ۴۰ تا ۶۰ درجه) و یا وضعیت C (برای زوایایی ۶۰ تا ۷۰ درجه) قرار گیرد و به‌طرف سوراخ ۵۰ میلی‌متر هدف‌گیری شود.

برای زاویه انتخابی، باید آنقدر جلو و عقب شود تا پژواک رسیده از سوراخ حداکثر گردد. در این صورت نقطه شاخص در روی عمودی در قطعه تنظیم قرار دارد که با اختلاف ۲ ± درجه باید مساوی زاویه انتشار صوت باشد.

۳ ـ واسنجی مقیاس افقی دستگاه

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب باید در وضعیت D بر روی قطعه تنظیم قرار گیرد (با هر زاویه‌ای). سپس دستگاه طوری واسنجی می‌شود که به‌ترتیب با قراردادن نقطه شاخص در روی اعداد ۱۰۰ و ۲۰۰ در روی قطعه تنظیم، این اعداد در روی صفحه نشان داده شود.

۴ ـ واسنجی مقیاس قائم و حساسیت ـ تعیین تراز مرجع

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب باید در وضعیت A قرار گیرد و به‌سمت سوراخ ۱/۵ میلی‌متر هدف‌گیری شود و آنقدر عقب جلو شود تا حداکثر پژواک دریافت شود. سپس با کمک دگمه دسی‌بل، موج پژواک تبدیل به‌خط افقی می‌شود. حداکثر قرائت برحسب دسی‌بل، تراز مرجع (Reference level) می‌باشد.

۵ ـ تفکیک

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب باید در روی قطعه تفکیک RC در وضعیت Q (برای پروب ۷۰ درجه) یا در وضعیت R (برای پروب ۶۰ درجه) و یا در وضعیت S (برای پروب ۴۵ درجه) قرار گیرد. در این حالت دستگاه باید سه سوراخ را به‌تفکیک نشان دهد.

۶ ـ فاصله تقرب تفکیک

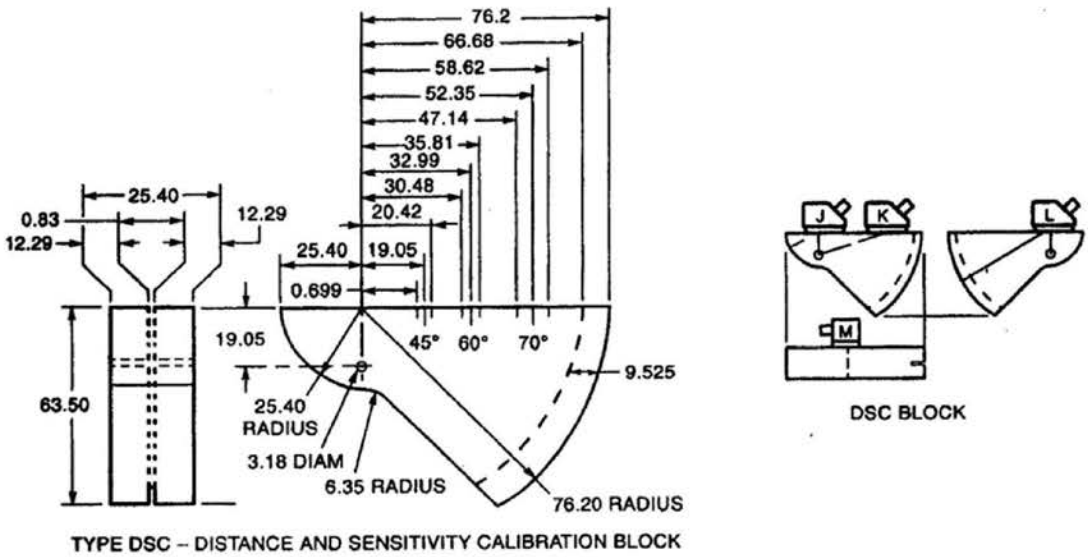
حداقل فاصله مجاز بین پنجه پروب و لبه قطعه کالیبراسیون باید به‌صورت زیر باشد.

برای پروب ۷۰ درجه X= ۵۰ mm

برای پروب ۶۰ درجه X= ۳۷ mm

برای پروب ۴۵ درجه X= ۲۵ mm

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۶ ـ ۳ واسنجی دستگاه فراصوتی به‌روش AWS روی قطعه DSC (بلوک V2)



شکل ۸ ـ ۴۶ وضعیت پروب برای کالیبراسیون روی قطعه DSC (بلوک V2).

الف ـ واسنجی با پروب نرمال

۱ ـ کالیبراسیون مقیاس طولی

مطابق شکل ۸ ـ ۴۶ پروب در وضعیت M قرار داده می‌شود. دستگاه باید طوری تنظیم شود که به‌ترتیب فواصل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر را نشان دهد. مقیاس افقی صفحهٔ نمایش دستگاه باید بعد از هر ۴۰ ساعت کار مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد.

۲ ـ کالیبراسیون مقیاس قائم (دامنه Amplitude)

مطابق شکل ۸ ـ ۴۵ پروب در وضعیت M قرار داده می‌شود. دکمه دسی‌بل آنقدر تنظیم می‌شود که ارتفاع پژواک سطح مقابل به ۵۰ و ۷۵ درصد ارتفاع صفحه نمایش برسد. دکمه تنظیم دسی‌بل باید در فواصل ۲ ماه واسنجی شود.

ب ـ واسنجی با پروب زاویه‌ای

۱ ـ تعیین نقطه ورود موج از پروب (نقطه شاخص) به‌این ترتیب که:

مطابق شکل ۸ ـ ۴۶ پروب در وضعیت J یا L قرار داده می‌شود. سپس پروب حرکت داده می‌شود تا پژواکی با دامنه حداکثر به‌دست آید. نقطه‌ای از پروب که در امتداد خط شعاعی از قطعه تنظیم قرار گیرد، نقطه شاخص می‌باشد.

۲ ـ کنترل زاویه انتشار موج

مطابق شکل ۸ ـ ۴۶ پروب باید در وضعیت K برای زوایای ۴۵ تا ۷۰ درجه قرار گیرد و به‌طرف سوراخ هدف‌گیری شود. برای زاویه انتخابی، باید آنقدر جلو و عقب شود تا پژواک رسیده از سوراخ حداکثر گردد. در این صورت نقطه شاخص در روی علامت عمودی در قطعه تنظیم قرار دارد که با اختلاف ۲± درجه باید مساوی زاویه انتشار صوت باشد.

۳ ـ واسنجی مقیاس افقی دستگاه

مطابق شکل ۸ ـ ۴۶ پروب باید در وضعیت L در روی قطعه تنظیم قرار گیرد (با هر زاویه‌ای). سپس دستگاه طوری واسنجی می‌شود که به‌ترتیب با قرار دادن نقطه شاخص در روی اعداد ۷۵ و ۱۸۰ در روی قطعه تنظیم، این اعداد در روی صفحه نشان داده شود.

پروب باید در وضعیت J در روی قطعه تنظیم قرار گیرد (با هر زاویه‌ای). سپس دستگاه طوری واسنجی می‌شود که به‌ترتیب با قرار دادن نقطه شاخص در روی اعداد ۲۵ و ۲۳۰ در روی قطعه تنظیم، این اعداد در روی صفحه نشان داده شود.

۴ ـ واسنجی مقیاس قائم و حساسیت ـ تعیین تراز مرجع

مطابق شکل ۸ ـ ۴۶ پروب باید در وضعیت L قرار گیرد و به‌سمت شکاف ۰/۸میلی‌متری هدف‌گیری شود و آنقدر عقب و جلو شود تا حداکثر پژواک دریافت شود. سپس با کمک دکمه دسی‌بل، موج پژواک تبدیل به‌خط افقی می‌شود. حداکثر قرائت برحسب دسی‌بل تراز مرجع می‌باشد.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۷ انجام آزمون

پس از واسنجی سیستم فراصوتی، می‌توان آزمون قطعات را آغاز نمود. در هنگام انجام آزمون، دسترسی کامل به‌تمامی دکمه‌های تنظیم دستگاه وجود ندارد، زیرا تغییر بعضی از این تنظیم‌ها موجب از بین رفتن کالیبراسیون شده و ممکن است کالیبراسیون مجدد دستگاه را ایجاب نماید. آزمون‌های فراصوتی به‌یکی از دو روش تماسی و یا غوطه‌وری انجام می‌گیرند. در آزمون‌های تماسی، پروب مستقیماً بر روی قطعه قرار داده می‌شود. لایه بسیار نازکی از ماده واسط، برای تسهیل عبور موج از پروب به‌سطح قطعه، بین دو سطح اعمال می‌گردد. در بعضی موارد نیز گوه‌های پلاستیکی، صفحات سایش و یا پوسته‌های انعطاف‌پذیر[14]، بر روی پروب سوار می‌شوند. در آزمون‌های تماسی معمولاً پالس اولیه و بازتاب سطح رویی قطعه بسیار نزدیک به‌یکدیگر ظاهر می‌گردند.

در آزمون‌های غوطه‌وری، از یک پروب ضد آب استفاده می‌شود. این پروب در فاصله قابل توجهی از سطح قرار می‌گیرد و پرتو فراصوتی از میان ستونی از آب به‌طرف قطعه فرستاده می‌شود. با توجه به‌کم بودن سرعت امواج فراصوتی در آب، مسیر آب بر روی صفحه اسیلوسکوپ به‌صورت فاصله‌ای نسبتاً طولانی بین پالس اولیه و بازتاب سطح رویی ظاهر می‌گردد. نحوهٔ دقیق انجام آزمون در دستورالعمل انجام آزمون توضیح داده می‌شود.

---

14. Flexible Membranes

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۷ ـ ۱ آماده شدن برای انجام آزمون

آمادگی برای انجام آزمون فراصوتی با بررسی قطعه و تشخیص روش مناسب برای ارزیابی و سنجش آن آغاز می‌گردد. پس از این مرحله باید تجهیزات لازم برای انجام آزمون انتخاب گردد. انتخاب روش مناسب برای انجام آزمون بستگی به‌عوامل گوناگونی دارد. برای مثال، نمونه مورد آزمون ممکن است بسیار بزرگ باشد به‌نحوی که امکان قراردادن آن در مخزن وجود نداشته باشد. در مواردی که اندازه نمونه بسیار بزرگ است و یا اصولاً امکان جابه‌جا کردن آن وجود ندارد (مانند سازه‌های ساختمانی)، دستگاه فراصوتی به‌محلی که نمونه در آنجا قرار دارد برده می‌شود و آزمون به‌روش تماسی انجام می‌شود. در این‌گونه موارد از دستگاه‌های فراصوتی قابل حمل استفاده می‌شود. عوامل دیگری که در انجام آزمون باید مدنظر قرار گیرند عبارتند از: زبری سطح، شکل هندسی، جنس قطعه، نحوهٔ اتصال قطعات به‌یکدیگر (جوش، چسب، پرچ و غیره)، و تعداد قطعاتی که باید مورد آزمون قرار گیرند. هنگامی که نیاز به‌انجام آزمون بر روی تعداد زیادی از قطعات مشابه باشد و همچنین تهیه گزارش ثبت‌شده‌ای از آزمون‌ها مورد نیاز باشد، استفاده از روش غوطه‌وری که در آن روبش قطعه و ثبت نتایج به‌صورت خودکار انجام می‌شود مناسب خواهد بود. اگر تنها ارزیابی یک قطعه خاص مورد نظر باشد، استفاده از دستگاه‌های فراصوتی قابل حمل و انجام آزمون به‌روش تماسی مناسب‌تر است. به‌هر صورت برای هر موردی نیاز به‌مطالعه و بررسی برای یافتن بهترین و عملی‌ترین روش انجام آزمون و تهیهٔ دستورالعمل انجام آزمون می‌باشد.

برای انجام هر آزمونی لازم است فرکانس مورد نظر، پروب مناسب، و استاندارد مرجع مورد نیاز انتخاب گردد. قطعه مورد آزمون نیز باید برای شناسایی ناپیوستگی‌های احتمالی موجود در آن، به‌خوبی بازرسی شود. برای مثال، در قطعات آهنگری شده، ناپیوستگی تورق به‌موازات جهت پتک‌کاری ظاهر می‌شوند. ناپیوستگی‌های ناشی از تورق در ورق‌های فلزی معمولاً در سطح ورق بوده و در امتداد جهت نورد قرار می‌گیرند. در صورت امکان، باید قطعه تقلیدی ساخته شود و در آن عیوب واقعی در نقاط حساسی از قطعه ایجاد شوند تا با بررسی این عیوب بتوان آزمون واقعی را شبیه‌سازی کرد.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۷ ـ ۲ اقدامات قبل از انجام آزمایش فراصوتی

۱ ـ قبل از انجام آزمایش،اپراتور باید از هندسه درز، ضخامت مصالح، روش جوشکاری و انجام هرگونه تعمیر آگاه گردد.

۲ ـ اپراتور انجام آزمایش باید تحت آزمون قرار گرفته و توانایی انجام آزمایش و اجرای آیین‌نامه‌ها را داشته باشد.

۳ ـ اپراتور باید از شارژ بودن دستگاه و کالیبره بودن آن اطمینان حاصل نماید.

۴ ـ سطحی که قرار است پروب روی آن بلغزد باید عاری از هرگونه پاشش جوش، پوسیدگی،ناهمواری سطحی، رنگ و فلس‌های شل باشد و باید تماس خوبی با پروب برقرار نماید.

۵ ـ قبل‌از قرار دادن پروب روی سطح، باید روی سطح قطعه روغن واسطه (گیریس یا گلیسیرین و...) مالیده شود.

۶ ـ باید پروب مناسب مطابق جدول‌های استاندارد با توجه به‌ضخامت قطعه انتخاب گردد.

۷ ـ کالیبراسیون حساسیت و مقیاس افقی دستگاه با استفاده از بلوک‌های استاندارد نظیر بلوک V2 و V1 انجام شود.

۸ ـ تعیین تراز مرجع (Reference level)

۹ ـ تعیین ضریب کاهندگی (c)

۱۰ ـ تعیین ضخامت قطعه مورد آزمایش و تنظیم آن روی دستگاه

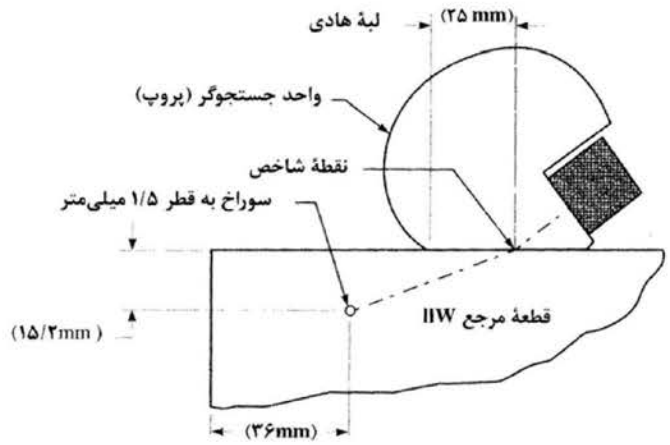
۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۷ ـ ۳ شرایط انجام آزمایش فراصوتی

مطابق استاندارد AWS D1-1، آزمایش جوش‌های شیاری و ناحیه تفتیده (HAZ) در ورق‌های با ضخامت ۸ تا ۲۰۰ میلی‌متر قابل استفاده می‌باشد. دستگاه فراصوت باید از نوع ضربانی (Pulse-echo) با مبدلی (transducer) با دامنه ارتعاشی ۱ تا ۶ مگاهرتز و صفحه نمایش از نوع روبشی "A" باشد.

دستگاه‌های آزمایشی باید دارای هشداردهنده‌هایی برای خالی بودن باتری باشند.

پایدارکننده‌های داخلی دستگاه باید تغییر ولتاژی در حدود ۱۵ درصد اسمی را با تغییراتی در حدود 1db±نمایش دهد. دستگاه باید دارای دکمه تنظیم دسی‌بل با گام ۱ یا ۲ دسی‌بل باشد.

مبدل دستگاه در حالت زاویه‌ای متشکل از دو واحد جداگانه و یا یک واحد یکپارچه با فرکانس بین ۲ تا ۲/۵ مگاهرتز می‌باشد. ابعاد پروب باید به‌گونه‌ای باشد که فاصله بین لبه هادی و نقطهٔ شاخص از ۲۵ میلی‌متر بیشتر نباشد (شکل ۸ ـ ۴۷).

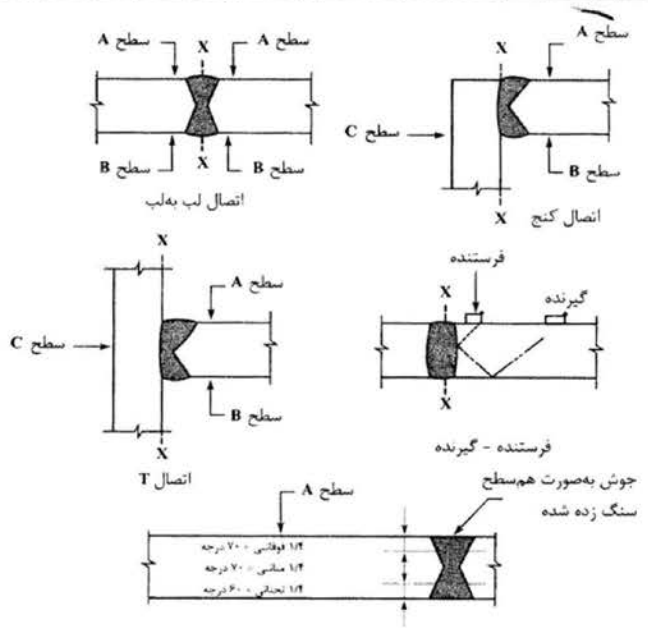


شکل ۸ ـ ۴۷

پس از انجام اقدامات اولیه قبل از آزمایش فراصوتی، اکنون لازم است با پروب مناسب انتخاب‌شده از روی جدول ۸ ـ ۱ اقدام به‌انجام آزمایش فراصوتی مطابق یکی از الگوهای روبش مناسب نشان داده شده در شکل ۸ ـ ۴۸ نماییم.

جدول ۸ ـ ۱ زاویه آزمایش

نوع جوش	ضخامت مصالح (میلی‌متر)								
	۸ تا ۳۸	> ۳۸ تا ۴۵	> ۴۵ تا ۶۵	> ۶۵ تا ۹۰	> ۹۰ تا ۱۱۵	> ۱۱۵ تا ۱۳۰	> ۱۳۰ تا ۱۶۵	> ۱۶۵ تا ۱۷۸	> ۱۷۸ تا ۲۰۰
	*	*	*	*	*	*	*	*	*
لب به لب	۱ O	۱ F	۱G F یا F ۴	۱G F یا F ۵	۶ F یا F ۷	۸ F یا F ۱۰	۹ F یا F ۱۱	۱۲ F یا F ۱۳	۱۲ F
T(سپری)	۱ O	۱ F یا F XF	F یا F ۴ XF	F یا F ۵ XF	F یا F ۷ XF	F یا F ۱۰ XF	F یا F ۱۱ XF	F یا F ۱۳ XF	- -
کنج	۱ O	۱ F یا یا XF	۱G F یا یا ۴ XF	۱G F یا یا ۵ XF	۶ F یا یا ۷ XF	۸ F یا یا ۱۰ XF	۹ F یا یا ۱۱ XF	۱۳ F یا یا ۱۴ XF	- -
گاز الکتریکی سرباره الکتریکی	۱ O	۱ O	۱G ۱** یا ۴	۱G P۱ یا یا ۳ P۳	۶ یا P۳ ۷	۱۱ یا P۳ ۱۵	۱۱ یا P۳ ۱۵	۱۱ یا P۳ ۱۵	۱۱ یا P۳ ۱۵**



تذکر: ۱ ـ در صورت امکان، تمام آزمون‌ها باید در سطح A و ساق ۱ انجام شود.

راهنما:

X= آزمون از سطح C.

G= سطح جوش هم‌سطح شده است.

O= لازم نیست.

سطح A = سطحی که اولین رویش از آن انجام می‌شود.

سطح B = سطح مقابل A.

سطح C= سطح مقابل جوش در اتصالات T و کنجی.

* = در صورتی لازم است که در صفحه نمایش محل ترک را در فصل مشترک فلزجوش و فلز پایه نشان دهد.

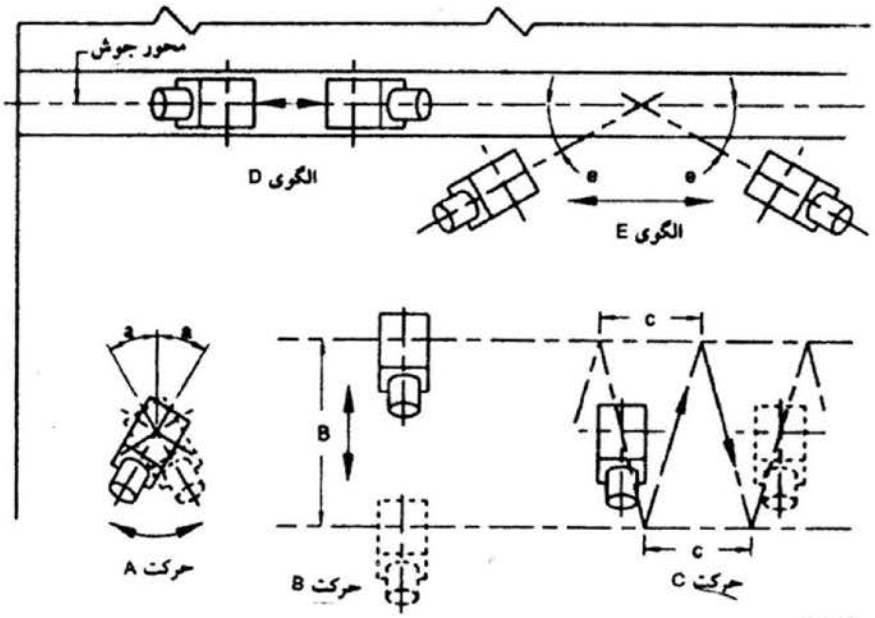
** = از تنظیم فاصلهٔ صفحه نمایش ۳۸۰ میلی‌متر یا ۵۱۰ میلی‌متر استفاده شود.

P= برای تعیین محل دقیق ترک باید از روش فرستنده - گیرنده استفاده شود.

F= فصل مشترک فلزجوش و فلزپایه باید به‌وسیلهٔ پروب ۴۵، ۶۰ و ۷۰ مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش کار — محدوده ضخامت			
شماره	۱/۴ فوقانی	نیمه میانی	۱/۴ تحتانی
۱	۷۰°	۷۰°	۷۰°
۲	۶۰°	۶۰°	۶۰°
۳	۴۵°	۴۵°	۴۵°
۴	۶۰°	۷۰°	۷۰°
۵	۴۵°	۷۰°	۷۰°
۶	۷۰°G A	۷۰°	۶۰°
۷	۶۰° B	۷۰°	۶۰°
۸	۷۰°G A	۶۰°	۶۰°

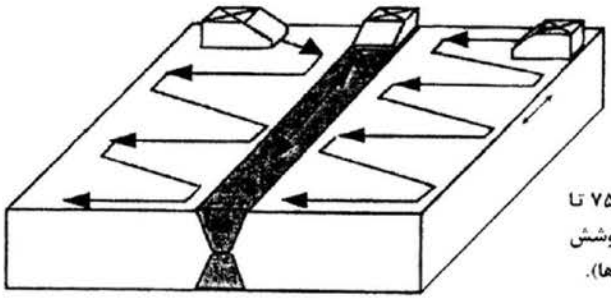
روش کار — محدوده ضخامت			
شماره	۱/۴ فوقانی	نیمه میانی	۱/۴ تحتانی
۹	۷۰°G A	۶۰°	۴۵°
۱۰	۶۰° B	۶۰°	۶۰°
۱۱	۴۵° B	۷۰°**	۴۵°
۱۲	۷۰°G A	۴۵°	۷۰°G B
۱۳	۴۵° B	۴۵°	۴۵°
۱۴	۷۰°G A	۴۵°	۴۵°
۱۵	۷۰°G A	۷۰° AB	۷۰°G B



توجه:

۱ ـ الگوی رویش همواره نسبت به‌محور جوش متقارن است به‌استثنای الگوی D که به‌طور مستقیم در روی محور جوش انجام می‌شود.

۲ ـ در صورت امکان، آزمایش باید از هر دو طرف محور جوش انجام شود.

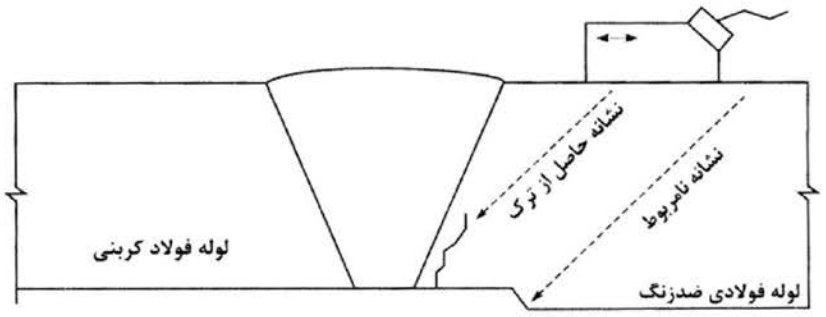


مسیر حرکت پروب جهت رویش جوش که در هر گام ۷۵ تا ۸۰ درصد عرض پرتوهای صوتی را پوشش می‌دهد (۲۰ درصد همپوشانی بین گام‌ها).

شکل ۸ ـ ۴۸ پلان الگوهای رویش.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۸ تفسیر نتایج

پس از انجام آزمون فراصوتی، نتایج به‌دست آمده باید مورد بررسی قرار گرفته و تفسیر شوند. به‌هنگام تفسیر نتایج، عوامل متعددی باید مدنظر قرار گیرند.



شکل ۸ ـ ۴۹ قطعه تقلیدی و نشانه‌های نامربوط دیده شده در آن.

در بعضی از موارد تفسیر نتایج حاصل از آزمون‌های فراصوتی به‌راحتی قابل انجام نیست. تفسیر صحیح نتایج تنها با در نظر گرفتن شرایط انجام آزمون و مرتبط ساختن نشانه‌های مشاهده‌شده با ناپیوستگی‌های احتمالی امکان‌پذیر است. تشدید صوتی، زبری سطح، گوشه‌های تیز، تغییر در خواص ماده و نیز زاویه تابش موج، همگی عواملی هستند که در هنگام ارزیابی اندازه و محل قرار گرفتن ناپیوستگی باید به‌آنها توجه نمود. چنین تغییراتی می‌توانند سیگنال‌ها یا نشانه‌های نامربوط (جعلی) در صفحهٔ نمایش به‌وجود آورند. ساده‌ترین روش برای تفسیر نتایج آزمون، مقایسه آنها با نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌های موجود در قطعات مرجع یا قطعات تقلیدی است. یک کاربر ماهر یاد می‌گیرد که نشانه‌های حاصل از عیوب واقعی را از نشانه‌های نامربوط بازشناسد (شکل ۸ ـ ۴۹).

ضوابط پذیرش عیوب در آزمایش فراصوتی

در صورت مشاهده علائم ناپیوستگی در صفحه نمایش، باید با تنظیم دکمهٔ دسی‌بل دستگاه، حداکثر علائم قابل حصول از ناپیوستگی تعیین گردد. مقدار تنظیم برحسب دسی‌بل، تراز تشخیص عیب (a) نامیده می‌شود و از آن برای محاسبه درجه عیب (d) استفاده می‌شود.

ضریب کاهندگی (c) نیز از تفریق ۲۵ میلی‌متر از طول مسیر صوت (S) (طول مستقیم پیموده شده صوت برای ردیابی عیب) و تقسیم نتیجهٔ آن بر ۲۵ و ضرب نتیجهٔ حاصل در ۲ به‌دست می‌آید. این ضریب باید به‌نزدیکترین مقدار دسی‌بل گرد گردد.

طول مسیر (S)	۳۷/۵	۵۰	۶۲/۵	۷۵	۸۷/۵	۱۰۰	۱۱۲/۵	۱۲۵
ضریب کاهندگی (C)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸

$$C = \frac{S-25}{25} \times 2 \qquad S = \frac{V.t}{2}$$

t: زمان (ms) V: شدت صوت (km/s)

پس از اندازه‌گیری مقادیر a، b و c، درجه عیب (d) از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$d= a - b - c$$

پس از تعیین درجه عیب، عدد به‌دست آمده را با ستون متناسب در جدول ۸ ـ ۲ مقایسه شده و رده عیب تعیین می‌شود. سپس از جدول ۸ ـ ۳ با توجه به‌رده عیب، طول مورد پذیرش برای بارهای استاتیکی تعیین می‌شود. محل و عمق ناپیوستگی‌ها باید در روی جوش علامت زده شوند.

جدول ۸ ـ ۲ ضوابط پذیرش بازرسی فراصوت در سازه‌های تحت بارهای استاتیکی

ردهٔ ناپیوستگی و حفرات*	ضخامت جوش بر حسب میلی‌متر و زاویهٔ پروب**				
	۸ تا ۲۰	۲۰ تا ۳۸	بزرگتر از ۳۸ تا ۶۴	بزرگتر از ۶۴ تا ۱۰۰	بزرگتر از ۱۰۰ تا ۲۰۰
	۷۰°	۷۰°	۴۵° ۶۰° ۷۰°	۴۵° ۶۰° ۷۰°	۴۵° ۶۰° ۷۰°
ردهٔ A	+۵ و کمتر	+۲ و کمتر	+۳ +۱ ـ ۲ و کمتر و کمتر	۰ ـ ۲ ـ ۵ و کمتر و کمتر	۱ ـ ۴ ـ ۷ و کمتر و کمتر
ردهٔ B	+۶	+۳	+۴ +۲ ـ ۱ +۵ +۳ ۰	+۱ ـ ۱ ـ ۴ +۲ ۰ ـ ۳	۰ ـ ۳ ـ ۶ +۱ ـ ۲ ـ ۵
ردهٔ C	+۷	+۴	+۶ +۴ +۱ +۷ +۵ +۲	+۳ +۱ تا ۲ ـ +۴ +۲ +۲	+۲ تا ۱ ـ تا ۴ ـ +۳ +۲ +۲
ردهٔ D	+۸ و بیشتر	+۵ و بیشتر	+۸ +۶ +۳ و بیشتر و بیشتر	+۵ +۳ +۳ و بیشتر و بیشتر	+۴ +۳ ـ و بیشتر و بیشتر

* برای دیدن ردهٔ ناپیوستگی به‌جدول ۸ ـ ۳ مراجعه شود.

** ضخامت جوش، ضخامت قطعهٔ نازک‌تر است.

۱ ـ ناپیوستگی‌های ردهٔ B و C باید به‌اندازهٔ 2L از یکدیگر فاصله داشته باشند. L طول بزرگترین ناپیوستگی است.

۲ ـ ناپیوستگی‌های ردهٔ B و C باید به‌اندازهٔ 2L از لبه فاصله داشته باشند. L طول ناپیوستگی است.

جدول ۸ ـ ۳ رده شدت ناپیوستگی و حفرات

A	ناپیوستگی‌های وسیع	هر عیبی در این رده مردود است (بدون توجه به‌طول)
B	ناپیوستگی‌های متوسط	هر عیبی در این رده با طول بزرگتر از ۲۰ میلی‌متر مردود است.
C	ناپیوستگی‌های کوچک	هر عیبی در این رده با طول بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر مردود است.
D	ناپیوستگی‌های ریز	هر عیبی در این رده بدون توجه به‌طول یا محل قابل پذیرش است.

تراز روبش

* مسیر تابش (میلی‌متر)	بالای تراز مرجع (db)
تا ۶۰	۱۴
۶۰ تا ۱۲۵	۱۹
۱۲۵ تا ۲۵۰	۲۹
۲۵۰ تا ۳۸۰	۳۹

* این ستون طول مسیر تابش است نه ضخامت قطعه

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۹ معرفی دستگاه‌های عیب‌یاب فراصوتی بازتابی (دیجیتال)

دستگاه‌های عیب‌یاب فراصوتی دارای مدارهای الکترونیکی مشابهی هستند. نمونه‌ای از این دستگاه‌ها در شکل ۸ ـ ۵۰ نشان داده شده است. سازندگان مختلف، نام‌های یکسانی را برای نامگذاری دکمه‌های کنترل دستگاه به‌کار نمی‌برند. دفترچهٔ راهنمای دستگاه شامل نحوه استفاده و نگهداری از دستگاه، مروری بر آزمون‌های فراصوتی و اصول حاکم بر آنها و سایر اطلاعات لازم می‌باشد. در صورت مغایرت اطلاعات داده شده در این کتاب با آنچه در دفترچهٔ راهنمای دستگاه آمده است، دفترچه راهنما باید ملاک قرار گیرد.

یک دستگاه فراصوتی شامل قسمت‌های اصلی زیر است:

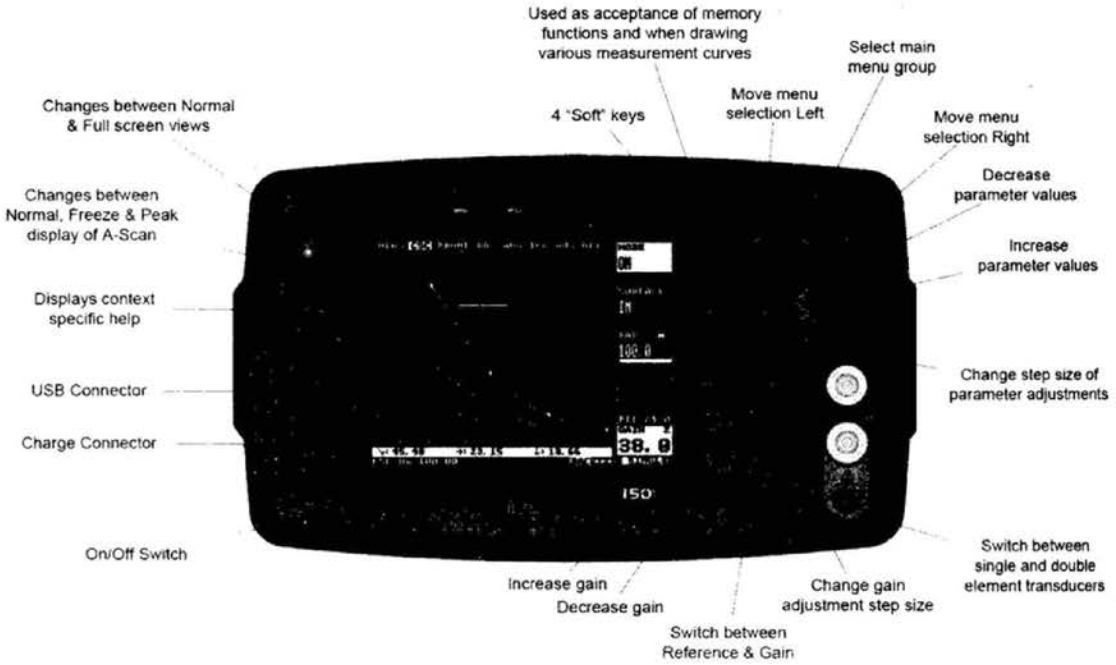
- **منبع تغذیه** : مدارهایی که جریان برق را برای قسمت‌های مختلف دستگاه تأمین می‌کنند، منبع تغذیه را تشکیل می‌دهند. جریان برق از طریق برق شهر و یا از طریق باطری نصب‌شده بر روی دستگاه تأمین می‌گردد.

- **پروب:** پروب شامل بلوره، بدنه و کابل رابط است. بلوره انرژی الکتریکی را به انرژی فراصوتی تبدیل نموده و سبب ایجاد موج در قطعه می‌گردد. علاوه‌بر این، پروب امواج بازتابیده از داخل قطعه را نیز دریافت نموده و آنها را به‌سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. این سیگنال‌ها پس از تقویت بر روی صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شوند.

- **پالس‌ساز/گیرنده:** پالس‌ساز یا مولد پالس، منبع تولید پالس‌های الکتریکی بسیار کوتاه ولی با انرژی زیاد است (فاصله زمانی ایجاد این پالس‌ها توسط زمان‌سنج کنترل می‌شود). پالس‌های الکتریکی از طریق کابل رابط به‌پروب فرستاده می‌شوند. پالس‌های برگشتی از قطعه نیز توسط پروب دریافت شده و به‌دستگاه فرستاده می‌شوند تا در آنجا پس از تقویت بر روی صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده شوند.

- **صفحه نمایش:** صفحه نمایش معمولاً یک لامپ کاتدی یا یک صفحه نمایش دیجیتالی است. این صفحه دارای یک مولد جاروب است و کنترل‌های لازم برای تنظیم چگونگی نمایش سیگنال‌های دریافتی بر روی آن تعبیه شده است.

- **زمان‌سنج:** تمامی سیگنال‌های زمانی توسط زمان‌سنج به‌پالس‌ساز ارسال می‌شوند و لذا به‌زمان‌سنج «مولد نرخ» و یا «سرعت» نیز گفته می‌شود.



شکل ۸ ـ ۵۰ نمونه‌ای از یک دستگاه فراصوتی دیجیتالی.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۹ ـ ۱ دکمه‌های کنترل

دکمه‌های کنترل متنوعی برای تنظیم قسمت‌های مختلف دستگاه از جمله منبع تغذیه، پالس‌ساز، زمان‌سنج و صفحه نمایش بر روی دستگاه تعبیه شده است. نامگذاری به‌کار برده شده در ذیل ممکن است در تمامی دستگاه‌های فراصوتی یکسان نباشد.

- **منبع تغذیه:** منبع تغذیه معمولاً توسط یک دکمه روشن/خاموش (ON/OFF) و یک فیوز کنترل می‌شود. پس از روشن کردن دستگاه در طول زمان گرم شدن آن، مدارهای برقی توسط اجزاء تأخیر زمانی[15] محافظت می‌شوند.

- **پالس‌ساز / گیرنده:** طول پالس انرژی فراصوتی که به‌داخل قطعه ارسال می‌شود توسط دکمه طول پالس (PULSE LENGTH) تنظیم می‌شود. هنگامی تنها از یک پروب برای انجام آزمون استفاده می‌شود، هر دو مدار ارسال و دریافت پالس به‌پروب وصل می‌شوند. در حالتی که دو پروب برای انجام آزمون مورد استفاده قرار گیرند (آزمون عبوری)، کابل‌ها به‌دو محل مختلف بر روی دستگاه وصل می‌شوند که یکی از این دو محل با حرف T (محل اتصال فرستنده) و دیگری با حرف R (محل اتصال گیرنده) مشخص می‌گردد. دکمه‌ای به‌نام MODE روی دستگاه وجود دارد که می‌توان آن را روی یکی از دو حالت THRU (عبوری) و یا PULSE-ECHO

15. *Time - Delay*

(بازتابی) قرار داد. تنظیمی با نام FREQUENCY نیز روی دستگاه وجود دارد که محدوده فرکانس را برحسب مگاهرتز تعیین می‌کند. با استفاده از این تنظیم می‌توان محدوده فرکانسی را برای انجام آزمون تنظیم کرد. دکمه GAIN حساسیت دستگاه را کنترل می‌کند و معمولا دارای دو تنظیم COARSE (درشت) و FINE (ریز) است. در صورتی که تنها یک دکمه برای کنترل حساسیت وجود داشته باشد، این دکمه SENSITIVITY نامیده می‌شود. برای حذف اغتشاشات کم دامنه و داشتن تصویری واضح، دکمه‌ای به‌نام REJECT روی دستگاه تعبیه شده است. این دکمه نشانه‌هایی را که دامنه آنها از حد معینی (که این حد قابل تنظیم است) کمتر باشد از روی صفحه نمایش حذف خواهد کرد. باید توجه داشت که در صورت استفاده از این ویژگی دستگاه، محدوده افقی صفحه نمایش دیگر خطی نخواهد بود و بدین لحاظ به‌هنگام استفاده از این تنظیم چراغ قرمز کوچکی جهت یادآوری این امر روشن شده و یا به‌نحو دیگری فعال بودن این ویژگی نمایش داده می‌شود.

- **صفحه نمایش:** دکمه‌های تنظیم صفحه نمایش و طرز کار آنها به‌شرح زیر است:

ـ VERTICAL (قائم): محل قرار گرفتن خط پایه را در امتداد محور قائم تنظیم می‌کند.

ـ HORIZONTAL (افقی): محل قرار گرفتن خط پایه را در امتداد محور افقی تنظیم می‌کند.

ـ INTENSITY (شدت): میزان روشنی خط پایه و نشانه را تنظیم می‌کند.

ـ FOCUS (تمرکز): میزان تمرکز پرتو الکترونی را تنظیم می‌کند (در لامپ کاتدی).

ـ ASTIGMATISM (آستیگماتیسم): عدم وضوح یا آستیگماتیسم ناشی از تغییر زمان جاروب‌شدن پرتوالکترونی در طول صفحه نمایش را تصیح می‌کند (در لامپ کاتدی).

ـ POWER (قدرت): دستگاه را روشن یا خاموش می‌کند.

ـ SCALE ILLUMINATION (روشنی درجه‌بندی): میزان روشنی درجه‌بندی صفحه نمایش را تنظیم می‌کند.

- **زمان‌سنج:** مدار زمان‌سنج معمولاً شامل قسمتی است که با آن نرخ تکرار پالس[16] تنظیم می‌شود. فرکانس تولید پالس‌هایی که به‌سایر مدارها فرستاده می‌شوند توسط این مدار کنترل می‌شود. نرخ تکرار پالس براساس جنس ماده و ضخامت آن تنظیم می‌شود. دکمه تأخیر (DELAY) نیز به‌منظور قراردادن پالس اولیه در منتهی‌الیه سمت چپ صفحه و قراردادن پژواک سطح پشتی (یا تعدادی از پژواک‌های سطح پشتی) در سمت راست صفحه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **سایر دکمه‌های کنترل:** دکمه‌های کنترل دیگری که روی بعضی از دستگاه‌ها وجود دارند عبارتند از:

ـ DAC یا STC : دکمه DAC (تصحیح فاصله ـ دامنه) یا TVG (کنترل حساسیت ـ زمان) روی بعضی از دستگاه‌ها با نام TCG (بهره تصحیح‌شده در زمان)[17] یا TVG (بهره تغییریافته در زمان)[18] نیز ظاهر می‌شود.

---

16. Pluse Repetition Rate

17. Time Corrected Gain

18. Time Corrected Gain

این دکمه به‌منظور جبران افت دامنه نشانه‌های حاصل از بازتابندهایی که در فواصل زیادی از سطح قرار دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از این دکمه، دامنه نشانه حاصل از یک ناپیوستگی معین، صرف‌نظر از طول مسیر صوتی طی‌شده، یکسان خواهد بود.

- **میرایی (DAMPING)**: با زیاد کردن میرایی، طول پالس الکتریکی کم می‌شود. در واقع با افزایش میرایی، طول دسته موجی[19] که به‌پروب فرستاده می‌شود کم می‌شود. افزایش میرایی، حساسیت سیستم را بهبود می‌بخشد.

- **انتخاب صفحه نمایش** (DISPLAY SELECTOR): با استفاده از دکمه انتخاب صفحه نمایش می‌توان یکی از دو حالت VIDEO یا RADIO FREQUENCY را انتخاب کرد. در حالت RF شکل کامل پالس بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌گردد در حالی که در حالت VIDEO شکل یکسوشده پالس بر روی صفحه، نمایش داده می‌شود. حالت VIDEO در دستگاه‌های فراصوتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **هشداردهنده پنجره‌ای** (GATED ALARM): دستگاه‌هایی که به‌هشداردهنده پنجره‌ای مجهز هستند، هنگام دریافت نشانه‌ای که دامنه آن بیش از میزان مجاز باشد، کاربر را با ارسال علائم هشداردهنده آگاه می‌سازند. پنجره[20] مورد نظر را می‌توان روی نشانه‌هایی که از منطقه خاصی از قطعه ارسال می‌شوند قرار داد. نشانه‌هایی که داخل این پنجره قرار می‌گیرند و دامنه آنها از حد معینی بیشتر است، موجب فعال شدن علائم هشداردهنده می‌شوند. علائم هشداردهنده می‌توانند صوتی (زنگ خطر) و یا تصویری (چشمک‌زدن یا روشن شدن چراغ) باشند. از علائم هشداردهنده به‌منظور کنترل سایر دستگاه‌ها از طریق سیستم کنترلی بازخورد[21] استفاده می‌شود. هشداردهنده پنجره‌ای معمولاً دارای سه دکمه کنترل به‌شرح زیر است:

- **شروع** (START) **یا تأخیر** (DELAY): با استفاده از این دکمه محل قرار گرفتن ابتدای مختصات صفحه نمایش تنظیم می‌گردد.

- **طول** (LENGTH) **یا عرض** (WIDTH): با استفاده از این دکمه، طول پنجره یا محل قرار گرفتن گوشه انتهایی آن تنظیم می‌شود.

- **سطح هشدار** (ALARM LEVEL) **یا آستانه** (THRESHOLD): دکمه سطح (LEVEL) یا آستانه (THRESHOD) ارتفاع پنجره را تنظیم می‌کند. به‌محض بیشتر شدن دامنه نشانه از ارتفاع پنجره (ارتفاع ممکن است + یا - باشد)، سیستم هشداردهنده فعال می‌گردد.

---

19. Wave Train

20. Gate

21. Feedback

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۹ ـ ۲ مراحل عیب‌یابی

۱ ـ یک مبدل (پروب مناسب)، ترجیحاً 2.3 MHZ انتخاب نمایید.

۲ ـ دستگاه را روشن کنید.

۳ ـ در منوی کالیبراسیون پارامترهای زیر را ثبت نمایید.

ـ عدد 0.000 در Zero

ـ شدت صوت در ماده مورد آزمایش را در VEL تنظیم نمایید.

ـ عدد 125 را در Range یا عدد مناسب دیگری که محدوده آزمایش را پوشش دهد.

ضخامت قطعه: t زاویه پروب: α Range= 1.2 (2t/cos α)

ـ عدد 0.000 در Delay.

ـ عدد 50.0 در Gain.

۴ ـ در منوی آمپلی‌فایر (AMP) پارامترهای زیر را تنظیم نمایید.

ـ منوی آشکارسازی (Detect) را روی کامل (Full) قرار دهید.

ـ منوی تنظیم ماکزیمم فرکانس تکراری (PRF) را روی 50HZ قرار دهید.

۵ ـ در منوی بازه ۱(Gate 1) پارامترهای زیر را تنظیم نمایید.

ـ منوی حالت (State) را روی حالت ON+VE قرار دهید، تا وقتی شدت اکوی عیب از خط آستانه بیشتر شد هشدار دهد.

ـ منوی شروع (Start) را روی 10.0 قرار دهید. این منو جهت تعیین موقتی شروع بازه (Gate) نسبت به‌پالس اولیه استفاده می‌شود.

ـ منوی عرض بازه (Width) را روی عدد 50.0 یا عدد مناسبی که محدودهٔ آزمایش را پوشش دهد قرار دهید.

ـ منوی سطح بازه (Level) را روی عدد 50.0 تنظیم نمایید. این منو سطح خط آستانه را تعیین می‌نماید.

۶ ـ در منوی تنظیم اندازه‌گیری (MEAS) پارامترهای زیر را تنظیم نمایید.

ـ منوی حالت اندازه‌گیری (mode) را روی حالت (Depth) عمق تنظیم نمایید. در این حالت بازه ۱(Gate1) به‌عنوان عمق یا ضخامت قطعه عمل می‌نماید.

ـ منوی Trigger را روی حالت Flank قرار دهید.

ـ منوی Hud را روی حالت خاموش قرار دهید.

ـ منوی T-min را روی حالت خاموش قرار دهید.

دستگاه UT اکنون آماده عیب‌یابی اولیه می‌باشد.

با استفاده از یک بلوک کالیبراسیون مناسب، پارامتر Gain را جهت حساسیت صحیح تعیین نمایید. سایر پارامترها را نیز جهت بهینه‌سازی کالیبراسیون انجام دهید.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۹ ـ ۳ انجام آزمون فراصوتی با استفاده از منوی AWS

منوی AWS جهت بازرسی ناپیوستگی‌هایی که براساس استاندارد AWS D1-1 ارزیابی می‌شوند، استفاده می‌شود. استفاده از این منو، روش مناسب جهت محاسبه اتوماتیک a (IR) که در استاندارد تعریف شده است، می‌باشد. منوی AWS می‌تواند به‌صورت ترکیبی با حالت مثلثاتی (Trigonometry) استفاده شود که به‌طور همزمان فاصله مسیر مستقیم (beam path)، فاصله افقی و فاصله عمودی را در پایین صفحه نمایش نشان دهد. منوی AWS با منوی DAC روشن عمل نخواهد کرد.

جهت تنظیم کردن اندازه‌گیری‌های منوی AWS، مراحل زیر باید انجام شود:

۱ ـ دستگاه را برای آزمایش جوش و تنظیم با حالت مثلثات (Trigonometry) با پیروی کردن از مراحل کاری مربوطه کالیبره می‌کنیم.

۲ ـ در منوی MEAS، AWS را انتخاب کرده و منوی MODE را روی حالت SET قرار می‌دهیم.

۳ ـ خط مرجع را در منوی REF روی مرجع مطلوب (معمولاً 80%) تنظیم می‌کنیم.

۴ ـ پروب را روی بلوک آزمایش قرار داده و بلندترین سیگنال را می‌گیریم.

۵ ـ CURSOR روی صفحه نمایش را روی حالت Adjust قرار می‌دهیم.

۶ ـ وقتی که سیگنال به‌حالت بیشینه رسید کلید OK را فشار می‌دهیم.

دستگاه فراصوتی اکنون جهت تعیین اندازه‌گیری IR مطابق AWS D1-1 کالیبره شده است.

۸ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۱۰ نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌ها*

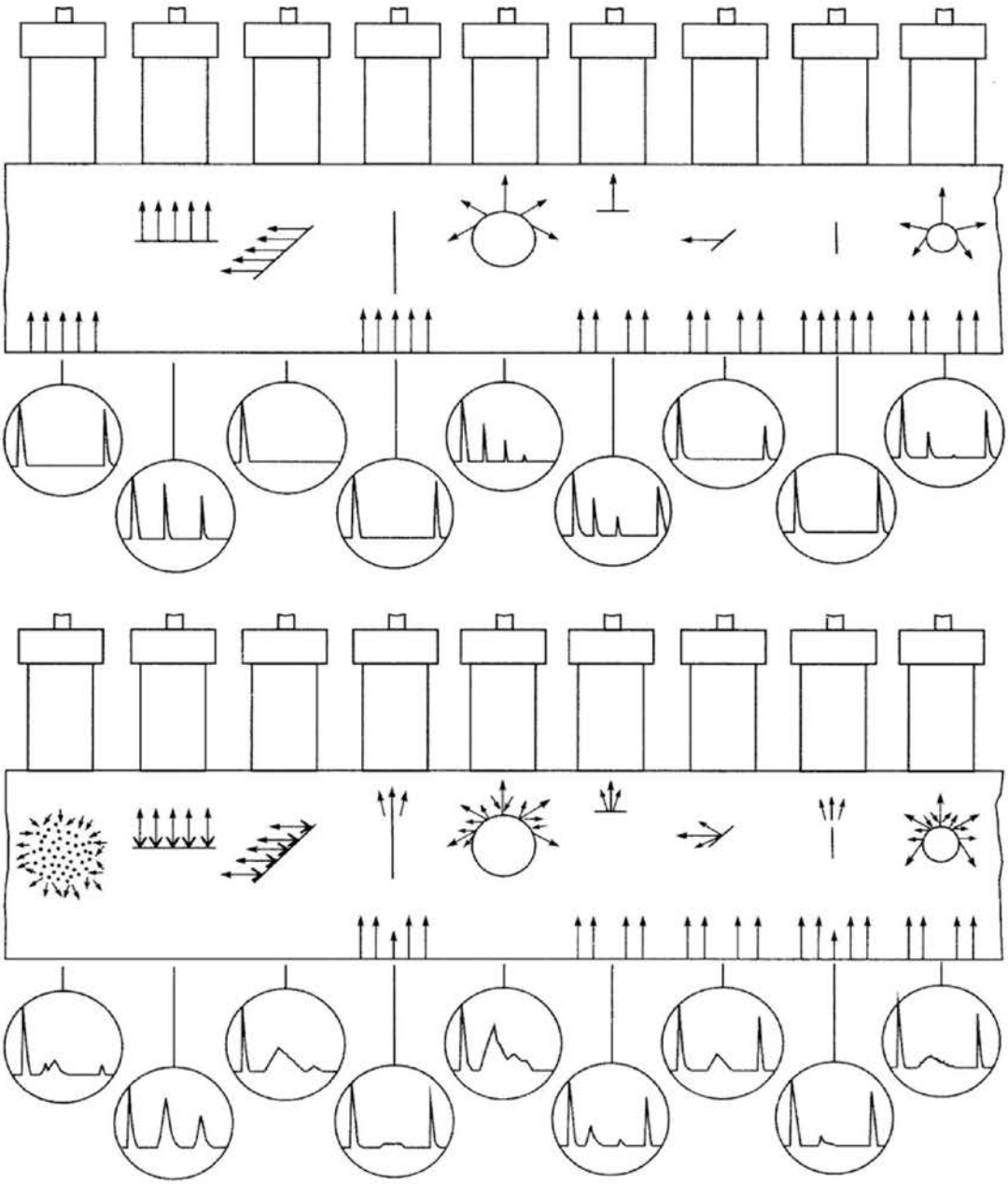
نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌های جوش

نشانه‌های به‌دست آمده از آزمون‌های فراصوتی تماسی معمولاً به‌علت وجود ناپیوستگی‌هایی چون ناخالصی‌های فلزی، ترک، درزه[22]، پکیدگی و پوسته شدن[23] حاصل از نورد می‌باشد که در شکل‌های ۸ ـ ۵۱ و ۸ ـ ۵۲ به‌صورت شماتیک نشان داده شده‌اند.

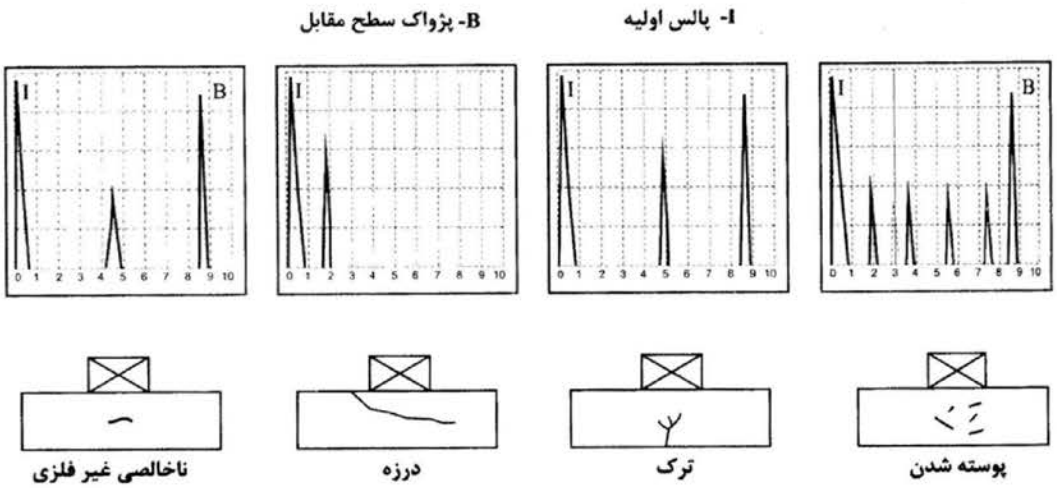
* به‌نقل از کتاب «آزمون فراصوتی» نوشتهٔ دکتر فرهنگ هنرور، انتشارات نوپردازان، تابستان ۱۳۸۴

22. *Seam*

23. *Flaking*

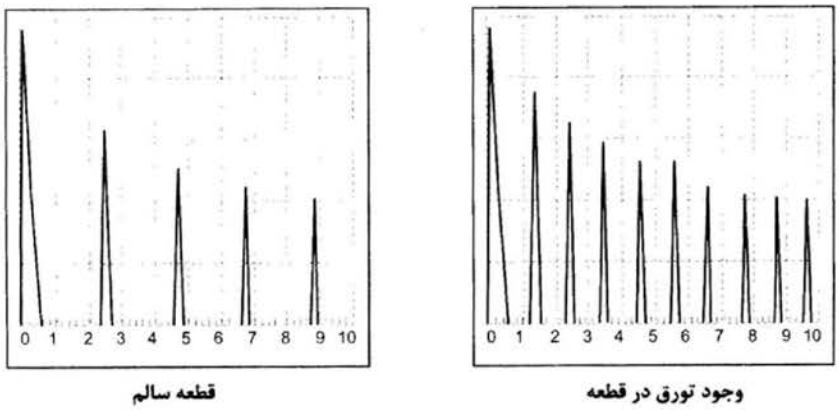


شکل ۸ ـ ۵۱ شکل عمومی بازتاب‌ها و نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌ها (قابل استناد نیست).



شکل ۸ ـ ۵۲ نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی‌هایی که به‌طور معمول در آزمون‌های تماسی مشاهده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۸ ـ ۵۳ دیده می‌شود، وجود تورق در ورق‌های نوردشده موجب کاهش فاصله پژواک‌های متوالی حاصل از سطح مقابل قطعه می‌گردد. در سمت چپ شکل ۸ ـ ۵۳ پژواک حاصل از سطح مقابل برای یک ورق بدون عیب و در سمت راست آن پژواک‌های حاصل از قسمتی که تورق در آن روی داده است نشان داده شده‌اند.

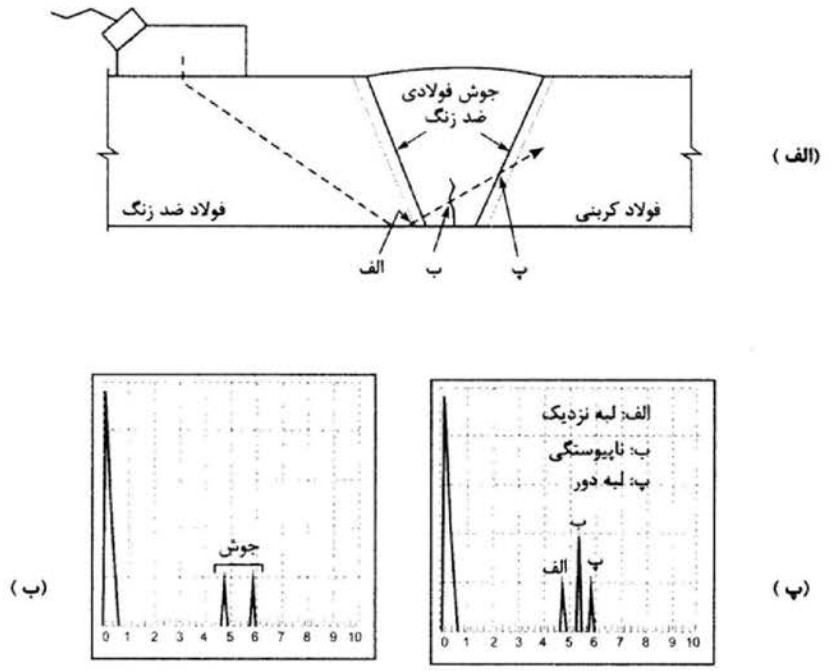


شکل ۸ ـ ۵۳ تأثیر تورق بر روی بازتاب‌های سطح پشتی.

در آزمون اتصالات جوش با پرتو زاویه‌ای، ندیدن هیچ‌گونه نشانه‌ای بر روی صفحه نمایش، دلالت بر عدم وجود ناپیوستگی در جوش دارد. به‌محض قرار گرفتن یک ناپیوستگی در مسیر پرتوها، نشانه‌ای بر روی صفحه نمایش ظاهر خواهد شد. البته واضح است که همه نشانه‌های مشاهده‌شده لزوماً ناشی از وجود ناپیوستگی در جوش نمی‌باشند و در بعضی از موارد این نشانه‌ها ممکن است کاملا نامربوط باشند. نشانه‌های غیرواقعی از این نوع ممکن است به‌علل

متالوژیکی به‌وجود آیند که در این حال این نشانه‌ها از منطقه‌ای که مذاب به‌قطعه وصل شده است ارسال می‌شوند (شکل ۸ ـ ۵۴ ـ ب).

در شکل ۸ ـ ۵۴ ـ پ بازتاب‌های حاصل از منطقه متأثر از حرارت[۲۴] (ناحیهٔ تفتیده) در ناحیه تماس مذاب و قطعه، هنگامی به‌وجود می‌آید که مواد غیرمشابهی که ترکیبات آلیاژی متفاوتی دارند به‌یکدیگر جوش داده شده باشند (مثلا فولاد کربنی به‌فولاد ضدزنگ). اتصال جوشی به‌خودی خود یک ماده ریخته‌گری است که در قالبی که توسط پخ‌های ایجادشده در قطعات به‌وجود آمده ریخته شده است و موجب بازتاب امواج فراصوتی و ایجاد نشانه‌هایی بر روی صفحه نمایش می‌گردد. مناطق متأثر از حرارت (HAZ) ممکن است یا هیچ نشانه‌ای ایجاد نکنند و یا نشانه‌های قابل توجهی پدید آورند که هر دو آنها، به‌نوع قطعات جوشکاری شده و نوع الکترود بستگی دارد.

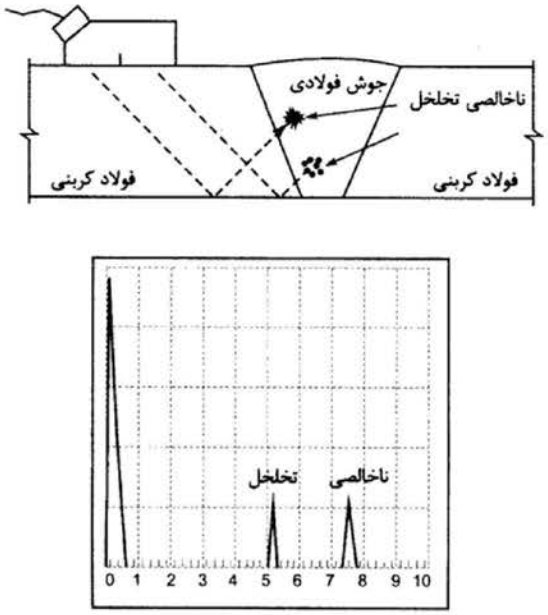


شکل ۸ ـ ۵۴ نشانه‌های مشاهده‌شده در یک اتصال جوشی.

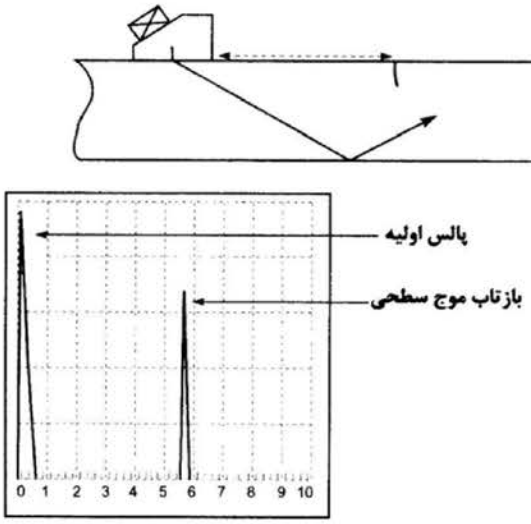
معمولاً در اتصالات جوشی، ناپیوستگی‌هایی نظیر مک و یا ناخالصی وجود دارد. نشانه‌های حاصل از این‌گونه ناپیوستگی‌ها در شکل ۸ ـ ۵۵ نشان داده شده است.

در بعضی موارد، به‌هنگام انجام آزمایش توسط یک پروپ زاویه‌ای، تشخیص ترک‌های سطحی در قطعه نیز امکان‌پذیر خواهد بود. در شکل ۸ ـ ۵۶، نشانه حاصل از یک ترک سطحی در قطعه‌ای که توسط یک پروب زاویه‌ای بازرسی می‌شود نشان داده شده است.

24. *Heat affected zone (HAZ)*



شکل ۸ ـ ۵۵ نشانه‌های حاصل از مک و یا ناخالصی در اتصال جوشی.



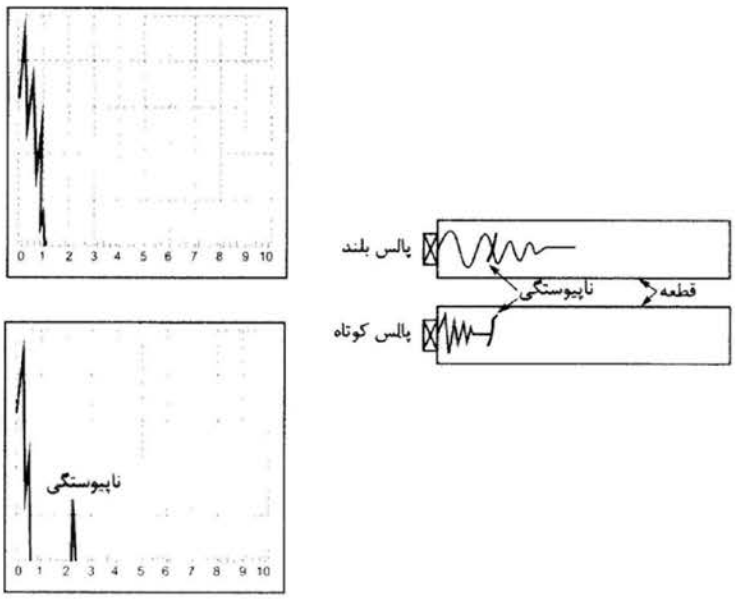
شکل ۸ ـ ۵۶ استفاده از پروب زاویه‌ای و تشخیص ترک سطحی در قطعه.

نشانه‌هایی که در منطقه مرده قرار می‌گیرند

منطقه مرده که در نزدیکی سطح رویی قطعه قرار دارد، منطقه‌ای است که در آن هیچ‌گونه سیگنال قابل‌قبولی نمی‌توان به‌دست آورد، زیرا تمامی سیگنال‌هایی که از این منطقه به‌پروپ باز می‌گردند توسط پالس اولیه پوشانده شده‌اند. در بسیاری از آزمون‌های تماسی، نشانه حاصل از سطح رویی قطعه توسط پالس اولیه پوشانده می‌شود[۲۵]. به‌همین لحاظ

۲۵ ـ چنین مشکلی در آزمون‌های غوطه‌وری وجود ندارد زیرا در آزمون‌های غوطه‌وری پالس اولیه و نشانه حاصل از سطح رویی قطعه توسط فاصله مسیر آب از یکدیگر جدا می‌شوند.

در آزمون‌های تماسی که به‌روش پرتو مستقیم انجام می‌گیرند معمولاً مشاهده و تشخیص ناپیوستگی‌هایی که در نزدیکی سطح قرار دارند امکان‌پذیر نیست. کوتاه کردن پالس باعث کاهش طول منطقه مرده می‌گردد و شانس بیشتری را برای تشخیص ناپیوستگی‌های نزدیک به‌سطح فراهم می‌سازد. در شکل ۸ ـ ۵۷ دو پالس کوتاه و بلند که برای تشخیص ناپیوستگی‌ای در نزدیکی سطح مورد استفاده قرار گرفته‌اند نشان داده شده است. با استفاده از یک خط تأخیری که معمولاً یک استوانه پلاستیکی است، و یا با استفاده از پروپ‌های دوقلو، می‌توان قابلیت تفکیک سیگنال‌ها در نزدیکی سطح را بهبود بخشید.



شکل ۸ ـ ۵۷ مقایسه پالس‌های کوتاه و بلند.

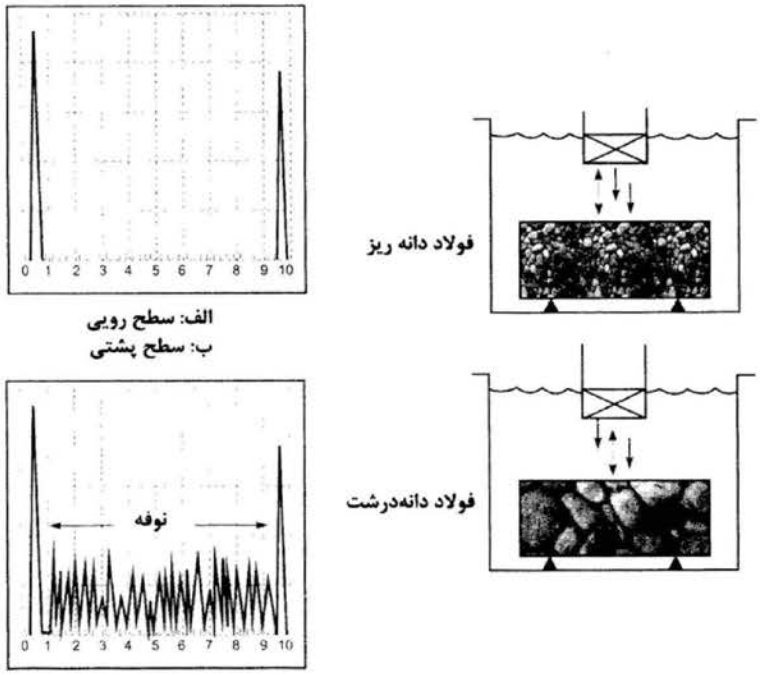
نشانه‌های ناشی از اندازه دانه‌بندی

همان‌گونه که در شکل ۸ ـ ۵۸ نشان داده شده است، درشت بودن دانه‌بندی قطعه نیز ممکن است موجب ایجاد سیگنال‌های اضافی[۲۶] بر روی صفحه نمایش گردد. اگر دانه‌بندی قطعه ریز باشد، سیگنال‌های مزاحم بر روی صفحه نمایش ظاهر نخواهند شد. در بعضی موارد که اندازه دانه‌ها به‌طور غیرطبیعی بزرگ است، پژواک سطح مقابل کاملاً از روی صفحه نمایش محو می‌گردد. چنین وضعیتی معمولاً زمانی روی می‌دهد که انجام عملیات آهنگری بر روی قطعه، در دمای مناسبی به‌کار نرفته باشد و یا در هنگام انجام عملیات کارگرم و یا تابکاری[۲۷] از دمای بالایی استفاده شده باشد. اغلب چنین ساختاری که دانه‌هایی با اندازه‌های مختلف در آن وجود دارد در فولادهای ضدزنگ آستنیتی[۲۸] دیده می‌شود و موجب کاهش قابل توجهی در نسبت سیگنال به نوفه[۲۹] می‌گردد.

---

۲۶ ـ به‌این‌گونه سیگنال‌های مزاحم که به‌صورت پیوسته در طول خط پایه بر روی صفحه نمایش دیده می‌شوند Hash یا Grass گفته می‌شود.

27. Annealing
28. Austentic stainless steel
29. Signal - to - Noise Ratio



شکل ۸ ـ ۵۸ تأثیر اندازه دانه‌بندی بر روی نشانه‌های فراصوتی.

نشانه‌های نامربوط[۳۰]

تمامی نشانه‌هایی که دامنه و شکل آنها با حرکت دادن پروپ در طول قطعه تغییر نمی‌کند، مظنون به‌قرار گرفتن در دستهٔ سیگنال‌های نامرتبط هستند. بازتاب‌های حاصل از گوشه‌های گرد قطعه و سطوح مقعر آن ممکن است نشانه‌هایی را بر روی صفحه نمایش در فاصله بین نشانه‌های حاصل از سطوح رویی و مقابل ایجاد نمایند. در بعضی مواقع این‌گونه نشانه‌ها به‌عنوان نشانه‌های حاصل از ناپیوستگی تلقی می‌شوند.

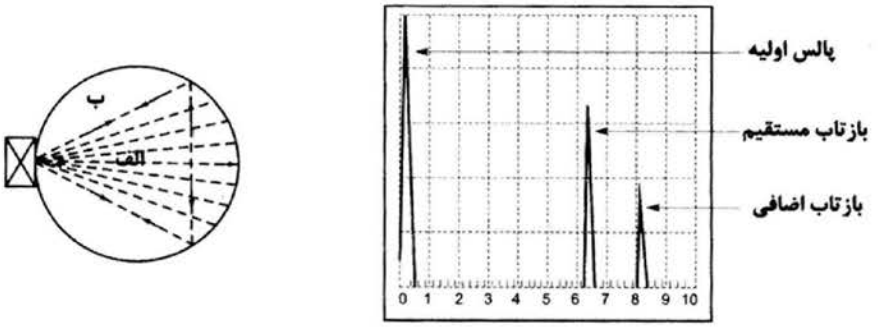
در بعضی مواقع در نزدیکی لبه قطعاتی که سطح مقطع آنها مستطیل شکل است، بازتاب‌هایی از لبه‌ها مشاهده می‌شود بدون اینکه افتی در بازتاب سطح پشتی دیده شود. این‌گونه نشانه‌ها معمولاً هنگامی ظاهر می‌شوند که پروپ در فاصله ۱۳ میلی‌متر از لبه قطعه قرار داشته باشد. قطعاتی که دارای سطوح صاف و براق هستند نیز در بعضی موارد نشانه‌های گمراه‌کننده‌ای ایجاد می‌کنند.

اگر برای بازرسی قطعه‌ای با دانه‌بندی درشت از فرکانس‌های بالا استفاده شود، احتمال ظاهر شدن سیگنال‌های اضافی بر روی صفحه نمایش وجود دارد.

برای کاستن یا از بین بردن این سیگنال‌های مزاحم، می‌بایست فرکانس کاهش داده شود و یا در صورت امکان از پروپ‌های زاویه‌ای که مسیر صوتی کوتاهتری دارند استفاده گردد.

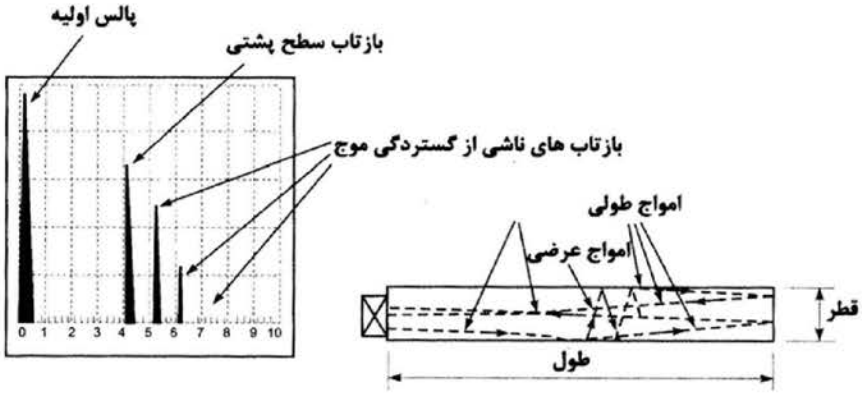
هنگامی که قطعات استوانه‌ای بازرسی می‌شوند (خصوصاً وقتی سطح پروپ انحنای لازم را برای جفت شدن به‌قطعه ندارد) سیگنال‌های اضافی بر روی صفحه نمایش ظاهر خواهند شد. همان‌طور که در شکل ۸ ـ ۵۹ نشان داده شده است، این سیگنال‌ها بعد از نشانه سطح پشتی ظاهر می‌شوند.

30. Non-Relevant Indications



شکل ۸ ـ ۵۹ سیگنال‌های نامربوط به‌دست‌آمده از یک نمونه استوانه‌ای‌شکل.

به هنگام بازرسی قطعات طویل، در اثر برخورد پرتوها با دیواره‌های جانبی قطعه، تغییر حالت در موج حاصل می‌شود. در این حالت، موج طولی به‌موج عرضی تبدیل شده و پس از بازتاب‌های متوالی از دیواره قطعه، سرانجام به‌پروپ باز می‌گردد (شکل ۸ ـ ۶۰).



شکل ۸ ـ ۶۰ نشانه‌های مزاحم در یک قطعه طویل.

با زیاد کردن قطر پروپ (و در نتیجه کاستن گستردگی پرتو) می‌توان این مشکل را تا حدی کم نمود. در مورد قطعات طویل، به‌علت آنکه سرعت امواج عرضی کمتر از سرعت امواج طولی در قطعه است و نیز به‌لحاظ طولانی بودن مسیر امواجی که از سطح جانبی قطعه بازتابیده شده‌اند، تمامی نشانه‌های مزاحم بعد از اولین نشانه حاصل از سطح پشتی مزبور همچنان بر روی صفحه نمایش باقی خواهند ماند. در اثر مرور زمان و استفاده زیاد از پروپ، بلوره پیزوالکتریک آن ممکن است آسیب ببیند. در چنین حالتی ممکن است طول پالس اولیه بیشتر از میزان عادی آن نگردد. از آنجا که طولانی شدن طول پالس اولیه موجب کاهش توانایی سیستم در تشخیص ناپیوستگی‌ها می‌گردد، چنین پروپی باید تعمیر شده و یا کنار گذاشته شود.

محو پژواک سطح مقابل

ناپیوستگی‌هایی که اندازه آنها در مقایسه با سطح مقطع دسته پرتو بزرگ باشد، تقریباً تمام انرژی فراصوتی را باز می‌تابانند و در نتیجه نشانه حاصل از سطح پشتی قطعه از روی صفحه نمایش محو می‌گردد. ابعاد این‌گونه ناپیوستگی‌ها با حرکت دادن پروپ بر روی سطح قطعه و مشاهده نقاطی که در آنها نشانه حاصل از ناپیوستگی همچنان بر روی صفحه نمایش دیده می‌شود، قابل اندازه‌گیری است. ارزیابی دقیق‌تر ابعاد ناپیوستگی و تفکیک ناپیوستگی‌های مجاور، با آزمودن قطعه از سطوح مختلف آن قابل انجام است.

در صورتی که علیرغم عدم وجود ناپیوستگی قابل ملاحظه‌ای در درون قطعه، دامنه پژواک سطح مقابل به‌صورت قابل توجهی کاهش یابد، علت وقوع این پدیده باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت، کاهش دامنه و یا محو کامل سیگنال حاصل از سطح مقابل ممکن است به‌یکی از علل زیر باشد:

۱ ـ درشتی دانه‌بندی

۲ ـ وجود مک و تخلخل

۳ ـ وجود ناخالصی‌های ریز در قطعه

۸ ـ ۴ ـ ۴ آزمون پرتونگاری[۳۱] (RT)

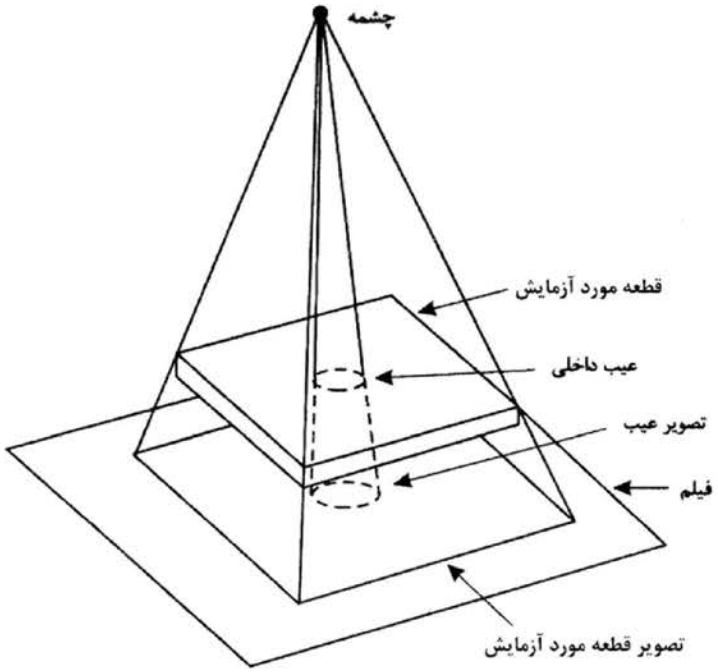
پرتونگاری یکی از روش‌های آزمایش غیرمخرب می‌باشد که نوع و محل عیوب داخلی و بسیار ریز (میکروسکوپی) جوش را نشان می‌دهد. در این روش دو نوع پرتو X یا گاما مورد استفاده قرار می‌گیرد. اشعه گاما به‌خاطر طول موج کوتاه خود می‌تواند در ضخامت‌های نسبتاً زیادی از مواد نفوذ کند، در ضمن زمان تابش[۳۲] اشعه به‌قطعه مورد پرتونگاری در مورد اشعه گاما نسبت به‌اشعه X بسیار طولانی‌تر می‌باشد. فیلم‌های به‌دست آمده از پرتونگاری با اشعه X به‌نام ایکس‌نگار و فیلم‌های به‌دست آمده از کاربرد اشعه گاما، به‌نام گامانگار خوانده می‌شوند. این دو نوع فیلم در حالت کلی به‌نام پرتونگار خوانده می‌شوند.

در آزمایش پرتونگاری یک عکس از وضعیت داخلی فلز جوش گرفته می‌شود. در حین عکس‌برداری، فیلم در یک طرف و منبع پرتوزا (X یا گاما) در سمت دیگر قطعه قرار می‌گیرد.

پرتو رادیویی در ضخامت فلز نفوذ کرده و پس از عبور از این ضخامت لکه‌ای بر روی صفحه فیلم ایجاد می‌کند. میزان جذب پرتوهای رادیویی توسط مواد مختلف متفاوت است. حبس سرباره، حفره گازی، ترک‌ها، بریدگی‌های کناره جوش و قسمت‌های نفوذ ناقص جوش، تراکم کمتری نسبت به‌فولاد سالم دارند. بنابراین در حوالی این قسمت‌ها پرتو بیشتری به‌سطح فیلم می‌رسد و عیوب فلز جوش، به‌صورت لکه‌های تاریکی بر روی فیلم ثبت می‌شوند. این شیوه پرتونگاری حضور معایب مختلف در فلز جوش و فلز پایه را مسجل کرده و اندازه، شکل و محل آنها را ثبت می‌کند (شکل‌های ۸ ـ ۶۱ و ۸ ـ ۶۲).

---

31. Radiographic Inspection



شکل ۸ ـ ۶۱ طرح شماتیک آزمایش پرتونگاری.

۸ ـ ۴ ـ ۴ ـ ۱ ضوابط پذیرش بازرسی‌های پرتونگاری

در عکس‌های پرتونگاری، جوش نباید حاوی ترک باشد. شرایط پذیرش سایر ناپیوستگی‌ها (حفرات) بستگی به‌هندسه حفره دارد که آیا سوزنی است یا گرد. حفره سوزنی آن است که نسبت طول به‌عرضش بزرگتر از ۳ باشد. در حفره گرد، نسبت طول به‌عرض مساوی و یا کوچکتر از ۳ می‌باشد و از لحاظ شکل می‌تواند به‌صورت گرد یا نامنظم دم‌دار باشد.

در صورتی که ابعاد حفرات آشکار شده در عکس‌های پرتونگاری بزرگتر از محدودیت‌های زیر باشد، غیرقابل پذیرش خواهند بود (E = اندازه جوش).

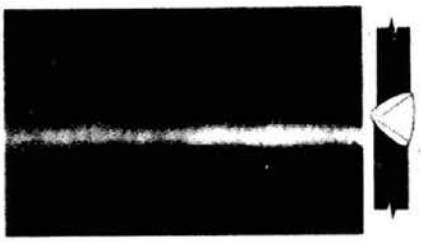
(۱) حفره سوزنی که اندازه آن بزرگتر از اندازه نشان داده شده در شکل ۸ ـ ۶۳ باشد.

(۲) حفراتی که فاصله آنها کوچکتر از حداقل فاصله نشان داده شده در شکل ۸ ـ ۶۳ باشد.

(۳) حفرات گرد با اندازه بزرگتر از E/3 یا ۶ میلی‌متر. در صورتی که ضخامت قطعه بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر باشد، محدودیت ۶ میلی‌متر می‌تواند به ۱۰ میلی‌متر افزایش یابد. حداقل فاصله آزاد این نوع حفره با بعد بزرگتر از ۲ میلی‌متر، تا یک حفره سوزنی و یا گرد قابل پذیرش و یا تا لبه جوش تقاطعی، سه برابر بزرگترین بُعد حفره مورد نظر است.

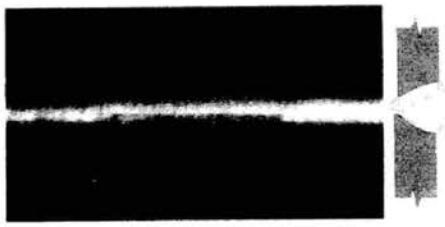
---

32. Exposure time



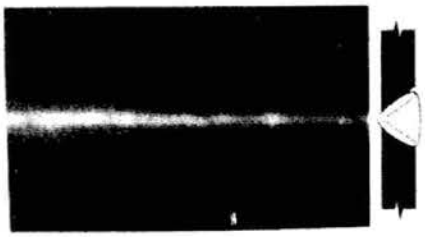
نام عیب: عدم همترازی خطی (Linear Misalignment)

فرآیند جوشکاری: SMAW



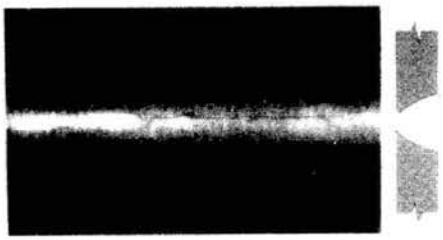
نام عیب: عدم همترازی به‌همراه ذوب ناقص ریشه (Misalignment With Lack of Root Fusion)

فرآیند جوشکاری: SMAW



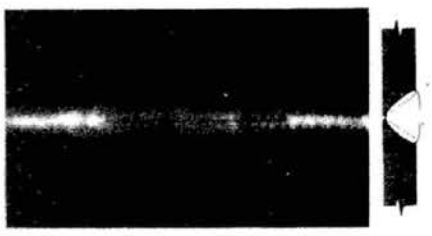
نام عیب: سوختگی کنار جوش در سطح ((External Undercut)

فرآیند جوشکاری: SMAW



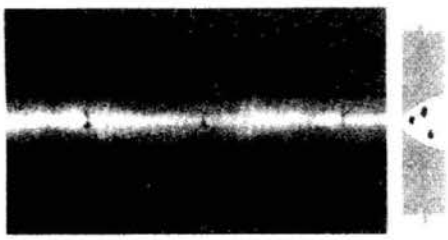
نام عیب: سوختگی کنار جوش در ریشه (Internal Undercut)

فرآیند جوشکاری: SMAW



نام عیب: نفوذ ناقص (Lack of Penetration)

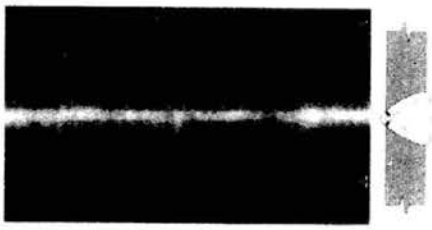
فرآیند جوشکاری: SMAW



نام عیب: نفوذ ناقص در اثر Stop-Start ضعیف در پاس ریشه (Penetration Faults Due to Poor Restart)

فرآیند جوشکاری: SMAW

شکل ۸ ـ ۶۲ تصاویر آزمایش پرتونگاری.



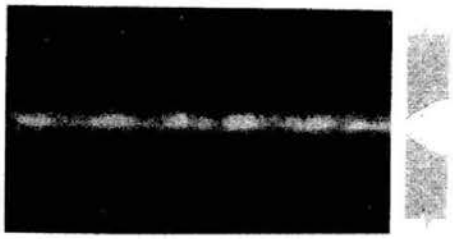
نام عیب: حفرات گازی پراکنده (Scattered Porosity)

فرآیند جوشکاری: SMAW

نام عیب: عدم ذوب دیواره

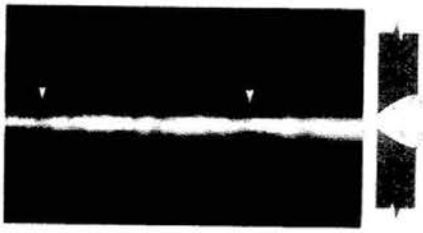
(Lack of Side wall Fusion)

فرآیند جوشکاری: GMAW



نام عیب: عدم ذوب بین پاسی (Lack of Interrun Fusion)

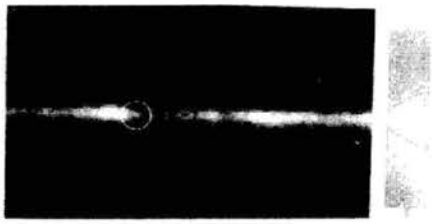
فرآیند جوشکاری: GMAW



نام عیب: سرباره حبس شده خطی

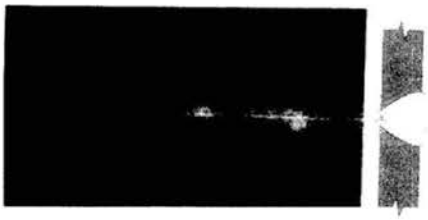
(Elongated Slag Inclusion)

فرآیند جوشکاری: SMAW



نام عیب: حفرات گازی خوشه‌ای ((Cluster Porosity)

فرآیند جوشکاری: SMAW



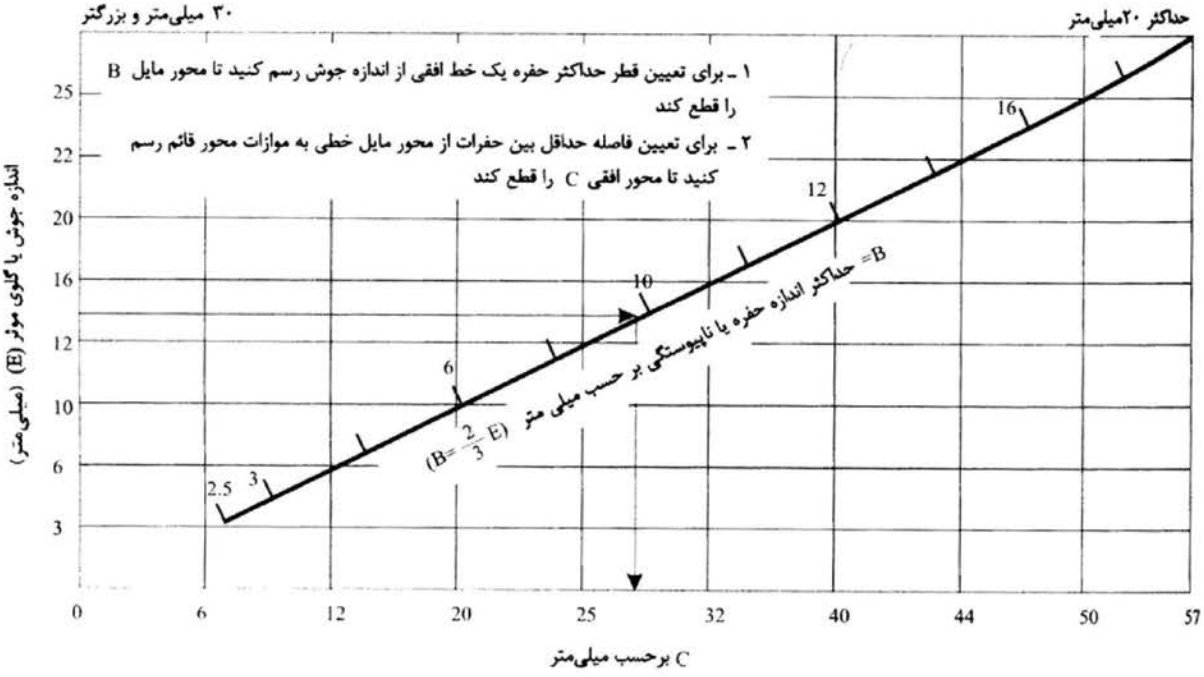
نام عیب: حفرات گازی خطی شده در پاس ریشه

(Root Pass Aligned Porosity)

فرآیند جوشکاری: GMAW

شکل ۸ ـ ۶۲ تصاویر آزمایش پرتونگاری (ادامه).

(۴) خوشه حفرات گرد که مجموع بزرگترین بُعد آنها، بزرگتر از اندازه مجاز حفره تک طبق شکل ۸ ـ ۶۳ است. فاصله حداقل هر خوشه تا خوشه یا حفره تک بعدی یا انتها و یا لبه جوش متقاطع، مساوی مقدار C در شکل ۸ ـ ۶۳ می‌باشد.

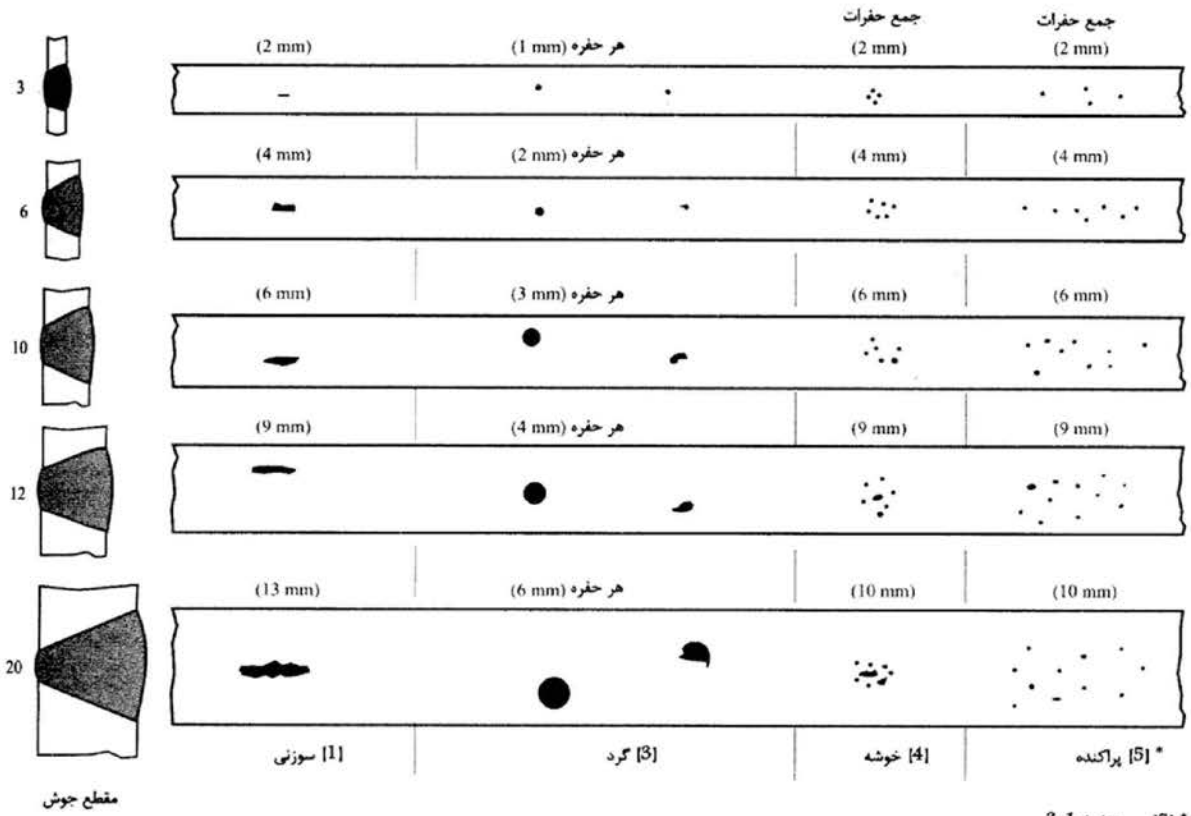


شکل ۸ ـ ۶۳ شرایط پذیرش ناپیوستگی یا حفرات سوزنی آشکارشده در عکس‌های پرتونگاری برای جوش‌ها تحت بار استاتیکی.

(۵) مجموع بُعد حفرات تک با بُعد حداکثر ۲ میلی‌متر، در هر ۲۵ میلی‌متر طول جوش، نباید بزرگتر از E/3 ۲ یا ۱۰ میلی‌متر (هر کدام که کوچکتر است)، باشد. این محدودیت مستقل از بندهای ۱ و ۲ و ۳ می‌باشد.

(۶) در حفرات سوزنی وقتی که مجموع بُعد بزرگتر حفرات، بزرگتر از E در هر 6 E طول نوار جوش باشد. وقتی که کل نوار جوش کوچکتر از 6 E باشد، مقدار مجاز مجموع حفرات، به‌تناسب کاهش می‌یابد.

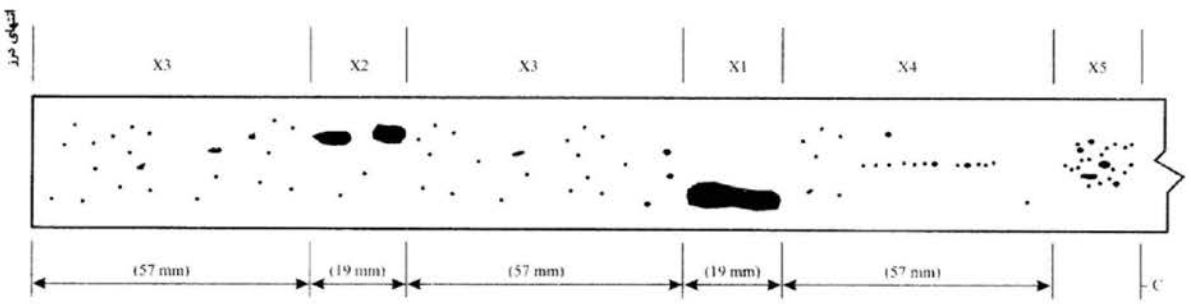
در شکل‌های ۸ ـ ۶۴ و ۸ ـ ۶۵ کاربرد بند ۸ ـ ۴ ـ ۴ ـ ۱ به‌صورت تصویری نشان داده شده است.



* [5] مستقل از 1 و 3

* [5] می تواند در ترکیب با 1 و 3 باشد

شکل ۸ ـ ۶۴ ضوابط پذیرش نتایج بازرسی پرتونگاری.



شکل ۸ ـ ۶۵ ضوابط پذیرش نتایج بازرسی پرتونگاری.

۸ ـ ۴ ـ ۵ آزمایش جریان گردابی[۳۳]

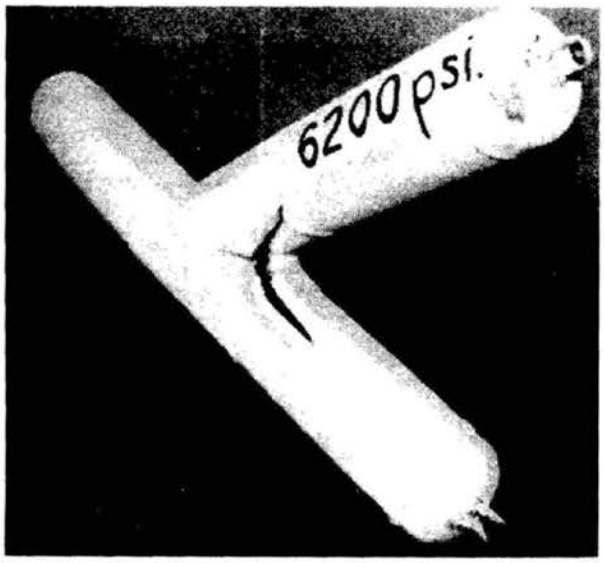
آزمایش جریان گردابی (یا جریان القایی: جریان الکتریکی که در داخل یک جسم فلزی بر اثر قرار گرفتن آن در داخل یک میدان مغناطیسی القا می‌شود) مشابه روش ذرات مغناطیسی، از انرژی الکترومغناطیسی جهت آشکارسازی معایب و نواقص در مصالح استفاده می‌کند.

این‌روش هم برای‌مصالح آهن‌دار و هم ترکیبات غیرآهنی مناسب بوده و به‌ویژه در بازرسی جوشکاری خطوط لوله کاربرد دارد. این شیوه عیوبی از قبیل تخلخل، نفوذ یا اختلال گل جوشکاری، ترک و ذوب ناقص فلز جوش را ظاهر می‌سازد.

۸ ـ ۴ ـ ۶ آزمایش نشت

آزمایش جوش در مقابل نشت یا تراوش مایعات با کاربرد فشار باد یا فشار هیدرولیکی انجام می‌شود. فشار واردشده برابر یا بزرگتر از مقدار فشار مورد انتظار وارد بر سازه در شرایط بهره‌برداری است. اگر آزمایش فقط برای تعیین نشتی انجام می‌شود، اعمال فشاری بیش از فشار بهره‌برداری وارد بر جوش لازم نیست. ولی اگر گسیختگی قطعه جوش‌شده صدمات مالی و جانی بزرگی را در پی داشته باشد، فشاری اضافه بر شرایط بهره‌برداری اعمال خواهد شد. این روش معمولاً برای آزمایش جوشکاری مخازن تحت فشار و خطوط لوله به‌کار می‌رود. اگر آزمایش از نوع مخرب باشد، فشار تا حد ترکیدن (گسیختگی) قطعه مورد نظر وارد می‌شود (شکل ۸ ـ ۶۶).

در این‌آزمایش معمولاً از آب جهت تعیین محل نشت استفاده می‌شود ولی روزنه‌های خیلی کوچک همیشه با آب قابل تشخیص نیستند. با استفاده از هوا یا روغن تحت فشار و چسبندگی کم، امکان شناسایی این موارد نیز وجود دارد.



شکل ۸ ـ ۶۶ یک واحد لوله که تحت آزمایش نشت با فشار هیدرولیکی قرار گرفته است. جوش تحت فشاری معادل ۴۳۵ kg/cm^2 گسیخته است.

33. Eddy current testing

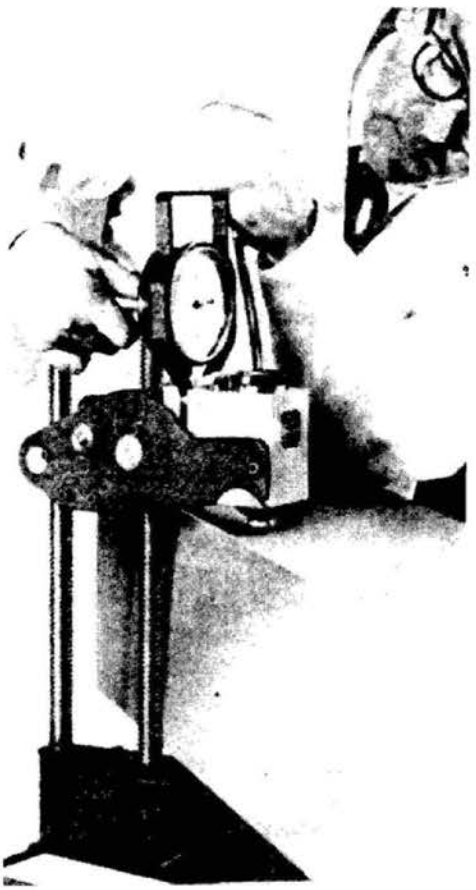
۸ ـ ۴ ـ ۷ آزمایش سختی

اغلب آزمایش سختی فلز جوش و فلز پایه در محدوده جوشکاری علاوه‌بر بازرسی کیفی جوش، مهم می‌باشد. اطلاع از میزان سختی جوشی که ماشین‌کاری می‌شود یا در معرض ساییدگی قرار دارد، مهم و ضروری است.
تعدادی آزمایش سختی به‌شیوه غیرمخرب وجود دارد که انتخاب هر نوع بستگی به‌نوع مصالح مورد آزمایش دارد.

برینل

آزمایش سختی برینل شامل اثرگذاری یک گلوله فولادی سخت بر روی قطعه فلزی مورد آزمایش تحت یک فشار معین و زمان از پیش تعریف شده می‌باشد (شکل ۸ ـ ۶۷). قطر اثر گلوله روی قطعه اندازه‌گیری می‌شود و براساس این قطر یک عدد برینل از جدول مربوطه استخراج می‌شود.

اثر گلوله برینل بر روی قطعه مورد آزمایش معمولاً بزرگ است، بنابراین، این روش در مورد تعیین سختی سطوح بزرگ و زمانی که اثرگذاری روی سطح مجاز باشد، به‌کار می‌رود.



شکل ۸ ـ ۶۷ یک دستگاه آزمایش سختی برینل.

۸ ـ ۴ ـ ۸ زمان انجام آزمایش پس از جوشکاری

به‌غیر از جوشکاری ورق‌ها با تنش تسلیم F_y بزرگتر از ۶۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تمام بازرسی‌های غیرمخرب جوشکاری را می‌توان بلافاصله بعد از خنک شدن جوش انجام داد. در مورد جوشکاری فولادهای خیلی پُرمقاومت ($F_y > ۶۰۰۰ \ kg/cm^2$)، بازرسی‌ها ۴۸ ساعت بعد از خنک شدن جوش آغاز می‌شود.

۸ ـ ۵ برنامه‌ریزی آزمایش‌های غیرمخرب

یکی از سؤالات مهمی که در برنامه‌ریزی آزمایشات جوش پیش می‌آید، تعیین درصدی از جوش‌ها می‌باشند که باید مورد آزمایش غیرمخرب قرار گیرند. در تعیین میزان آزمایش‌ها دو واقعیت اثر متقابل بر هم دارند، هزینه آزمایش‌ها، و سلامتی و ایمنی جوش‌ها. بدون شک روشی که با حداقل هزینه، حداکثر ایمنی مطلوب را به‌وجود آورد، مورد توجه خواهد بود. در جدول ۸ ـ ۴ دستورالعملی که در اکثر قراردادهای ساخت قطعات فولادی مورد استناد قرار می‌گیرد، ارایه شده است.

جدول ۸ ـ ۴ میزان آزمایش‌های غیرمخرب هنگام تولید*

نوع جوش مورد آزمایش	نوع آزمایش
۱ ـ صد در صد کلیهٔ جوش‌ها	بازرسی عینی
۲ ـ صد در صد جوش‌های لب به‌لب عرضی بال‌های کششی، اعضای کششی خرپاها، $\frac{1}{6}$ ارتفاع جان تیرها در مجاورت بال کششی* و جوش شیاری ورق روسری و زیرسری ستون در اتصال صلب تیر به‌ستون	پرتونگاری یا فراصوت
۳ ـ ده درصد جوش‌های لب به‌لب طولی بال‌های کششی و اعضای کششی خرپاها	پرتونگاری یا فراصوت
۴ ـ بیست درصد جوش‌های لب به‌لب عرضی و طولی در بال‌های فشاری و اعضای فشاری خرپاها	پرتونگاری یا فراصوت
۵ ـ بیست درصد جوش‌های لب به‌لب عرضی جان تیرها که شامل بند ۲ فوق نمی‌باشد و جوش‌های لب به‌لب طولی جان تیرها	پرتونگاری یا فراصوت
۶ ـ ده درصد جوش گوشهٔ بال به‌جان و سخت‌کننده‌ها	برادهٔ مغناطیسی یا رنگ نافذ
۷ ـ صد درصد جوش‌های گوشهٔ اتصالات مهاربندها و اتصالات تیر به‌ستون*	رنگ نافذ

* در صورت حصول نتایج مثبت، مهندس ناظر می‌تواند دستور تقلیل آزمایشات را تا سقف ۳۰ درصد صادر نماید. در صورت بروز نامنظمی در نتایج آزمایش و حضور جوش‌های معیوب، درصد بازرسی مجدداً به‌وضعیت جدول برمی‌گردد.

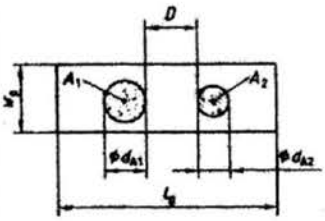
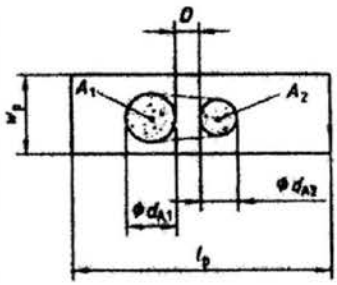
۸ ـ ۶ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO 5817

در قسمت‌های گذشتهٔ این فصل ضوابط پذیرش آزمایش‌های پرتونگاری و اولتراسونیک طبق آیین‌نامهٔ AWS (انجمن جوش آمریکا) در قسمت‌های مربوطه ذکر گردید. در این قسمت ضوابط پذیرش عیوب داخلی (از هر آزمایشی که به‌دست آمده) طبق ISO 5817 مطابق جدول ۸ ـ ۵ ارائه می‌گردد.

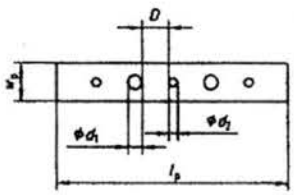
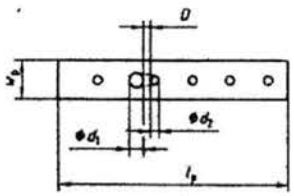
جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
عیوب داخلی							
2.1	100	ترک‌ها	همه انواع ترک‌ها به‌جز ترک‌های مویی و ترک‌های ستاره‌ای چاله جوش	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست
2.2	1001	ترک‌های مویی	هر ترکی که فقط تحت میکروسکوپ (با بزرگنمایی x50) قابل رؤیت باشد.	≥0.5	پذیرش آن به نوع فلز پایه با توجه خاص به حساسیت ترک بستگی دارد.		مجاز است
2.3	2011 2012	تخلخل گازی با توزیع یکنواخت	شرایط و محدودیت‌های زیر باید برآورده شوند.				
			a1) حداکثر ابعاد سطح عیوب (شامل عیوب سیستماتیک) نسبت به سطح تصویرشده **توجه:** تخلخل در سطح تصویر به‌تعداد لایه‌ها بستگی دارد.	≥0.5	جوش تک‌پاسی: ≤1% جوش چندپاسی: ≤2%	جوش تک‌پاسی: ≤1.5% جوش چندپاسی: ≤3%	جوش تک‌پاسی: ≤2.5% جوش چندپاسی: ≤5%
			a2) حداکثر ابعاد سطح مقطع عیوب (شامل عیوب سیستماتیک) نسبت به سطح شکست (فقط در مورد آزمایشات ارزیابی جوشکاران، فرآیند جوشکاری و تولید قابل استفاده است).	≥0.5	≤1%	≤1.5%	≤2.5%
			b) حداکثر ابعاد یک تخلخل منفرد برای: ـ جوش لب به‌لب ـ جوش گوشه	≥0.5	d ≤ 0.2s, but max 3 mm d ≤ 0.2a, but max 3 mm	d ≤ 0.3s, but max 4 mm d ≤ 0.3a, but max 4 mm	d ≤ 0.4s, but max 5 mm d ≤ 0.4a, but max 5 mm

جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.4	2013	تخلخل خوشه‌ای (تخلخل موضعی)	مورد اول: $(D > d_{A2})$  مورد دوم: $(D < d_{A2})$  مجموع سطح حفرات مختلف $(A_1+A_2+...)$ نسبت به‌سطح ارزیابی $A_p \times A_w$ (مورد اول) طول مرجع برای L_p به‌میزان ۱۰۰ میلی‌متر است. اگر D از d_{A1} یا d_{A2} کوچکتر باشد، هر کدام که کوچکتر باشد، یک پوشی که سطح این حفرات را در بر بگیرد A_1+A_2 باید به‌عنوان یک عیب در نظر گرفته شود (مورد دوم)				

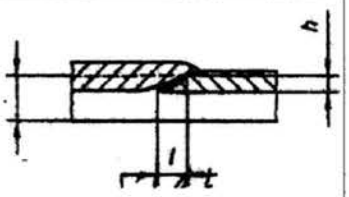
جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.4	2013	تخلخل خوشه‌ای (تخلخل موضعی)	شرایط و محدودیت‌های ابعادی زیر باید برای این عیوب برآورده شوند				
			a) حداکثر ابعاد مجموع سطوح تصویرشدهٔ عیوب (شامل عیوب سیستماتیک)	≥0.5	≤ 4 %	≤ 8 %	≤ 16%
			b) حداکثر ابعاد یک حفره منفرد در ـ جوش‌های لب‌به‌لب ـ جوش گوشه	≥0.5	d ≤ 0.2s, but max 2 mm d ≤ 0.2a, but max 2 mm	d ≤ 0.3s, but max 3 mm d ≤ 0.3a, but max 3 mm	d ≤ 0.4s, but max 4 mm d ≤ 0.4a, but max 4 mm
2.5	2014	تخلخل خطی	مورد اول: $(D > d_2)$  مورد دوم: $(D < d_2)$ 				

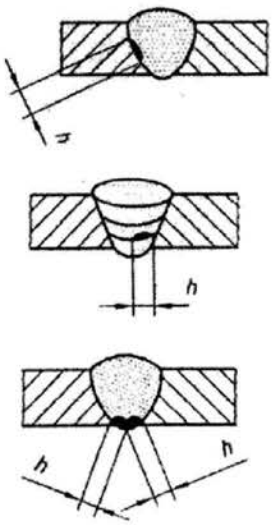
جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.5	2014	تخلخل خطی	مجموع سطح حفرات مختلف $\left[\frac{d_1^2\times\pi}{4}+\frac{d_2^2\times\pi}{4}+\ldots\right]$ نسبت به‌سطح ارزیابی $L_p\times w_p$ (مورد اول)				
			اگر D کوچکتر از قطر کوچکتر یکی از حفرات همسایه باشد، سطح کامل دو حفره به‌هم‌چسبیده باید به‌عنوان مجموع عیوب در نظر گرفته شود. (حدود ۲)				
			شرایط و محدودیت‌های زیر برای عیوب باید برآورده شود.				
			a1) حداکثر ابعاد سطح عیوب (شامل عیوب سیستماتیک) نسبت به سطح تصویرشده	≥0.5	جوش تک‌پاسی: ≤2% جوش چندپاسی: ≤4%	جوش تک‌پاسی: ≤4% جوش چندپاسی: ≤8%	جوش تک‌پاسی: ≤8% جوش چندپاسی: ≤16%
			a2) حداکثر ابعاد سطح مقطع عیوب (شامل عیوب سیستماتیک) نسبت به سطح شکست (فقط برای آزمایشات ارزیابی جوشکاران، فرآیندهای جوشکاری و تولید کاربرد دارد).	≥0.5	≤2%	≤4%	≤8%
			b) حداکثر ابعاد یک حفره منفرد برای ـ جوش لب به‌لب ـ جوش گوشه	≥0.5	d ≤ 0.2s, but max 2 mm d ≤ 0.2a, but max 2 mm	d ≤ 0.3s, but max 3 mm d ≤ 0.3a, but max 3 mm	d ≤ 0.4s, but max 4 mm d ≤ 0.4a, but max 4 mm

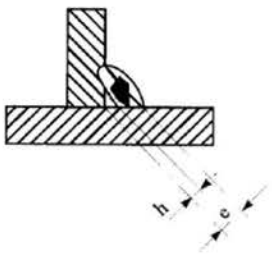
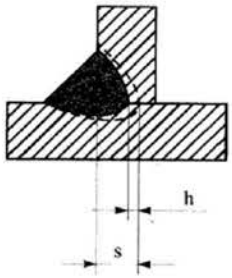
جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.6	2015 2016	حفرات کرمی‌شکل کشیده‌شده	ـ جوش لب به‌لب	≥0.5	h ≤ 0.2s, but max 2 mm l ≤ s, but max 25 mm	h ≤ 0.3s, but max 3 mm l ≤ s, but max 50 mm	h ≤ 0.4s, but max 4 mm l ≤ s, but max 75 mm
			ـ جوش گوشه	≥0.5	h ≤ 0.2a, but max 2 mm l ≤ a, but max 25 mm	h ≤ 0.3a, but max 3 mm l ≤ a, but max 50 mm	h ≤ 0.4a, but max 4 mm l ≤ a, but max 75 mm
2.7	202	حفرات انقباض	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک مورد تأیید است، اما نباید از سطح بیرون باشد. ـ جوش لب به‌لب h ≤ 0.4s, but max 4 mm ـ جوش گوشه h ≤ 0.4a, but max 4 mm
2.8	2024	سوراخ چاله جوش	 بزرگترین مقدار h یا l اندازه‌گیری می‌شود.	0.5to3 >3	مجاز نیست	مجاز نیست	h or l ≤ 0.2t h or l ≤ 0.2t, but max 2 mm
2.9	300 301 302 303	آخال جامد آخال سرباره آخال گدازآور آخال اکسیدی	ـ جوش لب به‌لب	≥0.5	h ≤ 0.2s, but max 2 mm l ≤ s, but max 25 mm	h ≤ 0.3s, but max 3 mm l ≤ s, but max 50 mm	h ≤ 0.4s, but max 4 mm l ≤ s, but max 75 mm
			ـ جوش گوشه	≥0.5	h ≤ 0.2a, but max 2 mm l ≤ a, but max 25 mm	h ≤ 0.3a, but max 3 mm l ≤ a, but max 50 mm	h ≤ 0.4a, but max 4 mm l ≤ a, but max 75 mm

جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.10	304	آخال فلزی به‌غیر از مس	ـ جوش لب به‌لب	≥0.5	h ≤ 0.2s, but max 2 mm	h ≤ 0.3s, but max 3 mm	h ≤ 0.4s, but max 4 mm
			ـ جوش گوشه	≥0.5	h ≤ 0.2a, but max 2 mm	h ≤ 0.3a, but max 3 mm	h ≤ 0.4a, but max 4 mm
2.11	3042	آخال مسی	ـ	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	مجاز نیست
2.12	401 4011 4012 4013	ذوب ناقص ذوب ناقص دیواره ذوب ناقص یک‌پاسی ذوب ناقص ریشه جوش		≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک مورد تأیید است. ـ جوش لب به‌لب h ≤ 0.4s, but max 4 mm ـ جوش گوشه h ≤ 0.4a, but max 4 mm

جدول ۸ ـ ۵ ضوابط پذیرش عیوب داخلی جوش مطابق ISO5817 (ادامه)

ردیف	مرجع در ISO	نوع عیب	توضیحات	ضخامت mm	ردهٔ پذیرش		
					B	C	D
2.13	402	نفوذ ناقص	 **اتصال T (جوش گوشه)**	>0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک h ≤ 0.2a, but max 2 mm
			 **اتصال T (نیمه نفوذی)** **اتصال لب به لب (نیمه نفوذی)**	≥0.5	مجاز نیست	عیوب کوچک butt joint h ≤ 0.1s, but max 1.5 mm fillet joint h ≤ 0.1a, but max 1.5 mm	عیوب کوچک butt joint h ≤ 0.2s, but max 2 mm T – joint h ≤ 0.2a, but max 2 mm
			اتصال لب به لب (نفوذی کامل)	≥0.5	مجاز نیست	مجاز نیست	عیوب کوچک h ≤ 0.2t, but max 2 mm

۹ مسائل اجرایی در کارهای فولادی

۹ـ۱ عملیات اجرایی در کارهای فولادی ۳۱۱
۹ـ۲ تهیه نقشه‌های ساخت ۳۱۲
۹ـ۳ عملیات برشکاری و آماده‌سازی لبه‌ها ۳۱۳
۹ـ۴ ساخت اعضا ۳۲۱
۹ـ۵ عملیات تمیزکاری و رنگ ۳۵۶
۹ـ۶ عملیات حمل ۳۶۰
۹ـ۷ عملیات پیش‌مونتاژ و مونتاژ در پای کار ۳۶۲
۹ـ۸ عملیات واداشتن، نصب، خال‌جوش و اتصالات موقت ۳۶۳
۹ـ۹ شاقولی کردن ستون‌ها، هم‌محور کردن تیرها و تکمیل اطلاعات ۳۶۴
۹ـ۱۰ نصب کف ستون ۳۶۸
۹ـ۱۱ رواداری نصب ستون ۳۶۹

۹ مسائل اجرایی در کارهای فولادی

اسکلت فولادی مجموعه‌ای است از نیمرخ‌های فولادی، ورق و نیمرخ‌های ورقی که باید به‌کمک اتصالات و وسایل اتصال مناسب نظیر جوش، پیچ و یا پرچ به‌یکدیگر متصل شوند.

۹ـ۱ عملیات اجرایی در کارهای فولادی

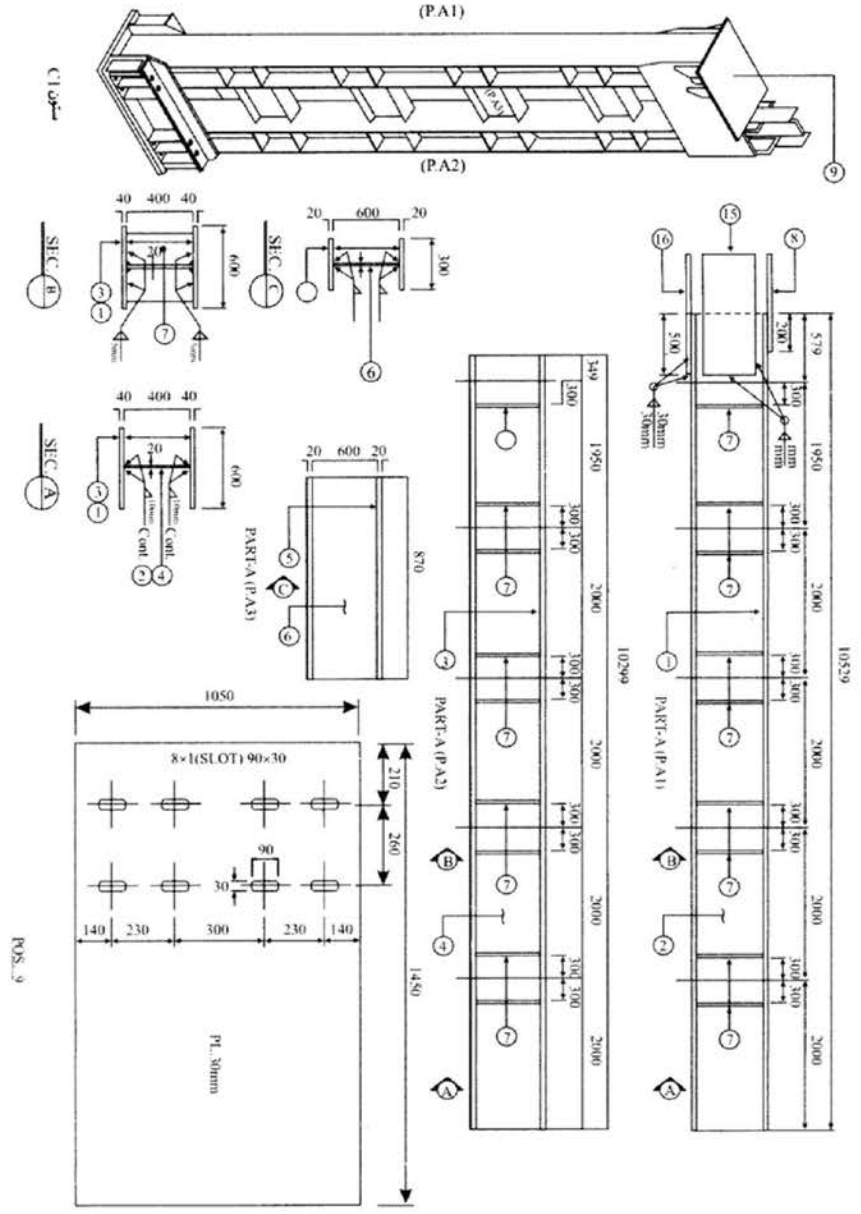
ترتیب عملیات اجرایی در کارگاه فولادی به‌شرح زیر است:

۱ ـ تهیه نقشه‌های ساخت با توجه به‌نقشه‌های محاسباتی
۲ ـ عملیات برشکاری و سوراخ‌کاری
۳ ـ عملیات ساخت اعضا
۴ ـ تمیزکاری و رنگ
۵ ـ حمل
۶ ـ عملیات پیش‌مونتاژ و مونتاژ در پای کار
۷ ـ عملیات واداشتن، نصب، خال‌جوش و اتصالات موقت
۸ ـ تنظیم نهایی، شاقولی کردن ستون‌ها، هم‌محور کردن تیرها و تکمیل اتصالات
۹ ـ بازرسی و تأیید نهایی
۱۰ ـ رنگ‌آمیزی و لکه‌گیری

در ادامه موارد فوق مورد بحث قرار می‌گیرند.

۹ ـ ۲ تهیه نقشه‌های ساخت

قبل از شروع عملیات اجرایی، نقشه‌های محاسباتی که توسط مهندس طراح ارایه شده، به‌وسیله مهندسین دفتر فنی و تکنسین‌های اجرایی پیمانکار مورد مطالعه دقیق قرار گرفته و پس از سیاست‌گذاری عملیات ساخت و اجرا و گرفتن تأییدیه‌های لازم از طراح، اسکلت فولادی به‌اجزای ریزتر تقسیم شده و پس از تعیین هندسه هر جزء، ابعاد ورق، محل سوراخ‌ها، نحوهٔ آماده‌سازی لبه‌ها، محل و اندازه جوش‌ها، در مقیاس مناسب رسم می‌گردد. در شکل ۹ ـ ۱ نمونه‌ای از نقشه ساخت یک قطعه فلزی نشان داده شده است که به‌آن نقشه‌های کارگاهی (shop drawing) می‌گویند.

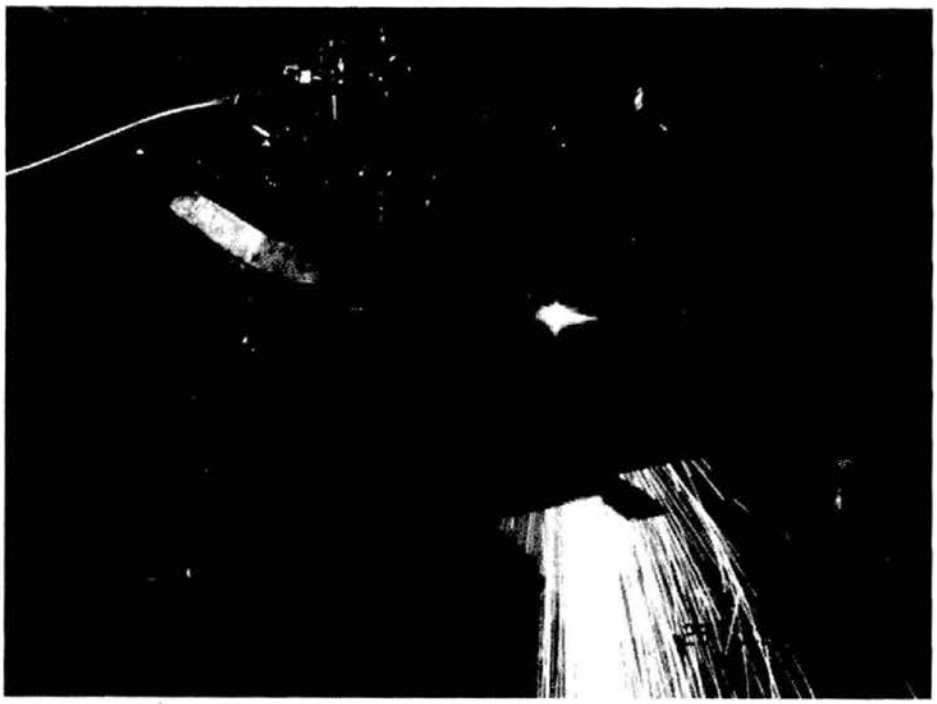


شکل ۹ ـ ۱ نقشهٔ کارگاهی یک قطعهٔ ساختمانی.

۹ ـ ۳ عملیات برشکاری و آماده‌سازی لبه‌ها

عملیات برشکاری برحسب ضخامت ورق می‌تواند به‌کمک برش حرارتی و یا برش گیوتینی انجام پذیرد.

برای انجام عملیات برشکاری به‌روش حرارتی، ابتدا شاسی‌های مناسبی که ورق یا پروفیل را در وضعیت تخت و تراز قرار می‌دهند، ساخته می‌شوند. در شکل ۹ ـ ۲ تصویری از شاسی‌های برش نشان داده شده است.



شکل ۹ ـ ۲ شاسی‌کشی برای برشکاری.

بعد از استقرار ورق در روی شاسی و خط‌کشی آن، ریل‌گذاری انجام شده و دستگاه برش خودکار بر روی ریل مستقر می‌گردد (شکل ۹ ـ ۳). برحسب ضخامت ورق، اپراتور سرعت حرکت مناسبی برای دستگاه برش تنظیم می‌نماید و دستگاه با حرکت به‌سمت جلو عملیات برش را به‌صورت خودکار تحت نظارت اپراتور انجام می‌دهد.

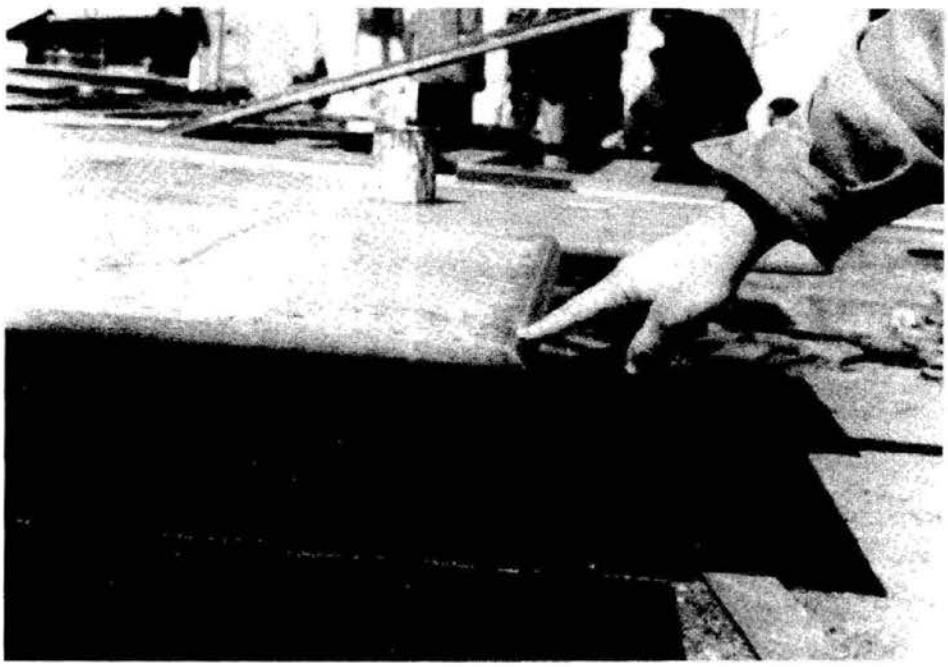
پس از انجام برش‌های اصلی، به‌دستگاه برش حرارتی زاویه داده می‌شود و این بار با انجام برش زاویه‌دار، پخی لازم به‌لبه‌ها جهت انجام جوش شیاری داده می‌شود (شکل ۹ ـ ۴). عملیات آماده‌سازی لبه‌ها برای ضخامت‌های کم را می‌توان به‌کمک دستگاه لبه‌زن انجام داد. با توجه به‌اینکه لبه‌زن، زاویه مورد نظر را با له کردن ورق ایجاد می‌نماید، لبه به‌وجود آمده از کیفیت مناسبی برخوردار نیست و پس از جوشکاری، ترک‌هایی در نواحی مجاور جوش به‌وجود می‌آید.

به‌علت به‌وجود آمدن انقباض که در نتیجه برش هوا رخ می‌دهد، در صورتی که ورق از یک طرف بریده شود، به‌صورت شمشیری در می‌آید. به‌همین دلیل باید هر دو سمت ورق بال به‌صورت همزمان برش داده شوند. می‌توان این عملیات را با یک دستگاه برش که دارای چندین مشعل می‌باشد، به‌طور همزمان انجام داد (شکل ۹ ـ ۶ ـ پ).

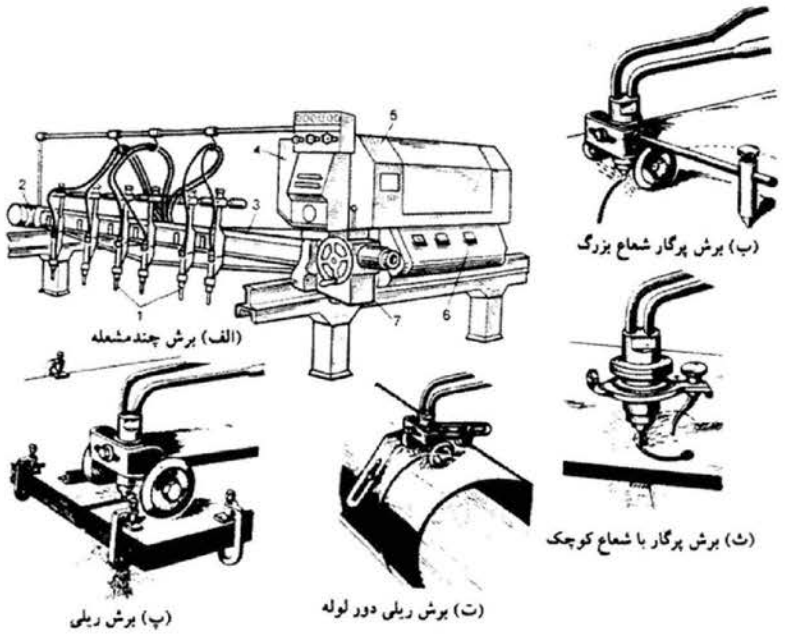
در مورد تیرها و شاهتیرهایی که دارای انحنای افقی می‌باشند، ورق‌های بال با انحنای مشخصی به‌وسیله برش هوا بریده می‌شود.

در شکل‌های ۹ ـ ۵ و ۹ ـ ۶ دستگاه‌ها و تکنیک‌های مختلف برش قطعات فولادی نشان داده شده است.

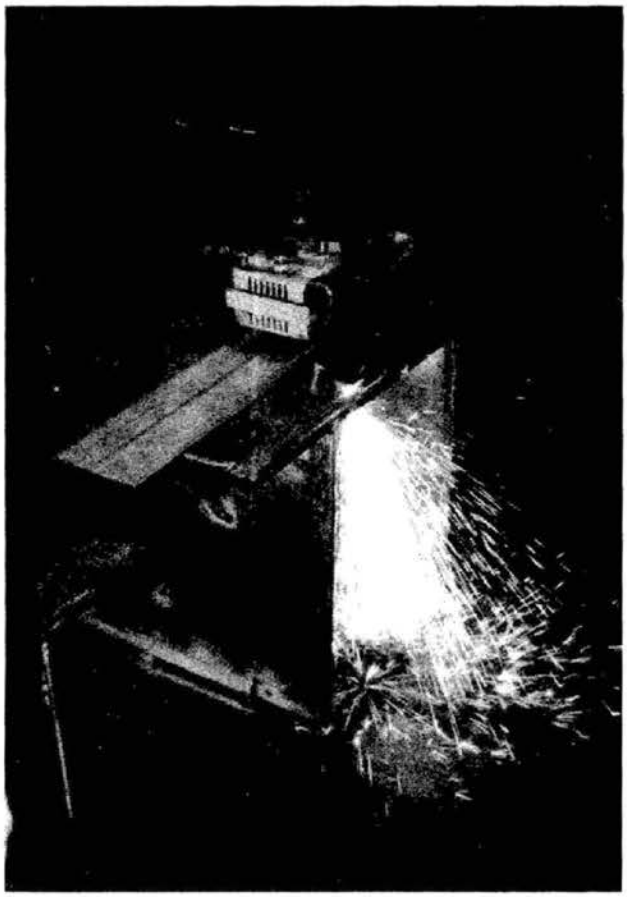
شکل ۹ ـ ۳ عملیات برشکاری با دستگاه برش خودکار. برشکاری باید در هر دو لبه انجام شود، وگرنه باعث شمشیری شدن ورق بریده شده می‌شود.



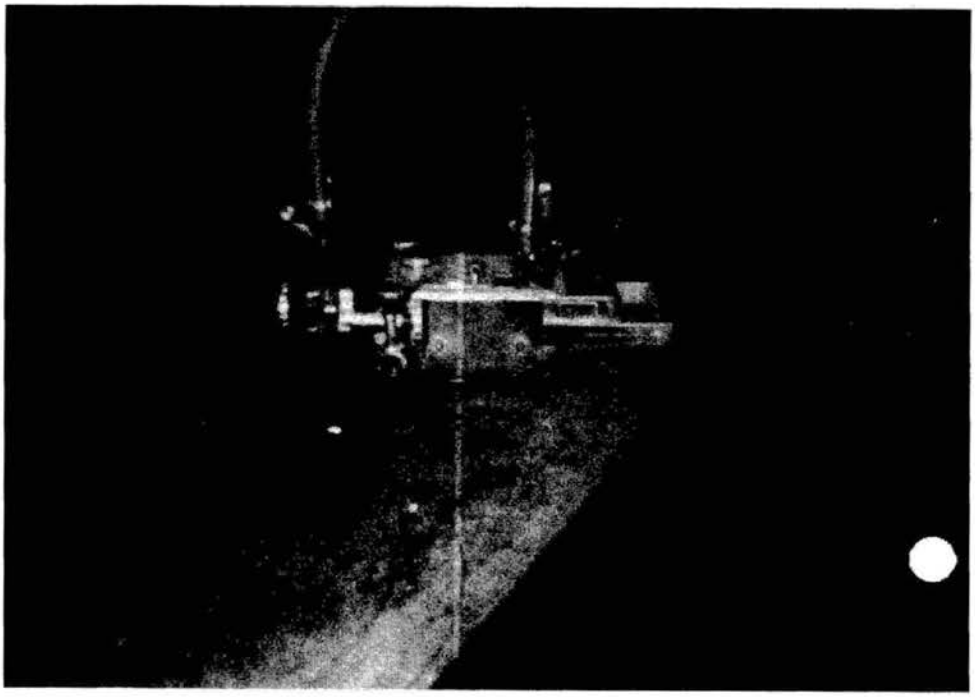
شکل ۹ ـ ۴ آماده‌سازی لبه‌ها.



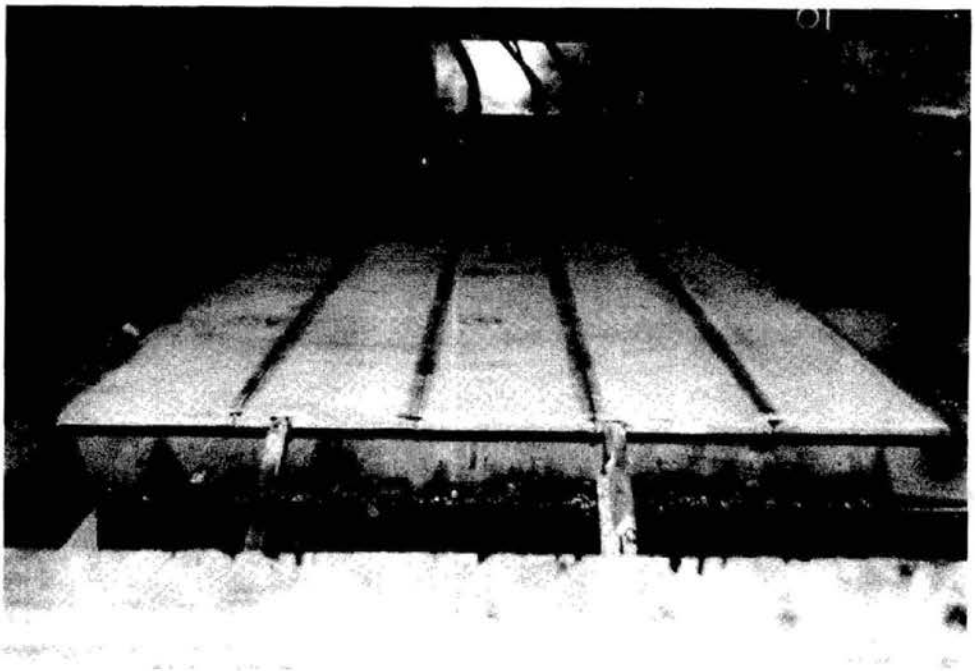
شکل ۹ ـ ۵ وسایل مختلف برش.



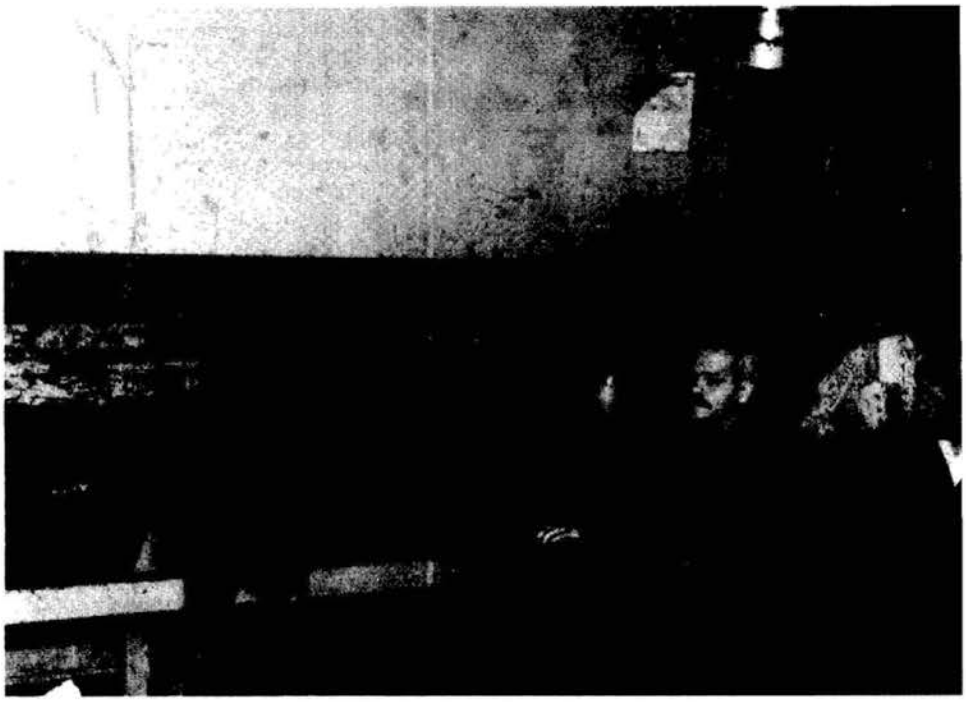
شکل ۹ ـ ۶ ـ الف برش انتهای ستون و گونیا کردن آن بعداز ساخت کامل عضو.



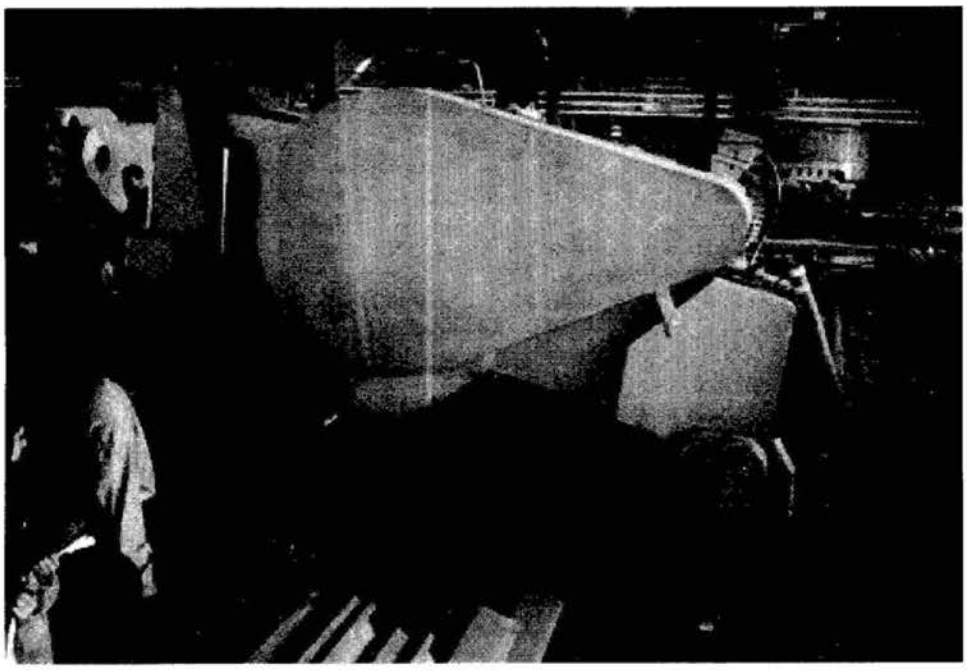
شکل ۹ ـ ۶ ـ ب دستگاه برش پرگاری.



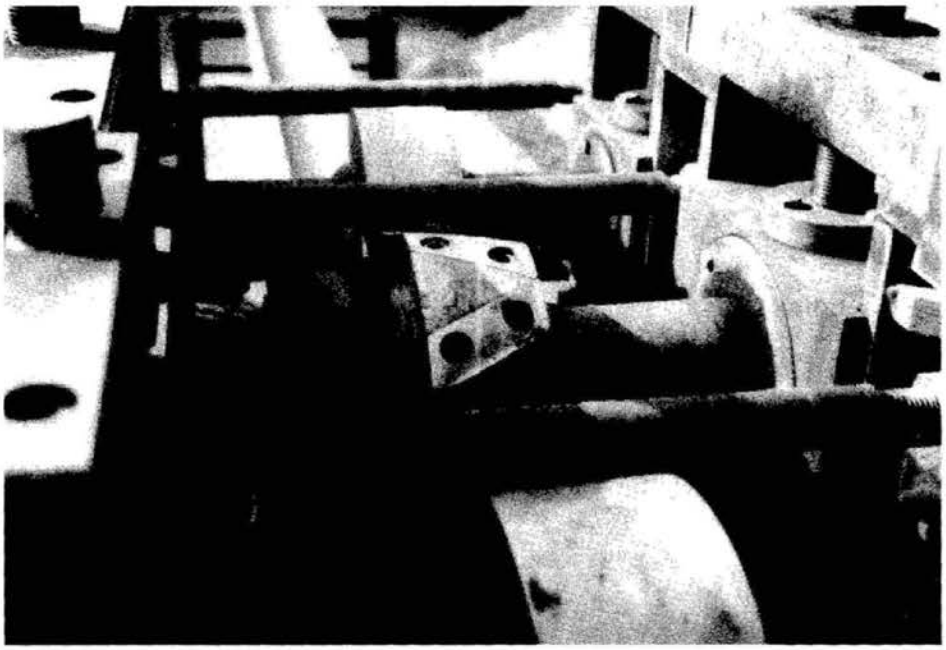
شکل ۹ ـ ۶ ـ پ دستگاه برش چندمشعله. در سمت چپ عکس به‌برش لبه گرد ورق (لبه فابریک) توجه نمایید. برش و دورریز لبه گرد ورق به‌علت وجود ترک‌های حین نورد لازم است.



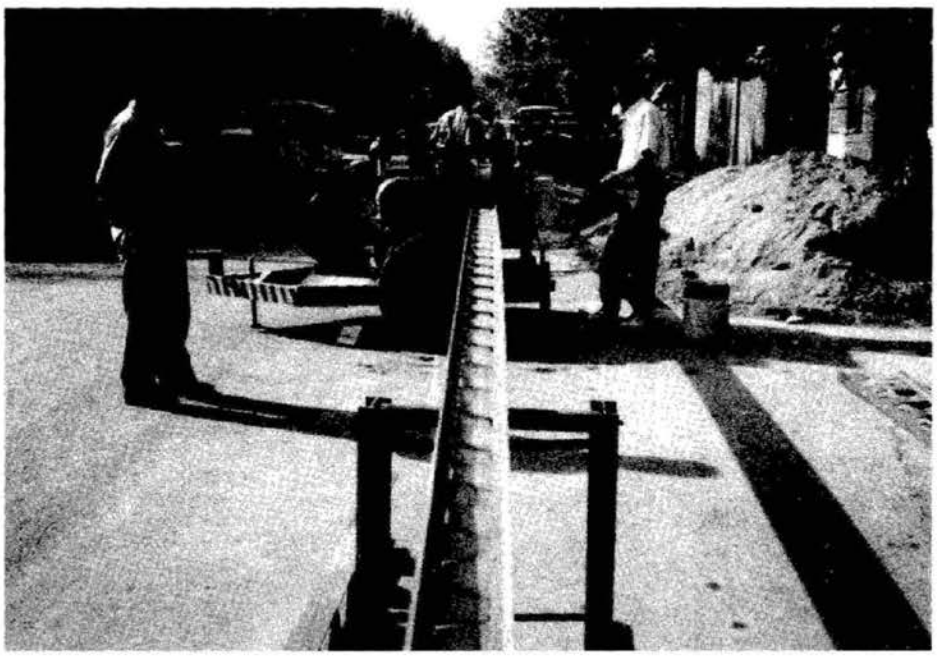
شکل ۹ ـ ۶ ـ ت دستگاه برش گیوتین.



شکل ۹ ـ ۶ ـ ث دستگاه برش اره گرد برای برش نیمرخ‌ها.



شکل ۹ ـ ۶ ـ ج برش تیر لانه‌زنبوری به‌کمک تیغه برش.



شکل ۹ ـ ۶ ـ چ برش تیر لانه‌زنبوری به‌کمک تیغه برش (ادامه).

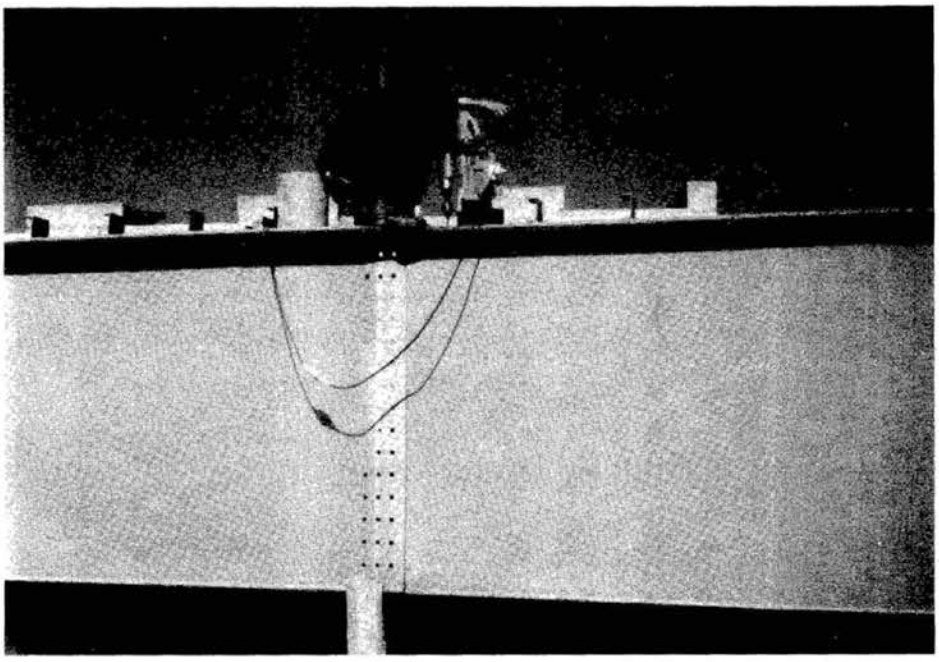
عملیات سوراخ‌کاری

پس از عملیات برش، در صورت نیاز عملیات سوراخ‌کاری انجام می‌شود. انجام عملیات سوراخ‌کاری به‌دو روش ممکن است:

۱ ـ مته (شکل‌های ۹ ـ ۷ ـ الف و ب)

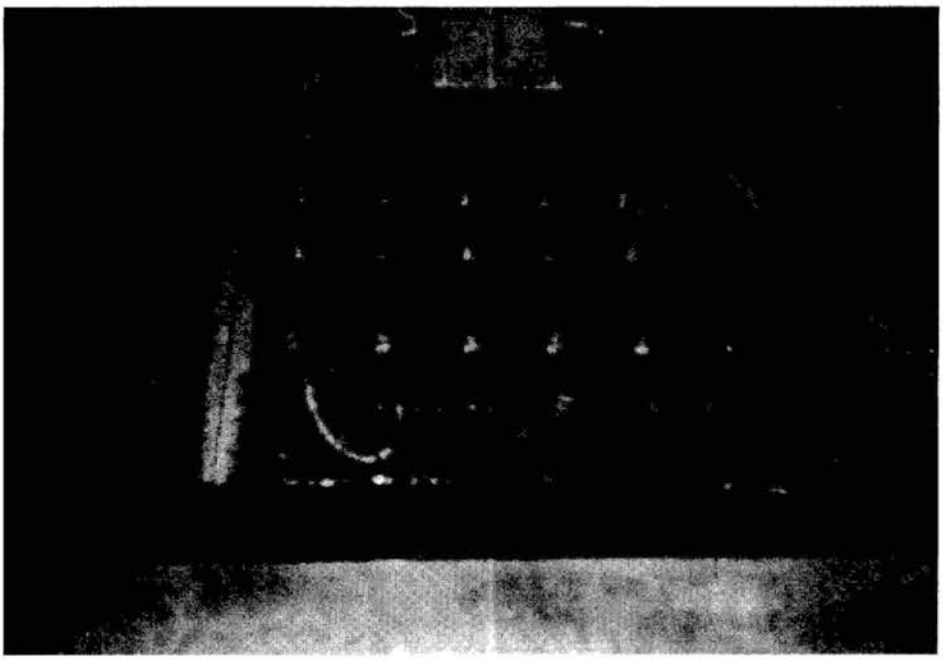
۲ ـ دستگاه پانچ (ضربه‌زن) (شکل ۹ ـ ۷ ـ ت)

سوراخ ایجادشده توسط مته از کیفیت بسیار خوبی برخوردار است ولی عملیات مربوطه پرهزینه می‌باشد. عملیات مته‌کاری معمولاً توسط مته‌های رادیال انجام می‌شود (شکل ۹ ـ ۷ ـ ب) که دارای بازده خوبی می‌باشد. در صورتی که ضخامت ورق در حد کم یا متوسط (تا حدود ۱۵ میلی‌متر) باشد، انجام سوراخ‌ها توسط دستگاه سوراخ‌زن (پانچ) انجام می‌شود . آزمایشات نشان می‌دهند که در پیرامون سوراخ‌های ایجادشده توسط دستگاه سوراخ‌زن، ترک‌های میکروسکوپی وجود دارد که در محاسبات تأثیر این ترک را با افزودن قطر سوراخ به‌مقدار ۲ میلی‌متر منظور می‌نمایند. راه‌حل میانه این است که ابتدا سوراخی با قطر کوچکتر توسط دستگاه سوراخ‌زن ایجاد شود و سپس توسط مته‌کاری گشاد شده و به‌قطر مورد نظر افزایش یابد.

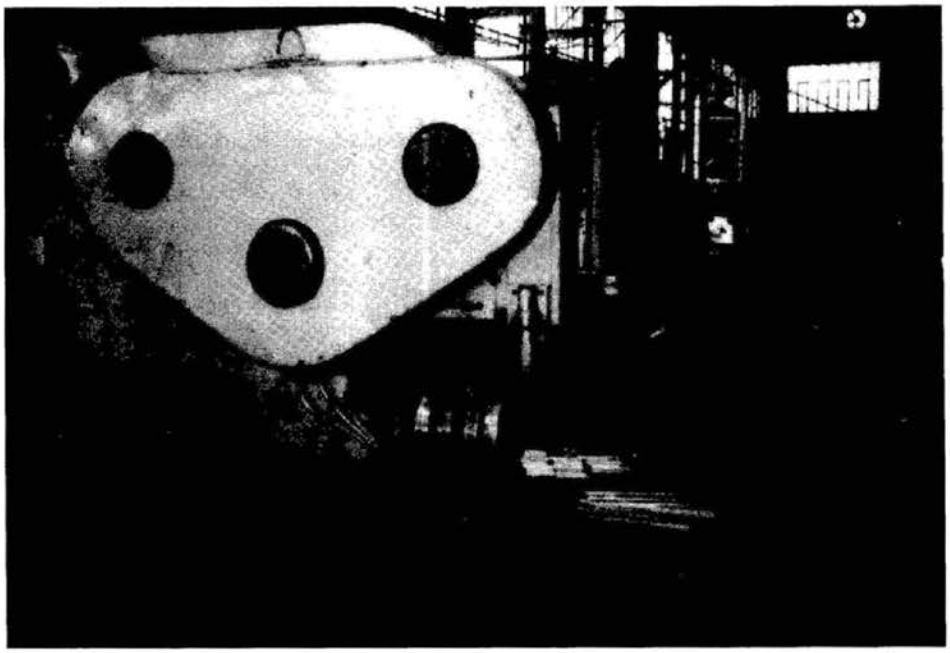


شکل ۹ ـ ۷ ـ الف مته مغناطیسی.

شکل ۹ ـ ۷ ـ ب مته رادیال.



شکل ۹ ـ ۷ ـ پ خط‌کشی قطعه برای انجام عملیات سوراخ‌کاری.



شکل ۹ ـ ۷ ـ ت برشکاری توسط برش ضربه‌زن.

۹ ـ ۴ ساخت اعضا

روش ساخت اعضا برحسب اینکه از ورق ساخته شوند و یا پروفیل، متفاوت خواهد بود. در صورتی که اعضا از ورق ساخته شوند، مراحل کار به‌صورت زیر است:

۱ ـ برشکاری

۲ ـ تسمه‌سازی ـ یعنی یکسره کردن ورق‌ها و انجام جوش درزهای آنها در روی شاسی و بازرسی جوش درزها

۳ ـ مونتاژ اولیه ـ یعنی مونتاژ بال و جان و خال جوش کردن آن در داخل قالب

۴ ـ جوش اولیه ـ تکمیل جوشکاری بال و جان یا جوش سخت‌کننده‌های ستون‌های جعبه‌ای

۵ ـ مونتاژ صفحه ستون یا فلنج تیر

۶ ـ تابگیری

۷ ـ مونتاژ سخت‌کننده‌ها و سایر الحاقیات هسته ستون یا مونتاژ وجه چهارم در ستون‌های جعبه‌ای

۸ ـ جوش ثانویه ـ تکمیل جوش هسته ستون و یا تیر

۹ ـ مونتاژ نهایی ـ ملحقات ستون (دستک، ورق زیرسری، ورق بادبند و...)

۱۰ ـ جوش نهایی

در مواقعی تقدم و تأخر ردیف‌های ۲ و ۳ عوض می‌شود؛ یعنی ورق‌های بال و جان مونتاژ می‌شوند و سپس جوش درزها انجام می‌شود. این کار هر چند ممکن است از نظر کنترل تغییر شکل‌ها مفید باشد، لیکن به‌علت به‌وجود آمدن دو عیب عمده زیر غیرمجاز می‌باشد:

۱ ـ ایجاد تنش‌های پسماند با توجه به‌قیدهای موجود در مقابل تغییر شکل‌های حرارتی جوش و فلز جوش‌شده.

۲ ـ دشواری اجرای جوش درزها به‌صورت پیوسته و بی‌عیب.

۹ ـ ۴ ـ ۱ تسمه‌سازی

تسمه‌سازی فقط در مورد اعضای ساخته‌شده از ورق به‌کار می‌رود. از آنجایی که ورق به‌صورت رول برش نخورده و یا اغلب به‌طول ۶ متری برش‌خورده در بازار موجود می‌باشد و از طرفی اکثر دستگاه‌های برش گیوتین قابلیت برش ورق تا طول ۶ متر را دارا می‌باشند، جهت ساخت اعضای سازه نظیر ستون‌ها و یا حتی شاه‌تیرها که دارای طول بیش از ۶ متر می‌باشند تسمه‌سازی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

در تسمه‌سازی باید از تسمه ورق‌های صاف و بدون پیچیدگی و یا شمشیری استفاده شود. مونتاژ و یا سر هم کردن صحیح تسمه‌ها و رعایت محل قرارگیری بندهای جوش در قطعه نهایی از نکات بسیار مهم در کیفیت نهایی و کارآیی تیرورق‌ها می‌باشد.

در مرحلهٔ مونتاژ، تسمه‌ها روی یک شاسی مسطح در راستای یک سری صفحات عمودی کوچک (به‌صورت لچکی) که از قبل به‌صورت ریسمانی در یک راستا قرار گرفته‌اند ، قرار می‌گیرند و درز جوش‌ها هم‌راستا شده و با خال جوش و ناودان کنار جوش به‌هم متصل می‌شوند.

قطعاتی که با جوش شیاری به‌صورت لب به‌لب به‌یکدیگر متصل می‌شوند، باید هم‌باد یکدیگر قرار گرفته و به‌وسیلهٔ پیچ، گیره، گوه، قید و یا خال جوش تا اتمام جوشکاری در وضعیت خود تثبیت شوند. در صورت امکان استفاده از قید و قالب، توصیه می‌شود آزادی‌های مناسب برای جمع‌شدگی و تابیدگی وجود داشته باشد.

۹ ـ ۴ ـ ۱ ـ ۱ درزهای لب به‌لب

برحسب نوع آماده‌سازی لبه‌ها و درز حاصل، انواع مختلفی از جوش لب به‌لب به‌وجود می‌آید. درزهای لاله‌ای و نیم‌لاله‌ای (U ، J) کمترین مقدار فلز جوش را لازم دارند، اما در عین حال عملیات سنگ‌زنی و تراش برای آماده‌سازی لبه‌ها پُرکار و پُرهزینه است و امکان انجام آن در هر کارخانه‌ای وجود ندارد. وجود این مشکلات، طراح را به‌استفاده از درزهای جناغی (V) محدود می‌کند. در درز V ، با کاهش زاویه درز، مصرف فلز جوش کاهش می‌یابد. لیکن با کاهش این زاویه، دهانه ریشه باید به‌منظور دستیابی الکترود به‌داخل درز و ایجاد یک جوش سالم در ریشه درز، افزایش داده شود. بدیهی است برای حصول جوش اقتصادی، باید تعادلی بین زاویه پخی و دهانه ریشه به‌وجود آید. در ورق‌های ضخیم‌تر، درز با زاویه کوچکتر و ریشه بزرگتر، کمترین مقدار فلز جوش را لازم دارد.

چنانچه تسمه پشت‌بند مورد استفاده قرار گیرد، دست طراح در انتخاب دهانه ریشه باز خواهد بود، لیکن جوشکاری باید در یک سمت انجام گیرد، به‌عبارت دیگر یک درز V تنها خواهیم داشت. اما اگر تسمه پشت‌بند مورد استفاده قرار نگیرد، دهانه ریشه باید در حدود ۳ میلی‌متر باز نگه داشته شود. در این صورت جوش روی دهانه ریشه

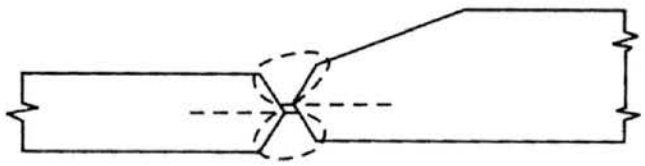
پل زده و پایین نمی‌ریزد. درز جناغی ممکن است به‌صورت یکطرفه (V) یا دوطرفه (X) باشد. در هر دو صورت، ریشه باید از سمت دیگر سنگ خورده و یک عبور جوش انجام شود. این امر سلامت درز جوش را تضمین می‌کند. در ورق‌های نازک، استفاده از جوش جناغی یکطرفه (V) کافی است، لیکن با افزایش ضخامت ورق، استفاده از درز جناغی دوطرفه ترجیح دارد. به‌خاطر داشته باشید که در درز V ، تغییرشکل زاویه‌ای بیشتر است و با افزایش ضخامت ورق، به‌سرعت افزایش می‌یابد.

۹ ـ ۴ ـ ۱ ـ ۲ هم‌راستا کردن ورق‌ها

هم‌راستا کردن جهت افزایش و بهبود عملیات جوشکاری ضروری است. قرارگیری درزهای لب به‌لب جان و بال در یک صفحه، تا حد زیادی هم‌راستا کردن ورق بال و جان را ساده می‌نماید.

شکل ۹ ـ ۸ یک درز لب به‌لب x غیر هم‌راستا را در بال یک شاهتیر، در نقطه تغییر مقطع نشان می‌دهد. این عدم هم‌راستایی، حصول یک ریشه سالم و جوش بی‌عیب را مشکل می‌نماید.

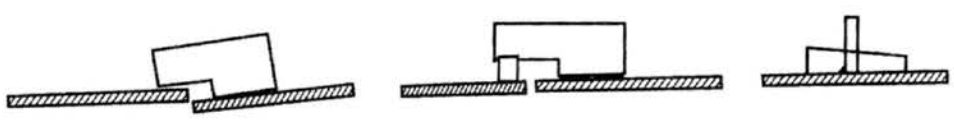
حتی در صورت هم‌راستایی کامل در ورق جان، ورق بال می‌تواند تحت غیر هم‌راستایی قرار گیرد. کج شدن ناگهانی بال‌ها در خلال ساخت، عدم دقت در جابه‌جایی به‌محل اجرا، یا حتی یک اختلاف در هلالی شدن در بال می‌تواند چنین شرایطی را ایجاد کند. مشکل هلالی شدن، با اندازه جوش گوشه جان به‌بال، افزایش پیدا کرده و با زیاد شدن ضخامت بال تیر کاهش می‌یابد.



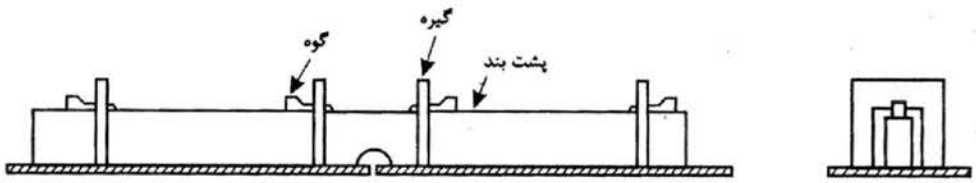
شکل ۹ ـ ۸ هم‌راستا کردن ورق‌ها.

روش‌های مختلفی برای تصحیح این شرایط وجود دارد که شکل ۹ ـ ۹ یکی از این روش‌ها را نشان می‌دهد. زمانی که ورق‌ها زیاد ضخیم نیستند، می‌توان گیره‌های کوچکی به‌انتهای یکی از ورق‌ها جوش داد. راندن یک گوه فولادی بین هر گیره و ورق دیگر، لبه‌ها را هم‌راستا می‌نماید. جوش دادن گیره‌ها در یک سمت، تا حد زیادی برداشتن آنها را تسهیل می‌کند.

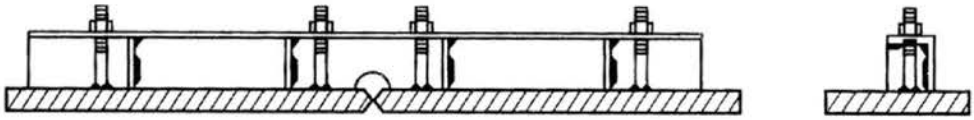
شکل ۹ ـ ۱۰ هم روش دیگری را که معمولاً در مورد بال‌های ضخیم‌تر، مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد.



شکل ۹ ـ ۹ گیره فقط در طول یک لبه جوش می‌شود، بنابراین می‌تواند به‌راحتی با یک چکش برداشته شود. گوه فولادی به‌منظور قرار دادن لبه‌های ورق در یک ردیف به‌زیر گیره رانده می‌شود.



استفاده از پشت بند و گیره و گوه برای هم راستایی ورق ها



استفاده از پشت بند و پیچ و مهره برای هم راستایی ورق ها

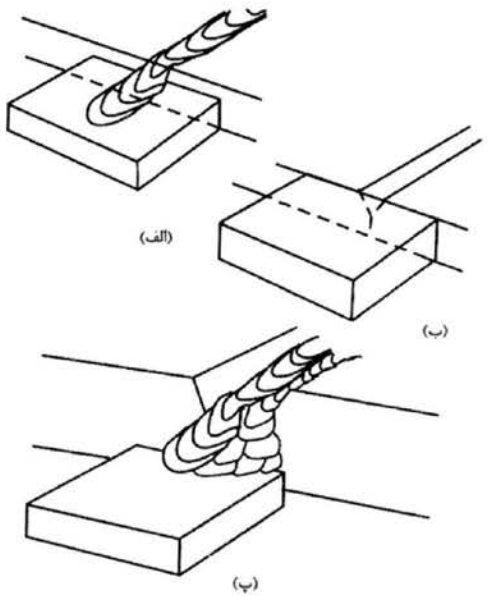
شکل ۹ ـ ۱۰

۹ ـ ۴ ـ ۱ ـ ۳ ریزش انتهای جوش

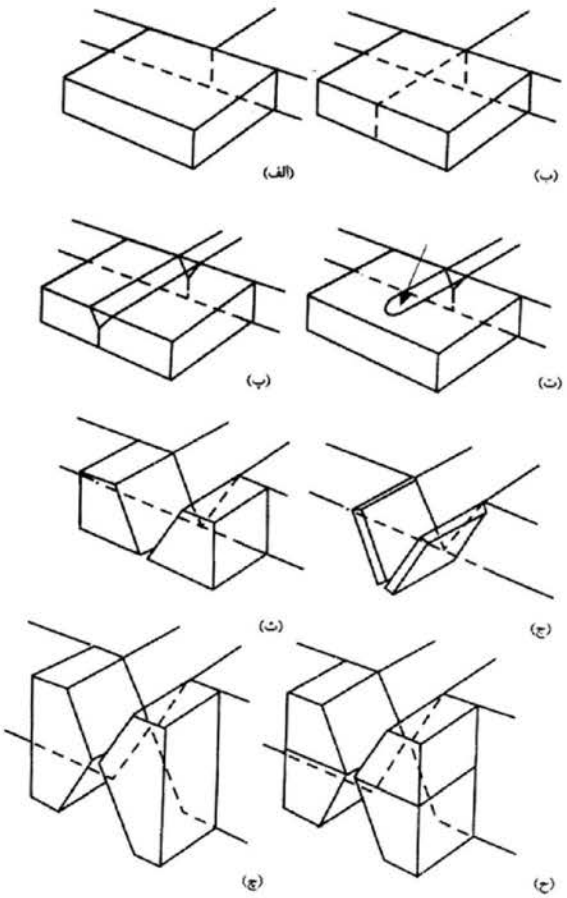
به‌علت ریزش مواد مذاب جوش، انتهای جوش درزهای لب به‌لب به‌صورت تمام ضخامت در نمی‌آید.

برای رفع این عیب، غالباً در انتهای درز، به‌کمک تسمه، اضافه‌طولی برای درز ایجاد می‌شود که بعد از اتمام عملیات جوشکاری، این قطعه سنگ زده می‌شود (شکل‌های ۹ ـ ۱۱ و ۹ ـ ۱۲). تعبیه این جزییات در درزهای بال بسیار مهمتر می‌باشد. به‌این اضافه‌طول، ناودان گویند.

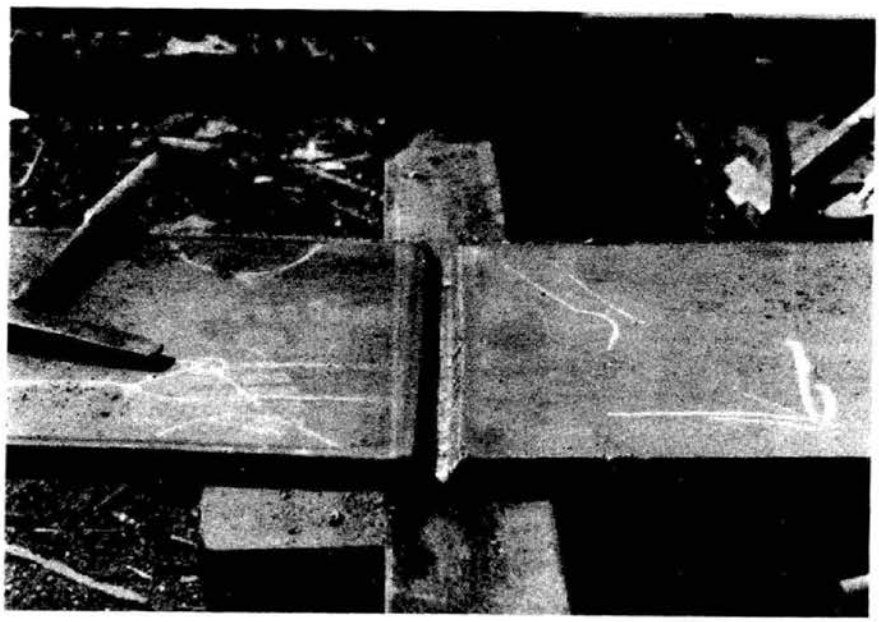
در شکل‌های ۹ ـ ۱۳ و ۹ ـ ۱۴ تصاویری از اجرای درزهای لب به‌لب نشان داده شده است.



شکل ۹ ـ ۱۱ نصب ناودان در ابتدا و انتهای درز.



شکل ۹ ـ ۱۲ تعبیه ناودان.



شکل ۹ ـ ۱۳ سرهم کردن ورق‌ها و انجام پاس ریشه.

شکل ۹ ـ ۱۴ تکمیل جوش شیاری و ناودان انتهایی.

۹ ـ ۴ ـ ۲ مونتاژ ورق‌های بال و جان مقاطع I شکل

در ساخت تمام‌خودکار، ابتدا ورق بال و جان با خال‌جوش به‌هم متصل شده و سپس توسط جوش زیرپودری نوار جوش کامل می‌شود. تیرورق‌ها را می‌توان به‌وسیله یکی از روش‌های زیر مونتاژ نمود:

۱ ـ نخست یک بال بر روی زمین به‌صورت تخت قرار داده شده و محور آن توسط گچ علامت زده می‌شود. در این حالت گیره‌های قائم کوچکی در فواصل مشخصی نسبت به‌یکدیگر در طول بال، در نزدیکی خط میانی آن خال جوش می‌شوند (شکل ۹ ـ ۱۵). سپس جان تیرورق به‌صورت قائم بر روی بال قرار گرفته و به‌طور موقت با قطعات مهاری موقت که بین جان و بال جوش شده‌اند، نگه داشته می‌شود. گیره‌ها در طول بال، موقعیت جان را در طول خط میانی بال حفظ می‌کنند. حال می‌توان ورق بال فوقانی را در بالای جان نصب و خال‌جوش کرد. این روش در مورد تیرهای مستقیم با ارتفاع کم و متوسط به‌کار می‌رود.

می‌توان تیرورق را با خواباندن ورق جان بر روی قالب در موقعیت افقی مونتاژ نمود (شکل ۹ ـ ۱۶).

در این روش بعد از خواباندن جان بر روی قالب، ورق‌های بال در موقعیت خودشان قرار گرفته و با وسایلی نظیر گوه[1]، پیچ[2]، جک[3] و یا در بعضی شرایط هوای فشرده، به‌دو لبه جان محکم می‌شوند.

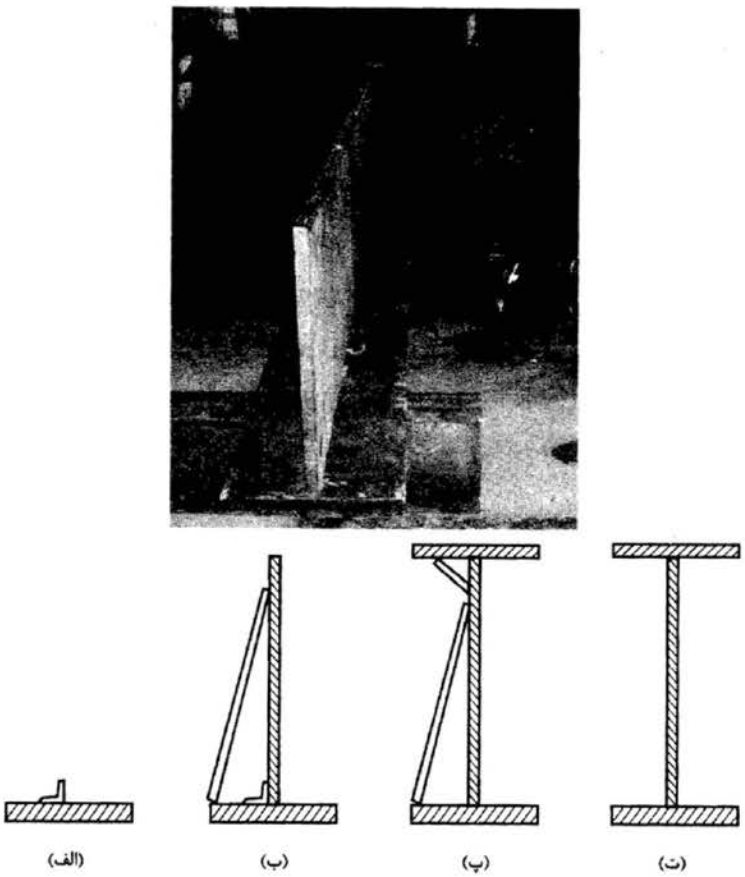
قالب به‌صورت خودکار، بال را در موقعیت مشخص به‌صورت قائم نگه می‌دارد.

---

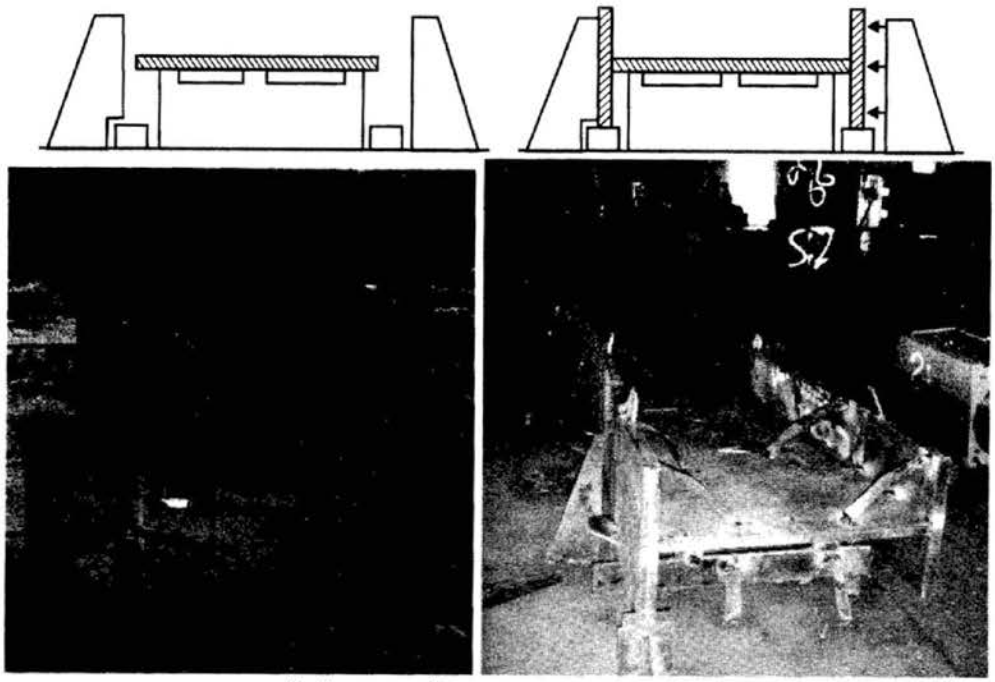
1. Wedges

2. Screws

3. Jacks



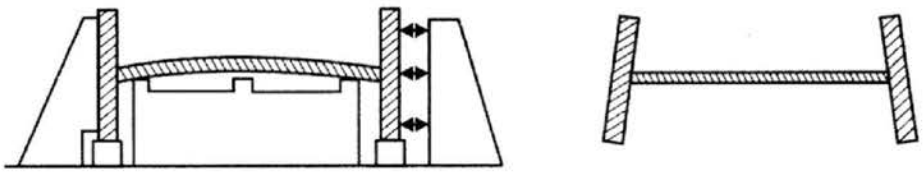
شکل ۹ ـ ۱۵ مراحل مونتاژ و جوشکاری ورق جان و بال تیرورق به روش جان قائم.



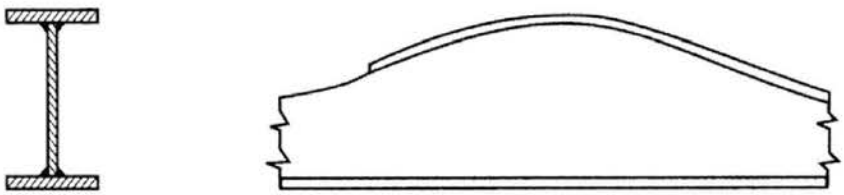
شکل ۹ ـ ۱۶ مونتاژ تیرورق در قالب به‌روش بال قائم.

اگر جان لاغر و یا عمیق (با ارتفاع زیاد) باشد، باید احتیاط کرد که فشار زیادی بر روی بال‌ها وارد نشود، چرا که می‌تواند باعث کمانه کردن جان به‌سمت بالا شود (شکل ۹ ـ ۱۷). از آنجایی که بال‌ها به‌صورت قائم بر روی پایه نگه داشته می‌شوند، زمانی که فشار از روی آنها برداشته شده و جان به‌صورت اولیه درمی‌آید، امکان دارد که بال‌ها بچرخند و دیگر نسبت به‌هم موازی نباشند.

تیرهای ماهیچه‌ای به‌شکل شکم ماهی[4]، معمولاً با خواباندن جان به‌صورت افقی مشابه روش بال قائم مونتاژ می‌شوند. اما در عین حال برخی از این‌گونه تیرها که زیاد عمیق نیستند، به‌روش جان قائم مونتاژ می‌شوند (شکل ۹ ـ ۱۸). در این روش بال مستقیم فوقانی روی قالب قرار داده شده، و جان به‌صورت قائم در موقعیت خود قرار می‌گیرد، در این حالت بال تحتانی، روی قسمت فوقانی قرار داده شده و با کمی فشار و یا حرارت در مقابل لبه منحنی جان محکم می‌شود.



شکل ۹ ـ ۱۷



شکل ۹ ـ ۱۸

۹ ـ ۴ ـ ۳ مونتاژ مقاطع جعبه‌ای

ستون‌های جعبه‌ای داری دو بال و دو جان می‌باشند و در اکثر سازه‌های ساختمانی با اسکلت فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به‌عدم امکان دسترسی به‌داخل ستون پس از بسته شدن آن و در نتیجه عدم امکان جوشکاری سخت‌کننده‌های داخلی آن در مرحله مونتاژ اولیه، یک وجه از چهار وجه ستون نباید مونتاژ شود.

ترتیب کار به‌این شکل است که مطابق مونتاژ I شکل ابتدا یک قالب یا فیکسچر مناسب در روی یک شاسی ساخته می‌شود. در اینجا مونتاژ بر روی یک بال انجام می‌شود، و دو جان ستون مطابق نقشه‌های کارگاهی با رعایت فاصله آنها از لبه بال، روی بال زیرین مونتاژ می‌شوند. (شکل ۹ ـ ۱۹)

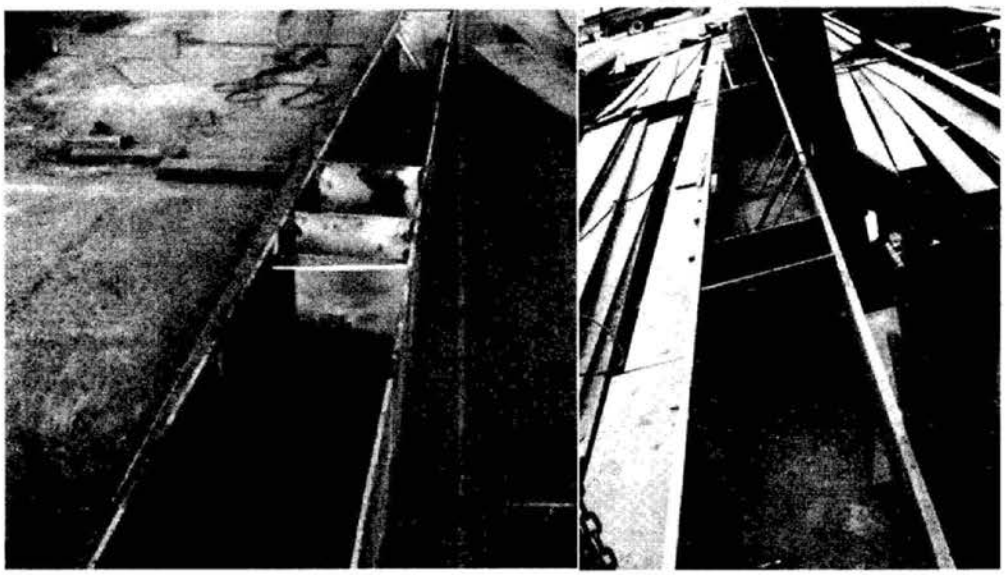
جهت مونتاژ دو وجه جان روی بال زیرین، ابتدا تعدادی ورق‌های کوچک که به‌صورت گونیا بریده شده‌اند از داخل، روی بال، خال جوش می‌شوند به‌نحوی که دو ورق جان پس از چسبیدن به‌آنها در محل نهایی خود قرار گرفته

4. *Haunched or fish belly girders*

باشد. لازم به‌ذکر است این ورق‌های کوچک پس از تکمیل مونتاژ ورق‌های جان برداشته شده و جهت ساخت ستون‌های بعدی به‌کار می‌روند. پس از مونتاژ ورق‌های جان روی بال، باید این ورق‌ها روی بال گونیا شوند که این امر توسط مونتاژ کار به‌وسیله ابزار مناسب نظیر گوه، پتک آهنگری و گونیا انجام می‌شود.

ورق‌های سخت‌کننده نیز در این مرحله مطابق نقشه‌های کارگاهی در داخل ستون جعبه‌ای (که اکنون به‌صورت یک مقطع U شکل می‌باشد) مونتاژ می‌شود. این کار با رعایت اضافه طول مناسب جهت جمع‌شدگی پس از جوشکاری، که متناسب با ضخامت ورق و اندازه جوش بال به‌جان می‌باشد، صورت می‌گیرد.

در ستون‌های جعبه‌ای در حالت U شکل، جهت جلوگیری از تغییر شکل و ناگونیایی جان و بال نسبت به‌هم از میله‌های مهاری در سرتاسر طول ستون استفاده می‌شود. این کار از ناحیه داخل ستون به‌صورتی انجام می‌شود که دو جان نسبت به‌هم و نسبت به‌بال ستون مهارشده باشد.



شکل ۹ ـ ۱۹ مونتاژ اولیه ستون جعبه‌ای.

مونتاژ وجه چهارم ستون‌های جعبه‌ای

پس از تکمیل جوش سخت‌کننده‌های داخل ستون‌های جعبه‌ای، نوبت مونتاژ وجه چهارم این ستون‌ها می‌رسد.

قبل از مونتاژ وجه چهارم باید کلیه جوش‌های داخل ستون مورد بازرسی و تأیید مهندس ناظر یا بازرس جوش ساختمان قرار گرفته و پس از تأیید، مونتاژ وجه چهارم مجاز می‌باشد.

تاب‌گیری و صاف کردن ورق وجه چهارم قبل از مونتاژ الزامی می‌باشد. مونتاژ وجه چهارم در این نوع ستون‌ها عموماً به‌یکی از دو روش زیر انجام می‌شود:

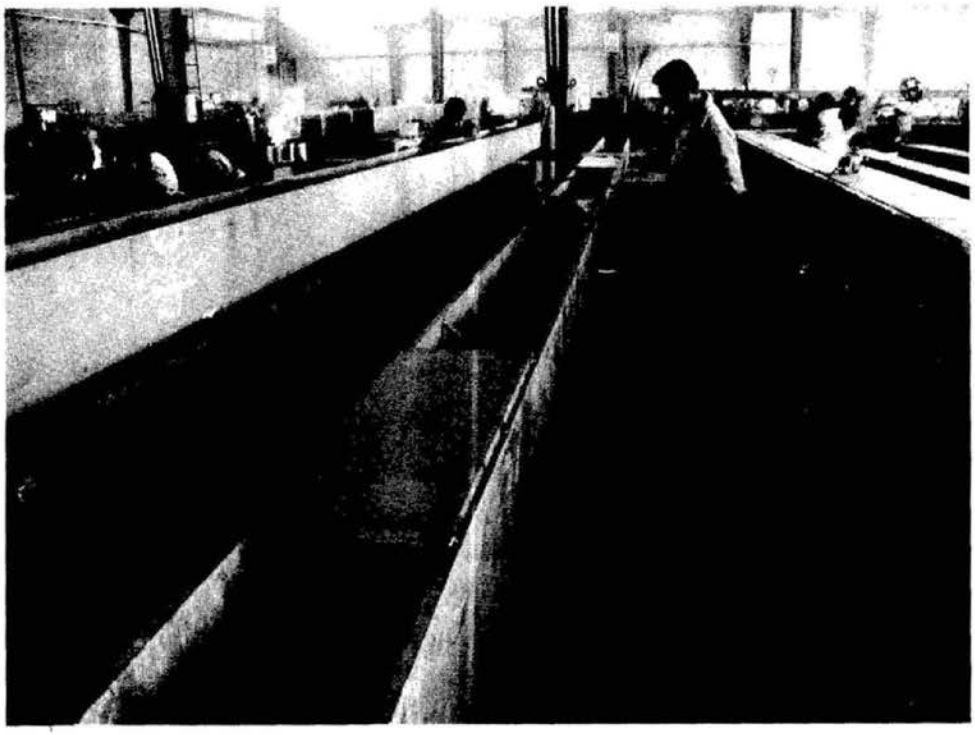
۱ ـ ورق وجه چهارم به‌صورت کامل بندزنی و جوش شده و جهت اتصال به سخت‌کننده‌های داخلی از جوش کام استفاده می‌شود.

در این روش محل قرارگیری سخت‌کننده‌ها در زیر وجه چهارم توسط مونتاژ کار مربوطه با دقت اندازه‌گیری شده و روی ورق خط کشی می‌شود. ابعاد و شکل درز جوش کام مطابق نقشه‌ها و آیین‌نامه می‌باشد. (شکل ۹ ـ ۲۰)

کلیه برش‌ها باید توسط برش خودکار و با دقت انجام شود.

وجه چهارم باید به‌طور کامل به‌لبه‌های جان چسبیده و نسبت به‌آنها گونیا باشد. می‌توان با استفاده از یک قطعهٔ U شکل و گوه، وجه چهارم را تا حد ممکن به‌لبه‌های جان ستون چسباند. در صورتی که لبه‌های درز جوش کام، نیاز به‌سنگ‌زنی داشته باشد، باید قبل از مونتاژ کامل، عملیات سنگ‌زنی و آماده‌سازی لبه روی آن انجام شود.

۲ ـ وجه چهارم ستون به‌صورت تکه تکه در حدفاصل میان ترازهای ستون روی U مونتاژ شده به‌نحوی‌که ورق‌های سخت‌کننده را بتوان به‌آن از داخل جوشکاری نمود (شکل ۹ ـ ۲۰). عموماً این روش در مورد مقاطع بزرگ کاربرد دارد. اتصال ورق‌های بال به‌هم نیز به‌صورت شیاری با ورق پشت‌بند انجام می‌شود. کلیه موارد در خصوص گونیا بودن این وجه نسبت به‌ستون که در روش اول گفته شد در این موارد نیز صادق می‌باشد.



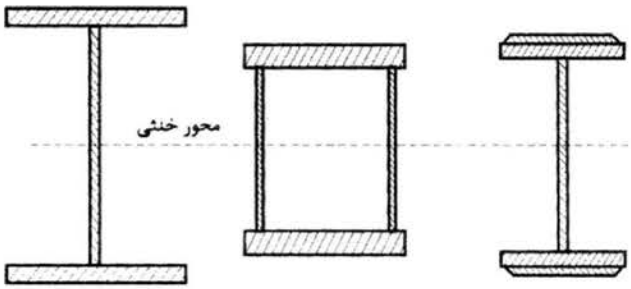
شکل ۹ ـ ۲۰ نصب وجه چهارم روی ستون جعبه‌ای.

۹ ـ ۴ ـ ۴ جوشکاری بال و جان

چنانچه تیرورق‌ها، تیرجعبه‌ها و یا ورق‌های تقویتی[5]، متقارن باشند، چهار نوار جوش به‌خوبی در حول محور خنثای مقطع متعادل می‌شوند و در نتیجه انحنای حاصل از جوشکاری بسیار کم خواهد بود (شکل ۹ ـ ۲۱). ترتیب و توالی جوشکاری خودکار جهت انجام چهار نوار جوش، می‌تواند بدون تأثیر عمده‌ای در تغییرشکل متفاوت باشد.

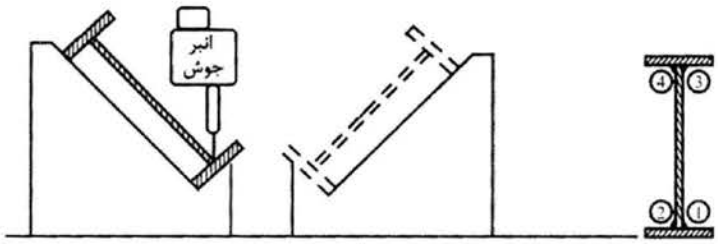
در بیشتر حالات، توالی و ترتیب جوشکاری، تابعی از نوع قالب به‌کار رفته و روش حرکت تیر از یک موقعیت جوشکاری به‌موقعیت دیگر در کارگاه می‌باشد.

5. *Cover Plates*

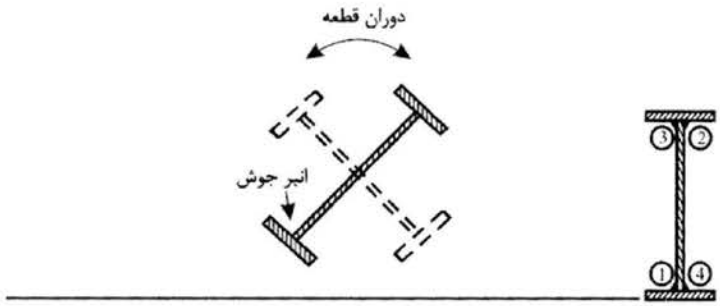


شکل ۹ ـ ۲۱

در شکل ۹ ـ ۲۲ ـ الف، دستگاه مونتاژ دارای دو پایه برای حفظ ورق‌های مونتاژشده تحت دو زاویه مخالف می‌باشد. وضعیت قرارگیری طوری است که جوش بال به‌جان در وضعیت تخت انجام می‌شود. از آنجایی که برگرداندن کامل تیر، مشکل و وقت‌گیر است، لذا توالی و ترتیب جوش‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شود که تعداد برگرداندن آن تا حد امکان کاهش یابد.



شکل ۹ ـ ۲۲ ـ الف ترتیب جوشکاری طولی تیر ورق.



شکل ۹ ـ ۲۲ ـ ب ترتیب جوشکاری طولی تیر ورق.

در شکل ۹ ـ ۲۲ ـ الف مجموعه تیر مونتاژشده، نخست بر روی پایه چپ قرار گرفته و جوش ۱ اجرا می‌شود. ساده‌ترین گام بعدی برداشتن تیر با جرثقیل قلاب‌شده به‌بال فوقانی و خواباندن آن بر روی پایه سمت می‌باشد. در این مرحله جوش ۲ بر روی همان بال اما در سمت دیگر جان انجام می‌شود. حالا تیر برداشته‌شده و بر روی زمین قرار گرفته و پس از سر و ته شدن، برای اجرای جوش ۳ در موقعیت تخت، بر روی یکی از پایه‌ها قرار داده می‌شود. بالاخره

تیر برداشته شده و برای آنکه جوش ۴ انجام شود بر روی پایه دیگر خوابانده می‌شود.

در شکل ۹ ـ ۲۲ ـ ب از یک قالب چرخان برای اجرای جوش بال به‌جان استفاده شده است. بعد از اینکه جوش ۱ کامل شد، تیر دوران یافته و جوش ۲ انجام می‌شود. حال باید سر دستگاه جوش به‌عقب و به‌سمت دیگر جان تیر برگشته و جوش ۳ را اجرا کند، در نهایت دوباره تیر دوران یافته و جوش ۴ انجام می‌گردد.

ترتیب‌های مختلف عبور جوش که در بالا بیان شد، بستگی کامل به‌قالب، روش به‌کار رفته و ترجیحاً مقدار تأثیر آن بر تغییرشکل دارد.

۹ ـ ۴ ـ ۵ تحدب بال و سخت‌کننده‌های عرضی

معمولاً بعد از تکمیل نوارهای جوش بال به‌جان، سخت‌کننده‌های عرضی مونتاژشده و به‌تیر جوش می‌شوند (شکل ۹ ـ ۲۳).

اگر ورق بال لاغر و عریض باشد، امکان ایجاد پدیده تحدب یا هلالی شدن در ورق بال در حین اجرای جوش بال به‌جان وجود دارد. در صورت وقوع چنین پدیده‌ای قبل از قرار دادن سخت‌کننده، ورق بال را باید با فشار به‌وضعیت اولیه درآورد.

رابطهٔ زیر، مقدار تحدب بال‌ها را به‌صورت تخمینی نشان می‌دهد (شکل ۹ ـ ۲۴ ـ الف).

$$\Delta = \frac{0.5W(0.38\ D^{1.3})}{t^2} \qquad (۹ ـ ۱)$$

شکل ۹ ـ ۲۳

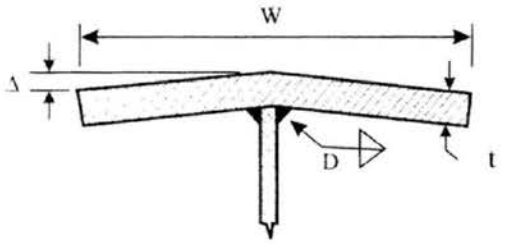
که در آن:

D = اندازه ساق‌جوش برحسب میلی‌متر

W = عرض ورق به‌میلی‌متر

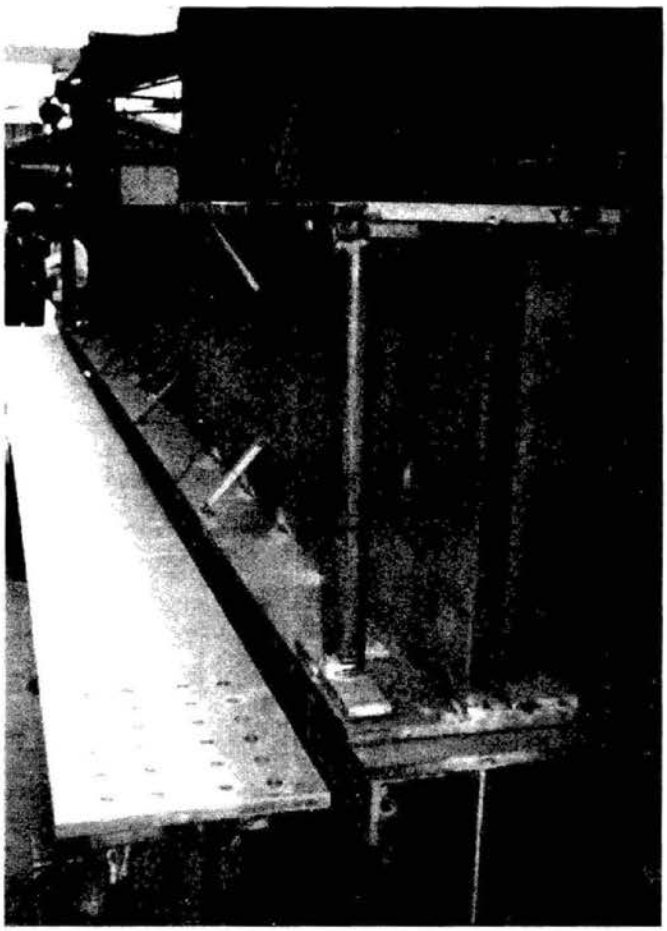
t = ضخامت بال به‌میلی‌متر

Δ = انحراف نوک بال از وضعیت اولیه به‌میلی‌متر



شکل ۹ ـ ۲۴ ـ الف

در شکل ۹ ـ ۲۴ ـ ب روش جلوگیری از تحدب بال نشان داده شده است.



شکل ۹ ـ ۲۴ ـ ب روش‌های جلوگیری از تحدب بال.

آیین‌نامه‌ها، بخصوص آیین‌نامه‌های طراحی پل، اجازه جوش سخت‌کننده به‌بال کششی را نمی‌دهند. از طرفی فاصله بین سخت‌کننده و بال کششی، می‌تواند نقطه‌ای برای شروع خوردگی در فولاد باشد. لذا باید به‌طریقی سخت‌کننده به‌بال کششی جفت شود. برای رسیدن به‌این هدف، روش زیر می‌تواند به‌کار گرفته شود:

۱ ـ لزومی ندارد که سخت‌کننده به‌صورت کاملاً جذب بریده شود و می‌تواند مقداری لقی در حد فاصل دوبال داشته باشد.

۲ ـ سخت‌کننده را محکم در مقابل بال کششی فشار دهید.

۳ ـ سخت‌کننده را به‌جان تیر جوش دهید.

۴ ـ در نهایت سخت‌کننده را به‌بال فشاری جوش دهید.

در صورت عدم نگرانی از خوردگی، لزومی به‌جفت کردن محکم سخت‌کننده‌ها به‌بال کششی نمی‌باشد، بلکه سخت‌کننده در حدود ۲/۵ سانتی‌متر، کوتاهتر بریده شده و با فشار به‌بال فشاری، به‌جان جوش داده می‌شود. در حالتی که فقط یک سخت‌کننده در یک طرف جان به‌کار می‌رود، لازم است سخت‌کننده به‌بال فشاری هم جوش شود.

در صورت عدم استفاده از جوش خودکار، سخت‌کننده‌های عرضی را قبل از جوشکاری بال به‌جان، در جای خود قرار می‌دهند. از آنجایی که بال‌های جوش نشده کاملاً مسطح هستند (تغییرشکل نداده‌اند)، این عمل به‌راحتی انجام می‌شود. در این حال جوش بال و جان در حد فاصل دو سخت‌کننده به‌روش دستی یا نیمه‌خودکار انجام می‌شود. گوشه‌های سخت‌کننده‌ها جهت پیوستگی نوار جوش بال به‌جان، به‌صورت ۴۵ درجه بریده می‌شوند.

۹ ـ ۴ ـ ۶ ساخت ستون مرکب با مقاطع نوردشده و ورق

ستون‌ها ممکن است برحسب نیاز از اتصال انواع پروفیل‌های مختلف ساخته شوند که رایج‌ترین آنها عبارتند از :

الف) اتصال دو پروفیل به‌یکدیگر به‌طریقه جفت کردن

ب) اتصال دو پروفیل با یک ورق سراسری روی بال‌ها

پ) اتصال دو پروفیل با قیدهای موازی و یا مورب (ستون مشبک)

۹ ـ ۴ ـ ۶ ـ ۱ روش ساخت ستون جفت

ابتدا دو تیرآهن در کنار یکدیگر و بر روی سطح شاسی کار (شکل ۹ ـ ۲۵) با خال جوش به‌هم متصل می‌شوند؛ سپس دو سر و وسط ستون جوش شده و سپس برگردانده شده و مانند قبل جوشکاری می‌شود. در ادامه قسمت‌های باقی‌مانده جوشکاری می‌شود؛ همین کار در سوی دیگر ستون انجام می‌شود و جوشکاری ادامه می‌یابد تا جوش مورد نیاز ستون تأمین گردد. این شیوه جوشکاری برای جلوگیری از پیچش ستون در اثر حرارت زیاد در حین جوشکاری ممتد می‌باشد. در صورتی که در سرتاسر ستون به‌جوشکاری نیازی نباشد، حداقل طول جوش‌های منقطع باید مطابق شکل ۹ ـ ۲۶ و دستورات زیر اجرا گردد:

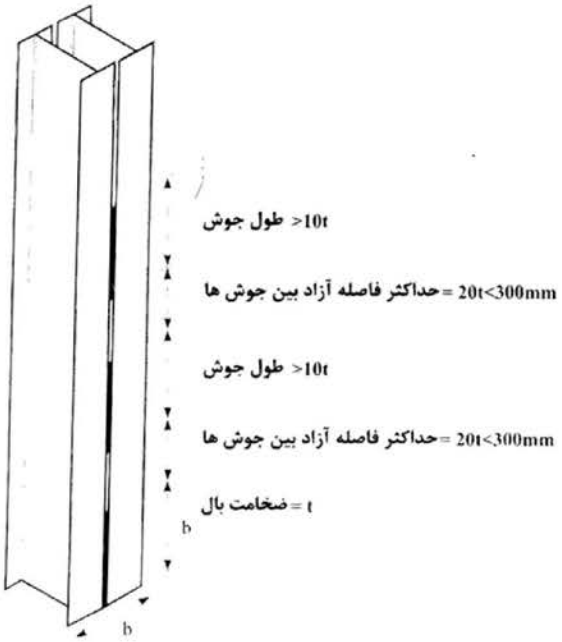
الف) حداکثر فاصله آزاد جوش منقطع نباید از ۲۰ t یا ۳۰ سانتی‌متر تجاوز کند.

ب) طول جوش ابتدایی و انتهایی ستون باید حداقل برابر با بزرگترین عرض مقطع باشد و به‌طور یکسره انجام شود.

ج) طول مؤثر هر قطعه از جوش منقطع نباید از ۱۰ برابر ضخامت بال یا حداقل ۱۰۰ میلی‌متر کمتر باشد.

د) فاصلهٔ میان لبه بال دو پروفیل نباید از یک شکاف ۱/۵ میلی‌متر تجاوز کند.

شکل ۹ ـ ۲۵ جوشکاری ستون جفت روی شاسی کار.



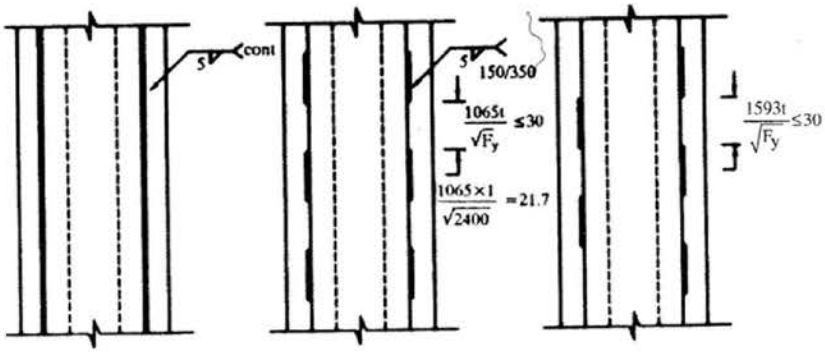
شکل ۹ ـ ۲۶ ستون با پروفیل جفت.

۹ ـ ۴ ـ ۶ ـ ۲ روش ساخت ستون دوبل با ورق سراسری

جوش ورق تقویتی به‌نیمرخ‌ها

برای جوش ورق تقویتی می‌توان از یکی از سه طرح شکل ۹ ـ ۲۷ استفاده نمود.

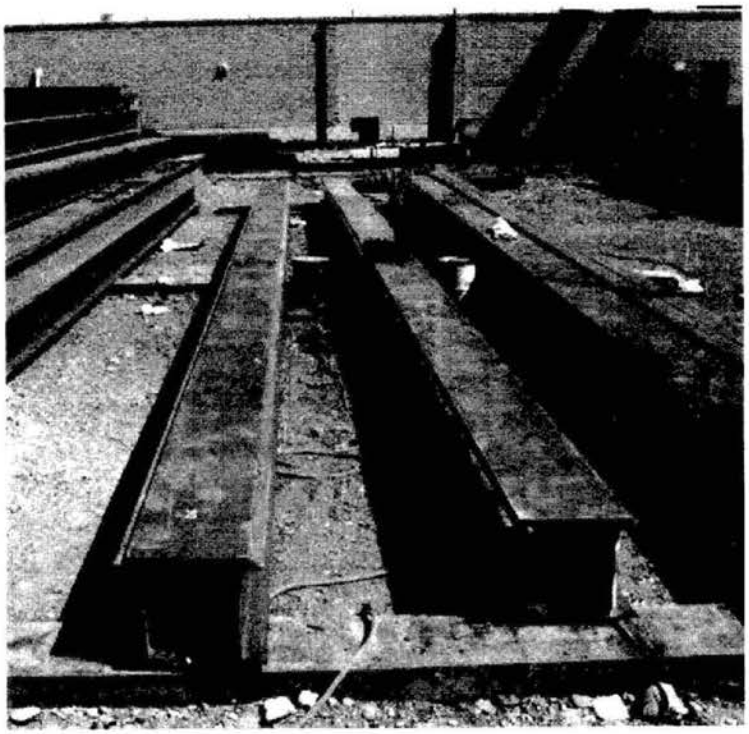
جهت ساخت این ستون‌ها، مطابق ستون‌های جفت، ابتدا مونتاژ دو تیرآهن در کنار هم روی یک شاسی مناسب و با رعایت رواداری‌های مجاز انجام شده و سپس ورق‌های سراسری به‌صورت پوششی که از قبل به‌روش‌های مناسب برشکاری شده، روی ستون جفت‌شده، نصب و خال جوش می‌شود.



شکل ۹ ـ ۲۷ انواع جوش ورق روی نیمرخ‌ها.

جهت جلوگیری از پیچش ستون نیز باید ترتیب جوشکاری مطابق بخش ۹ ـ ۴ ـ ۶ ـ ۱ انجام شود.

در ستون‌های جفت با ورق سراسری، فاصله جوش‌های منقطع (غیرممتد) که ورق را به‌نیمرخ‌ها متصل می‌کند نباید از ۳۰ سانتی‌متر بیشتر شود. حداکثر فاصله فوق‌الذکر در مورد فولاد معمولی ۲۲t می‌باشد. (ضخامت ورق تقویت =t

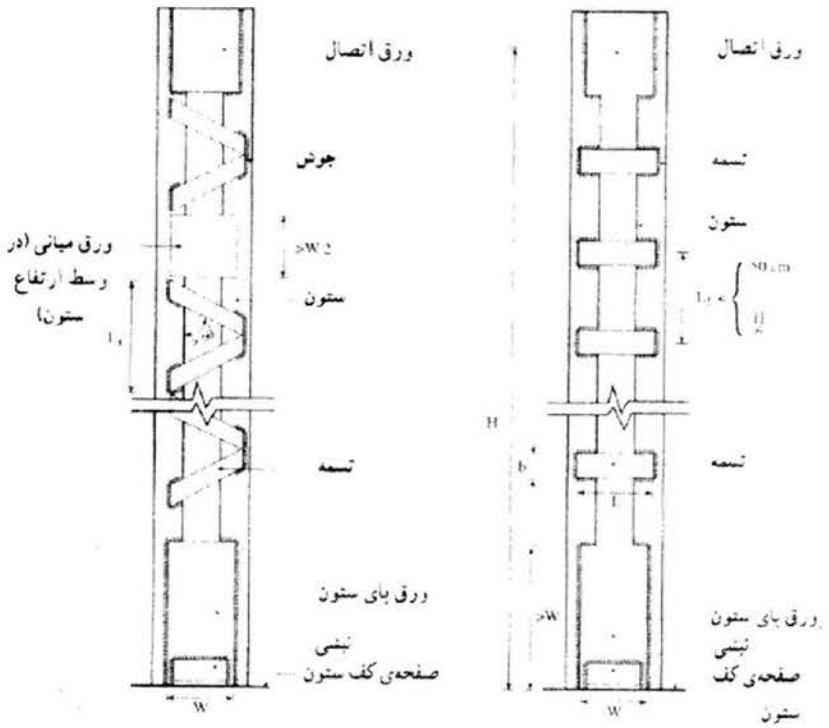


شکل ۹ ـ ۲۸ ستون دوبل با ورق تقویتی یکسره.

۹ ـ ۴ ـ ۶ ـ ۳ روش ساخت ستون مرکب با بست‌های موازی (ستون دوبل پاباز)

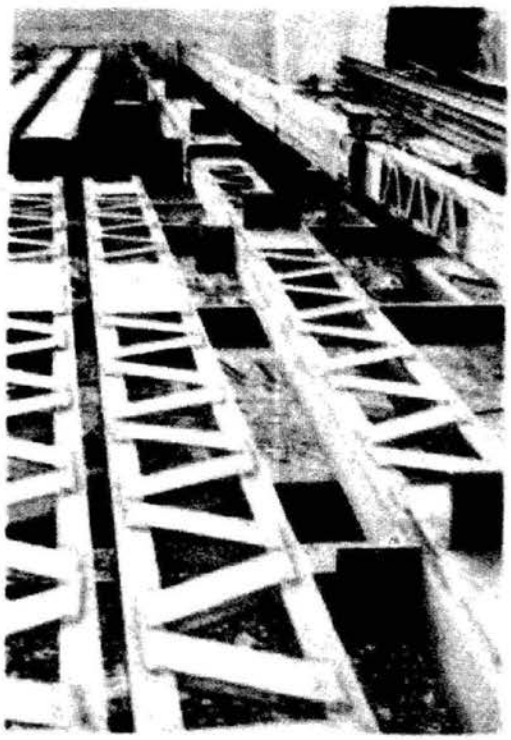
متداول‌ترین نوع ستون در ایران ستون‌های مرکبی است که دو تیرآهن در کنار هم قرار گرفته و قیدهای افقی یا چپ و راست، این نیمرخ‌ها را به‌هم متصل می‌کند. البته بست‌های چپ و راست که شکل‌های مثلثی را به‌وجود می‌آورند،

شکل ۹ ـ ۲۹ ستون مشبک با قیدهای موازی.

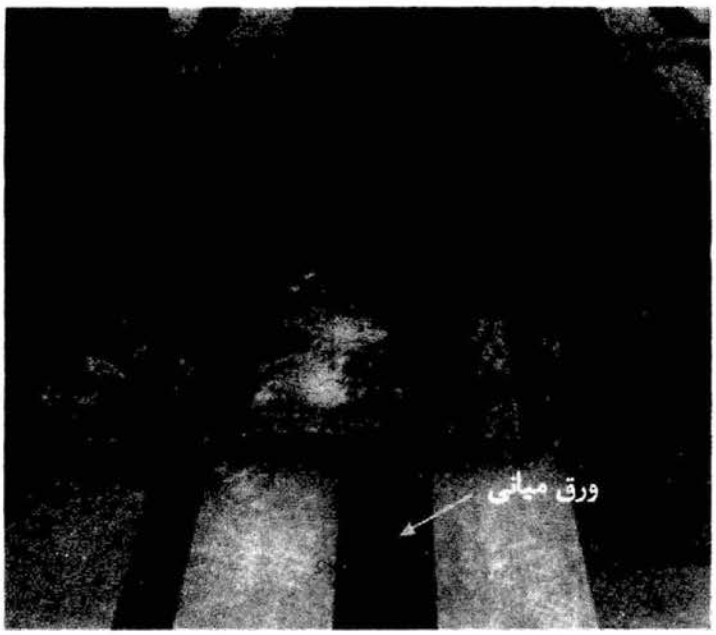


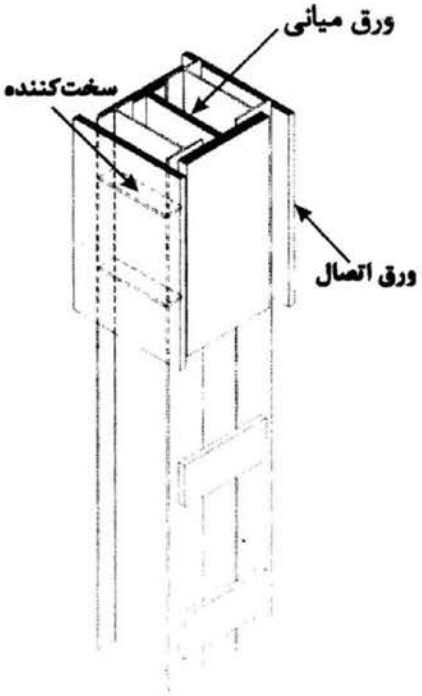
الف ـ ستون مشبک با بست موازی ب ـ ستون مشبک با بست مورب

شکل ۹ ـ ۳۰ جزییات ستون مشبک با بست موازی و مورب.



شکل ۹ ـ ۳۱ ساخت ستون‌های دوبل پاباز با قید موازی و مورب.





شکل ۹ ـ ۳۲ جزییات ورق اتصالی در قاب‌های خمشی.

دارای مقاومت بهتری نسبت به‌بست‌های موازی می‌باشند. در مورد این‌گونه ستون‌ها، به‌ویژه ستون با بست موازی نکات زیر باید رعایت گردد (شکل ۹ ـ ۲۹ تا ۹ ـ ۳۱):

الف) حداقل ابعاد بست یا تسمه افقی ستون باید به‌این صورت باشد:

L= طول وصله حداقل معادل فاصله مرکز تا مرکز دو نیمرخ باشد.

b= عرض تسمه از ۴۲ درصد طول کمتر نباشد.

t= ضخامت تسمه از $\frac{۱}{۳۵}$ طول کمتر نباشد.

ب) در اطراف کلیه تسمه‌ها و در سطح تماس با بال نیمرخ‌ها، عمل جوشکاری انجام شود (مجموع طول خط جوش در هر طرف صفحه نباید از طول صفحه کمتر شود).

پ) فاصله قیدها و ابعاد آن براساس محاسبات فنی تعیین می‌شود.

ت) در قسمت انتهایی ستون، باید حتماً از ورقی با طول حداقل برابر با عرض ستون استفاده کرد تا علاوه بر تقویت پایه، محل مناسبی برای اتصال بادبندهای فلزی به‌ستون به‌وجود آید.

ث) در محل اتصال تیر به‌ستون لازم است قبلاً ورق تقویتی به‌ابعاد کافی روی بال‌های ستون جوش‌شده باشد.

۹ ـ ۴ ـ ۶ ـ ۴ جزییات ساخت ستون در محل اتصال خمشی تیر به‌ستون

در اتصالات خمشی یا گیردار در محل اتصال تیر به‌ستون از یک ورق میانی بین ورق‌های تقویتی روی بال ستون استفاده می‌شود. در مرحله ساخت ستون ، پس از مونتاژ دو تیرآهن در فاصله مورد نظر و خال جوش کردن قیدها یا ورق پوششی سراسری روی بال ستون، در محل تراز سقف‌ها از یک ورق میانی بین دو ورق وصله روی بال ستون استفاده می‌شود. همچنین در جان ستون نیز قبل از نصب ورق وصله در امتداد بال شاه‌تیرها، دو ورق سخت‌کننده مونتاژ و جوش می‌شود. (شکل ۹ ـ ۳۲).

۹ ـ ۴ ـ ۷ ساخت ستون‌های صلیبی شکل

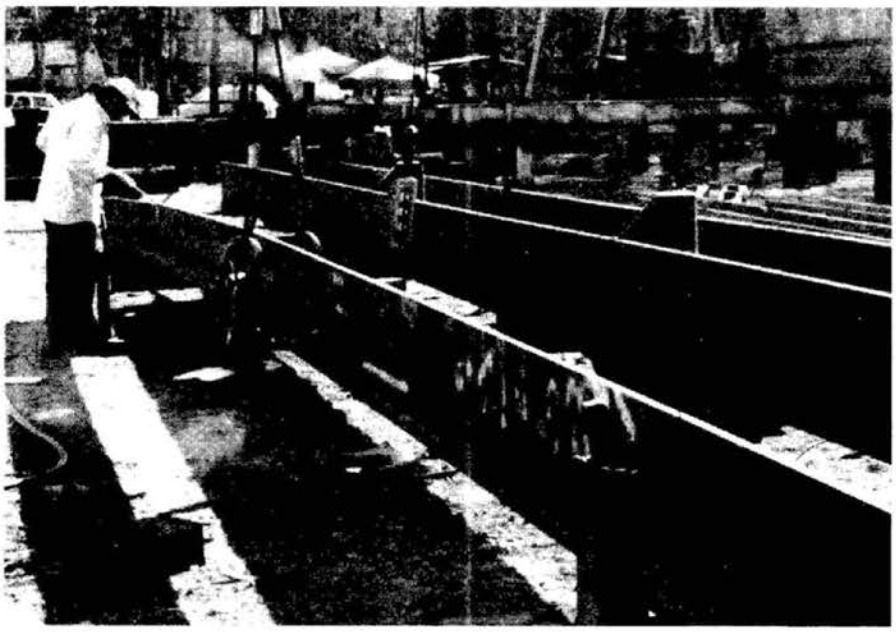
ستون‌های صلیبی شکل شامل مقطع H اصلی و دو مقطع T فرعی می‌باشند که روش ساخت هر یک از آنها مطابق مطالب گفته شده در بخش ۹ ـ ۴ ـ ۲ می‌باشد. در خیلی موارد، قطعات T از نصف کردن قطعهٔ H به‌دست می‌آید.

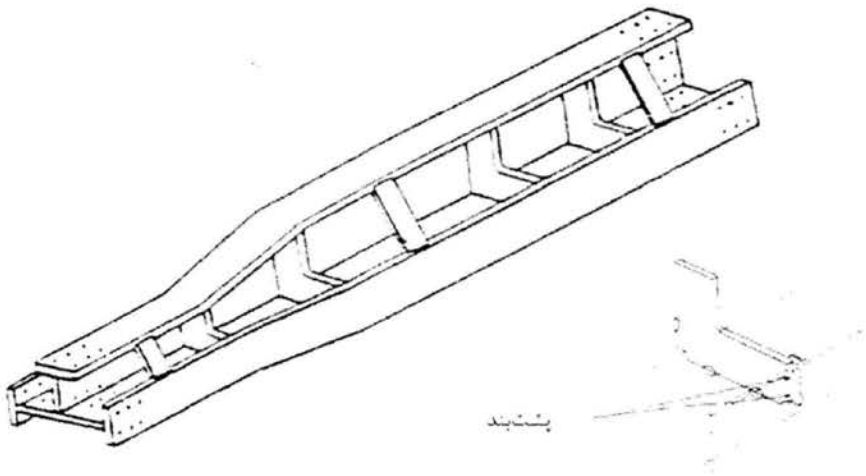
در خصوص ستون‌های صلیبی‌شکل، مونتاژ وجوه سوم و چهارم (که از قبل به‌صورت T شکل آماده شده و جوش بال به‌جان آن انجام شده است) به‌طرق زیر انجام می‌شود:

مونتاژ تک‌مرحله‌ای

در این روش ابتدا سخت‌کننده‌های ستون که از قبل برشکاری و آماده‌سازی شده‌اند با ابزار مناسب مونتاژ و خال‌جوش می‌شوند. این کار مطابق نقشه‌های کارگاهی و با در نظر گرفتن اضافه طول جهت جبران جمع‌شدگی ناشی از جوش‌های طولی جان به‌جان ستون و حتی جوش‌های نفوذی سخت‌کننده‌ها صورت می‌گیرد.

سپس با استفاده از ابزار مناسب مانند زنجیر و جک هیدرولیکی وجه T شکل را در محل خود قرار داده و محکم می‌کنند. به‌همین ترتیب وجه دیگر نیز مونتاژ می‌شود (شکل ۹ ـ ۳۳).





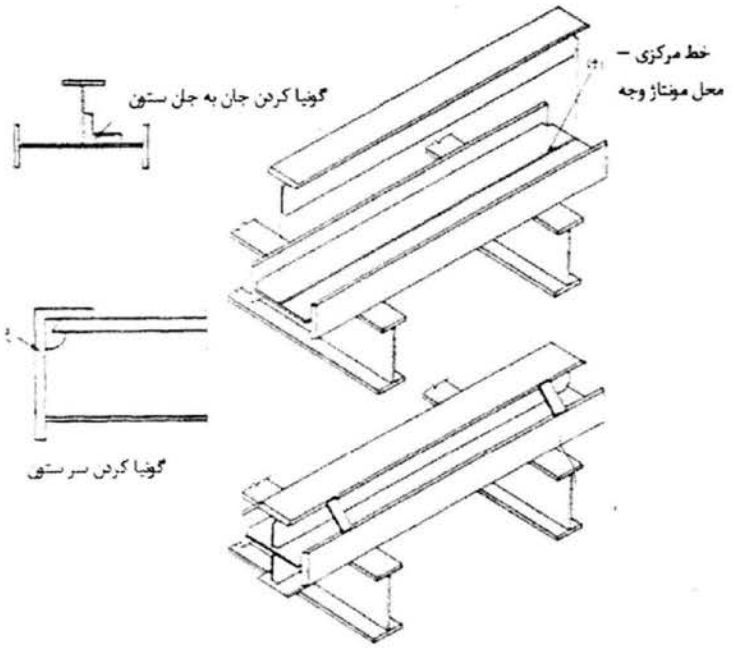
(الف) (ب)

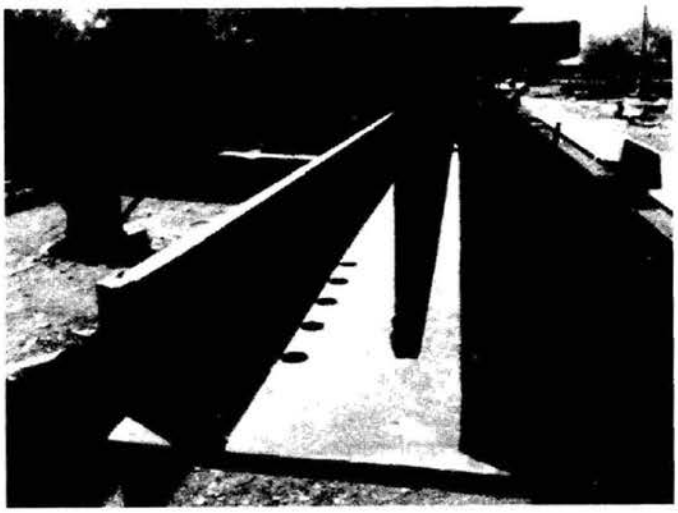
شکل ۹ ـ ۳۳ مونتاژ تک‌مرحله‌ای.

مونتاژ دو مرحله‌ای

در این روش ابتدا وجوه T شکل سوم و چهارم در محل خود با دقت مونتاژ وخال‌جوش می‌شوند. کنترل گونیایی بودن و نداشتن خروج از مرکزیت این وجوه نسبت به‌وجوه اول و دوم و نیز نسبت به‌خودشان از نکات بسیار حایز اهمیت می‌باشند. در این مرحله جوش طولی جان به‌جان ستون، به‌روش دستی یا خودکار به‌صورت یکسره اجرا می‌شود. پس از تکمیل جوش جان به‌جان، سخت‌کننده‌ها مونتاژ می‌شوند (شکل ۹ ـ ۳۴).

در هر دو روش فوق باید دقت شود که در صورتی که اتصالات از نوع پیچ و مهره‌ای بوده و نیاز به‌سوراخ‌کاری جان ستون باشد، باید قبل از هرگونه مونتاژ عملیات سوراخ‌کاری جان ستون انجام شده باشد.





شکل ۹ ـ ۳۴ مونتاژ دومرحله‌ای.

۹ ـ ۴ ـ ۸ جوش ثانویه ـ جوش سخت‌کننده‌ها

سخت‌کننده‌ها به‌دو دسته تقسیم می‌شوند: سخت‌کننده‌های ساده و ورق‌های پیوستگی.

سخت‌کننده‌های ساده معمولاً در میانه تراز طبقات و یا در ادامه ورق‌های سخت‌کننده گاست‌ها نصب می‌شوند که جوش آنها به‌ستون اصولاً به‌صورت جوش گوشه می‌باشد. ورق‌های پیوستگی ستون نیز در محل اتصال بال تیر به‌ستون در داخل ستون نصب شده و بخصوص در مورد قاب‌های خمشی باید با جوش نفوذی کامل به‌بال‌های ستون جوش شوند، و جوش اتصال‌دهنده آنها به‌جان ستون از نوع جوش گوشه می‌باشد مگر اینکه در نقشه‌ها به‌شکل دیگری مشخص شده باشد.

به‌طور کلی ترتیب جوشکاری سخت‌کننده‌ها چه در ستون‌های I شکل و چه در ستون‌های صلیبی، به‌صورت اجرای کامل پاس اول جوش کل سخت‌کننده‌ها و سپس اجرای کامل جوش با در نظر داشتن نکات پیشگیری از اعوجاج قطعات انجام می‌شود.

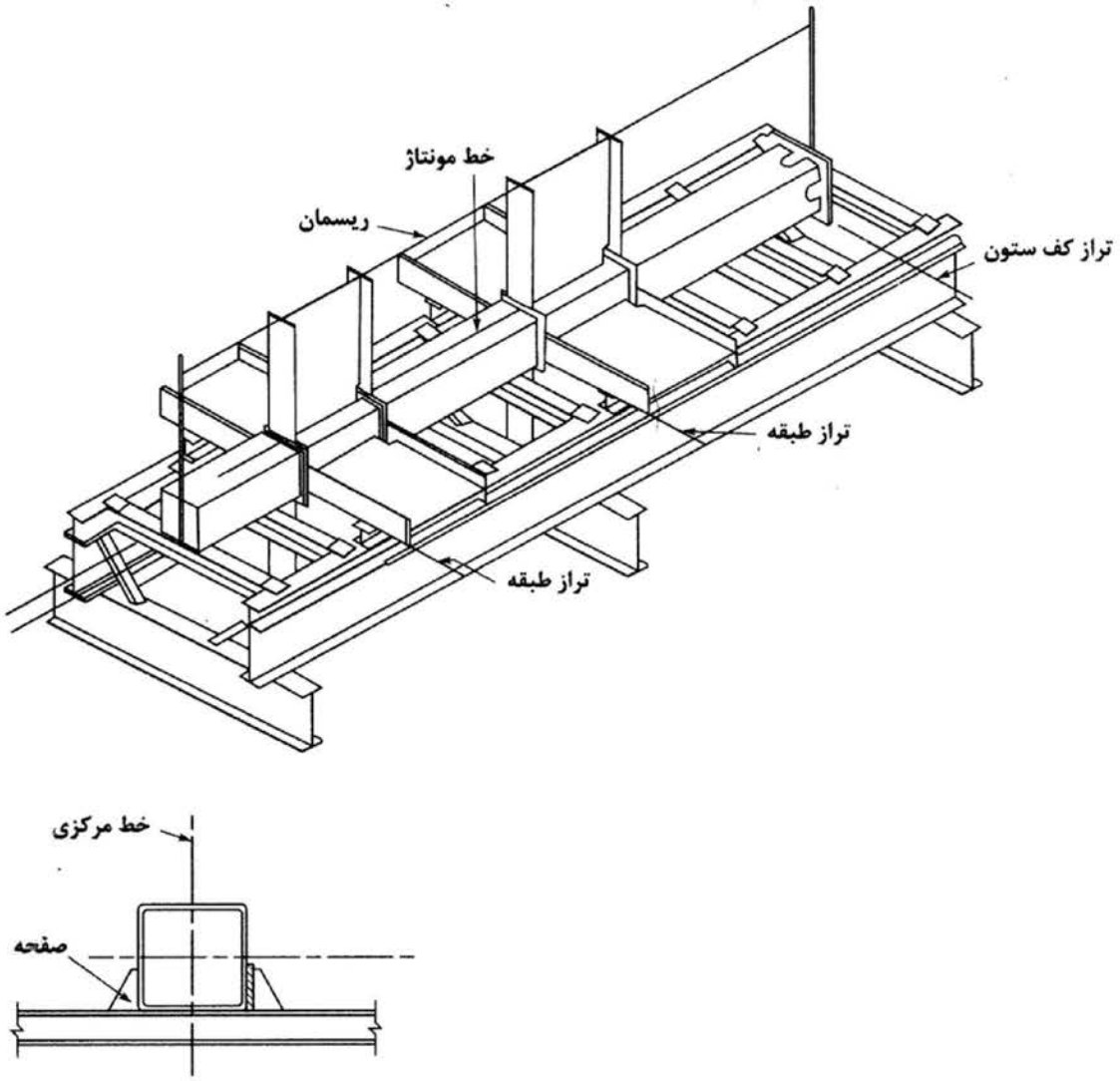
جهت جوشکاری ستون‌های صلیبی بهتر است ابتدا جوش طولی جان به‌جان ستون به‌طور کامل اجرا شود. به‌این ترتیب که پاس اول جوش کلیه سخت‌کننده‌ها و جوش طولی جان به‌جان ستون اجرا می‌شود و سپس جوش جان به‌جان در وضعیت جوشکاری کنج کامل می‌شود و در نهایت جوش کامل سخت‌کننده‌ها با رعایت ترتیب و توالی مناسب جهت پیشگیری از اعوجاج و تابیدگی ستون اجرا می‌شود.

شکل ۹ ـ ۳۵ تکمیل مونتاژ وجه سوم و چهارم ستون صلیبی.

۹ ـ ۴ ـ ۹ مونتاژ نهایی

پس از اجرای کامل جوش‌های هسته ستون، سایر اعضای ستون مانند صفحه ستون، سخت‌کننده‌های صفحه ستون، دستک‌ها یا ورق‌های زیرسری، و گاست‌های بادبندی مطابق نقشه و به‌ترتیب روی ستون نصب می‌گردد.

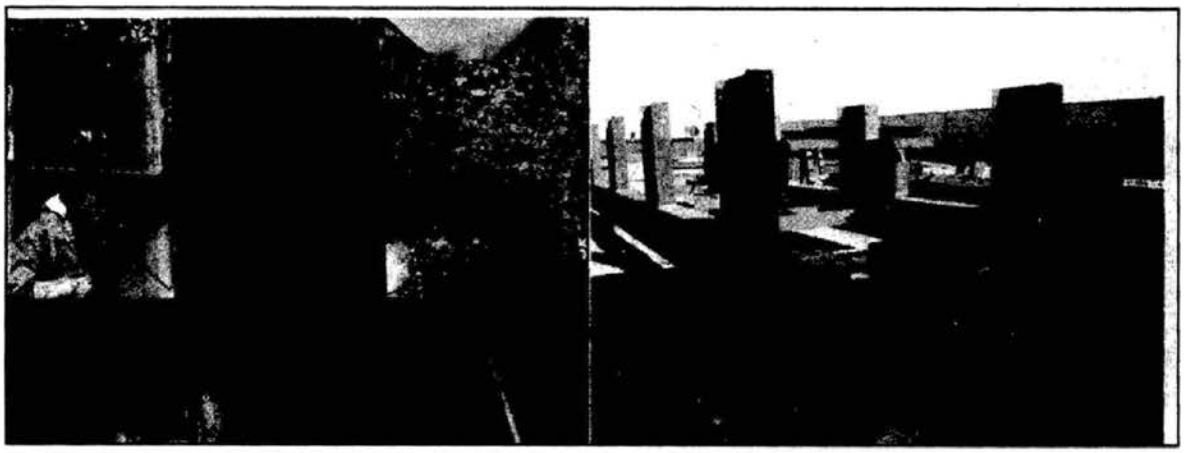
قبل از مونتاژ نهایی قطعات، باید هسته ستون، که تحت جوشکاری‌های مختلفی قرار گرفته، از لحاظ صاف بودن کنترل گردد. در صورت وجود پیچیدگی، کمانش و یا شمشیری تا حد قابل پذیرش صاف گردد. برش انتهای ستون (و سوراخ‌کاری بال‌های ستون در اتصالات پیچ و مهره‌ای) نیز در این مرحله انجام می‌شود.



شکل ۹ ـ ۳۷ فیکسچر مونتاژ نهایی قطعات الحاقی دستک‌ها روی هستهٔ ستون جعبه‌ای‌شکل.

۹ ـ ۴ ـ ۱۰ جوش نهایی

در این مرحله کلیه ملحقات نهایی نظیر دستک، ورق زیرسری، لچکی و ورق گاست بادبندی مطابق دستورالعمل‌های تأییدشدهٔ قبلی، جوشکاری می‌شوند.



(الف) مونتاژ دستک روی ستون در کارگاه ساخت

(ب) جوشکاری دستک روی ستون توسط دو جوشکار به‌طور هم‌زمان جهت پیش‌گیری از پیچیدگی دستک روی ستون

(پ) سنگ‌زنی درز جوش‌های شیاری پس از اجرای جوش گوشه پشت آنها

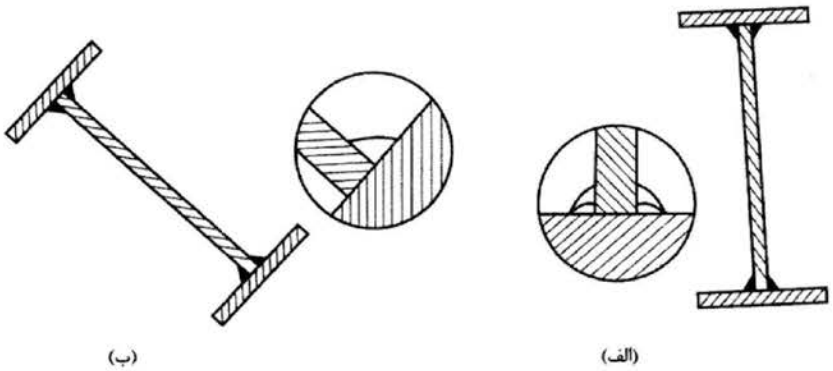
شکل ۹ ـ ۳۸ مراحل جوشکاری دستک روی ستون در کارگاه ساخت.

۹ ـ ۴ ـ ۱۱ موقعیت جوشکاری

می‌توان تیرها را در موقعیتی که جان آنها زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۴۵ درجه با افق می‌سازد، جهت اجرای جوش‌ها در موقعیت تخت، قرار داد. این موقعیت به‌خاطر آنکه جوشکاری ساده‌تر و کمی سریع‌تر انجام می‌شود، مطلوب می‌باشد. به‌علاوه این طرز قرارگیری امکان کنترل و بازرسی بهتر از شکل نوار جوش و انجام جوش‌های بزرگتر در یک‌بار عبور را در مواقع ضروری فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال بزرگترین نوار جوش در یک‌بار عبور که در موقعیت افقی اجرا می‌شود، در حدود ۸ میلی‌متر است. حال آنکه در موقعیت تخت، این اندازه می‌تواند تا ۲۰ میلی‌متر افزایش یابد.

برای نوار جوش با ساق ۶ تا ۸ میلی‌متری، موقعیت اجرای جوش (به‌صورت افقی یا تخت)، اختلاف زیادی ایجاد نمی‌کند. اگر نوار جوش ۱۰ میلی‌متر یا ۱۳ میلی‌متری مورد نیاز باشد، سازنده موقعیت‌های مختلفی را می‌تواند انتخاب کند. چنانچه تیر با جان قائم قرار گرفته باشد، این موقعیت امکان اجرای هر دو جوش را بر روی همان بال، بدون حرکت دادن تیر فراهم می‌کند (شکل ۹ ـ ۳۹ ـ الف). حال اگر سازنده دارای دو انبر جوش باشد، این دو نوار جوش ممکن است به‌طور همزمان انجام شوند، که در این صورت زمان کلی جوشکاری کاهش می‌یابد. اما در عین حال موقعیت افقی، حداکثر اندازه جوش را که در یک‌بار عبور جوش به‌دست می‌آید، محدود می‌کند.

با کج کردن تیر در یک زاویه، می‌توان جوش با اندازه بزرگتر را فقط با یک‌بار عبور اجرا کرد. ولی در عین حال باید توجه کرد که فقط یک نوار جوش نیز در هر زمان می‌تواند صورت گیرد (شکل ۹ ـ ۳۹ ـ ب)، و لازم است که تیر برای اجرای هر کدام از جوش‌ها بچرخد که این، زمان جابه‌جا کردن را افزایش می‌دهد.



شکل ۹ ـ ۳۹

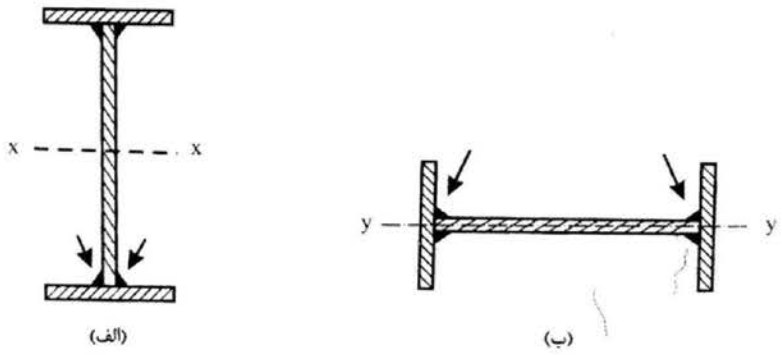
در کارگاه ساخت با دو انبر جوش خودکار، می‌توان به‌طور همزمان دو نوار جوش را بر روی تیر انجام داد. برای اجرای چنین عملیاتی باید از بین دو روش قرارگیری تیر که در شکل ۹ـ۴۰ نشان داده شده است، یکی را انتخاب کرد.

ممکن است مطرح شود که روش (الف) نسبت به‌حالت (ب) بهتر می‌باشد، چراکه تیر نسبت به‌محور X-X دارای صلبیت بیشتری است و بنابراین، در نتیجه اجرای دو جوش اول بر روی بال تحتانی، تمایل کمتری به‌انحنای طولی وجود دارد.

اما در عین حال در روش (ب)، جوش در مجاورت محور خنثای (y-y) از تیر می‌باشد، این فاصله تا محور، در مقایسه با حالت (الف) بسیار کمتر است و بنابراین در این حالت تأثیر خمشی بسیار کمی بر روی تیر وجود دارد.

در صورت وجود بال ضخیم، امکان دستیابی به‌نوار جوش با اندازه کافی جهت القای حرارت جوشکاری کافی برای ورق بال مطرح می‌شود. در این صورت روش (الف) به‌خاطر تهیه دو برابر مقدار حرارت و گرما بر روی بال نسبت به‌روش (ب) بهتر خواهد بود.

در واقع در مورد تأثیر انقباض جوش بعد از اجرای همه نوارهای جوش، بین این دو روش، اختلاف بسیار کمی وجود دارد.



شکل ۹ ـ ۴۰

۹ ـ ۴ ـ ۱۲ ورق‌های تقویتی بال تیر

بسیاری از اوقات، جهت افزایش ظرفیت خمشی تیرهای نوردشده، ورق‌های تقویتی به‌بال‌های آنها اضافه می‌شود. معمولاً دو ورق تقویتی به‌گونه‌ای قرار می‌گیرند که تقارن مقطع را نسبت به‌محور افقی حفظ کنند. از آنجایی که بتن کف در تیرهای مرکب (مختلط) با اتصالات برشگیر بر روی بال فوقانی، به‌صورت مرکب با تیر عمل می‌کند، امکان دارد که فقط بال تحتانی توسط ورق تقویت شود.

اتصالات جوشی ورق‌های تقویتی به‌بال تیرها، منجر به‌انقباض تیر در نتیجه خنک شدن فلز می‌شوند. با یک ورق تقویتی در هر بال، این انقباض در بالا و پایین بال‌های تیر، متعادل شده و تیر تغییرشکلی نخواهد داشت. اما در عین حال اگر تنها یک ورق تقویتی در بال تحتانی به‌کار رود، انقباض نامتعادل باعث می‌شود که تیر به‌صورت خمیده یا منحنی درآید.

انحنای ناشی از جوش نامتعادل را می‌توان با استفاده از رابطه ذیل تخمین زد (شکل ۹ ـ ۴۱).

$$\Delta = \frac{0.005AdL^2}{I} \qquad (۹ ـ ۲)$$

که در آن:

A= سطح کلی مقطع عرض جوش (cm^2)

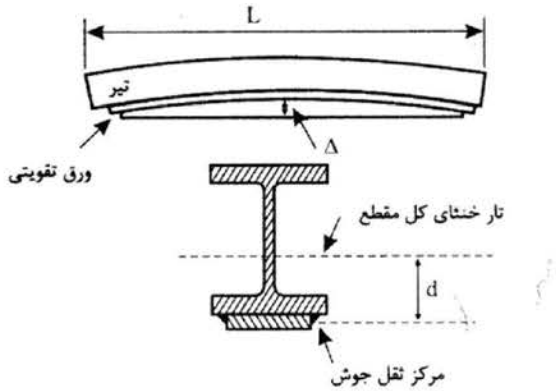
d= فاصله مرکز ثقل جوش تا محور خنثای مقطع (cm)

L= طول تیر (cm)

I= ممان اینرسی مقطع (cm^4)

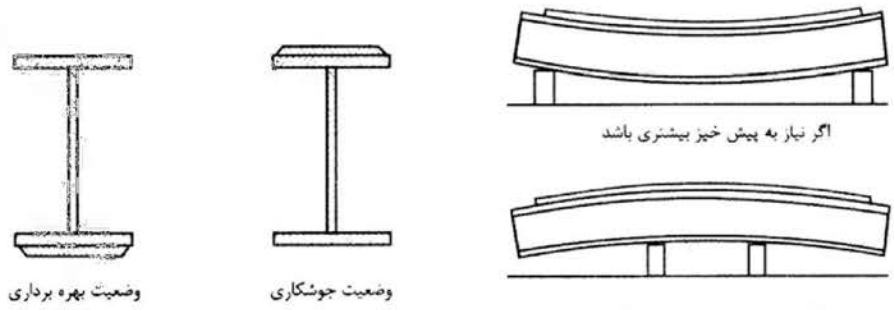
انحنای فوق می‌تواند از پیش‌خیز مورد نیاز بزرگتر و یا کوچکتر باشد.

اگر انحنای ناشی از جوشکاری، بیش از حد لازم برای پیش‌خیز باشد، تیر باید طوری تکیه داده شود که افتادگی ناشی از وزن در خلاف جهت انحنای جوش باشد و چنانچه انحنای ناشی از جوشکاری برای پیش‌خیز کافی نباشد، باید تیر طوری تکیه داده شود که افتادگی آن به‌علت وزن، هم‌جهت با انحنای جوش باشد. یک سازنده با تجربه تیر را یا در نزدیکی دو انتها و یا در نزدیکی وسط جهت حصول خیز اولیه لازم، تکیه می‌دهد.

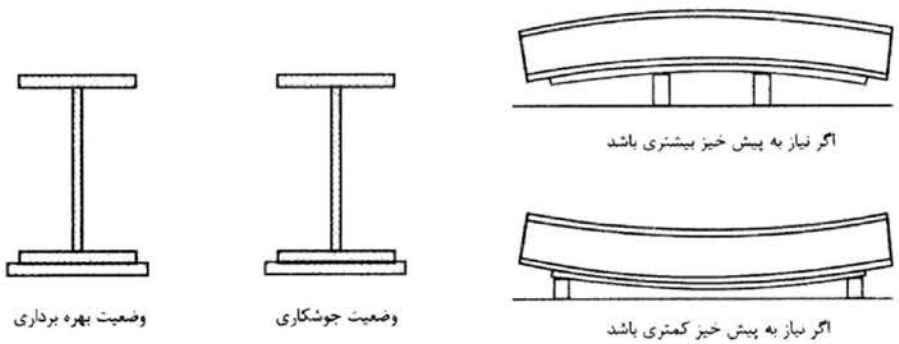


شکل ۹ ـ ۴۱

اگر عرض ورق تقویتی کوچکتر از عرض بال تیر باشد، باید به‌طور معکوس به‌بال جوش گردد (شکل ۹ ـ ۴۲ ـ الف). اتکای این تیر در نزدیکی نقاط انتهایی آن، انحنای نهایی را افزایش و حال آنکه اتکای تیر در نزدیکی نقطه میانی این کمیت را کاهش می‌دهد. اما در صورتی که عرض ورق تقویتی بیشتر از بال تحتانی باشد، باید در موقعیت مستقیم جوش شود که تکنیک قرارگیری تکیه‌گاه‌ها مطابق با شکل ۹ ـ ۴۲ ـ ب می‌باشد.



(الف) وقتی که عرض ورق تقویتی کوچکتر از عرض بال است

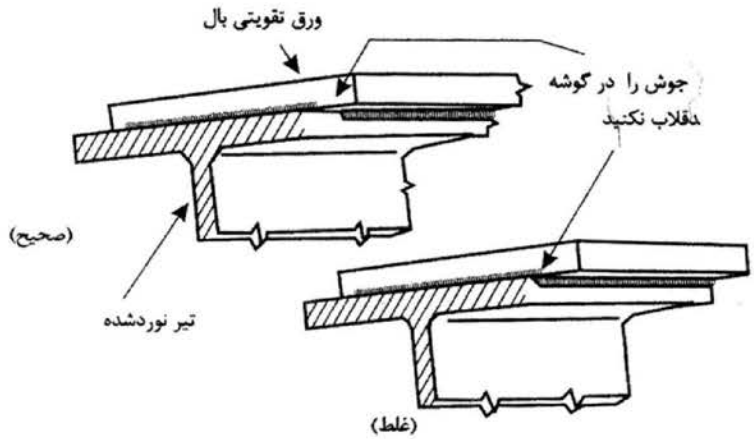


(ب) وقتی که عرض ورق تقویتی بزرگتر از عرض بال است

شکل ۹ ـ ۴۲

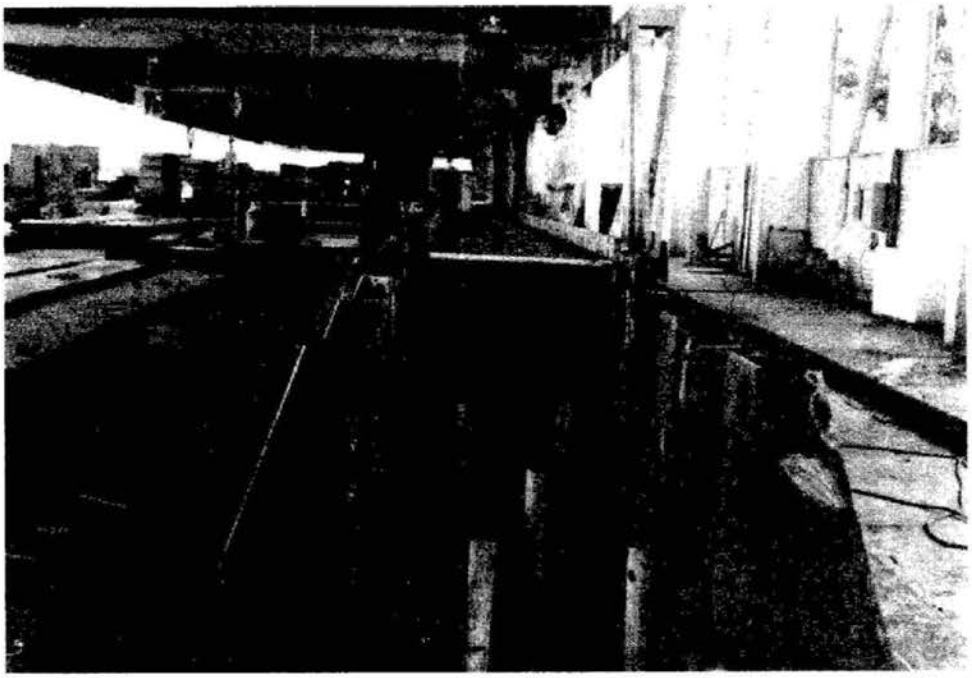
چنانچه ورق تقویتی از بال تیر عریض‌تر باشد، جوش اتصال به‌بال باید در انتها قطع شده و به‌صورت قلاب درنیاید (شکل ۹ ـ ۴۳).

در شکل‌های ۹ ـ ۴۴ الی ۹ ـ ۴۸ تصاویری از عملیات مونتاژ و ساخت اعضا ارایه شده است.

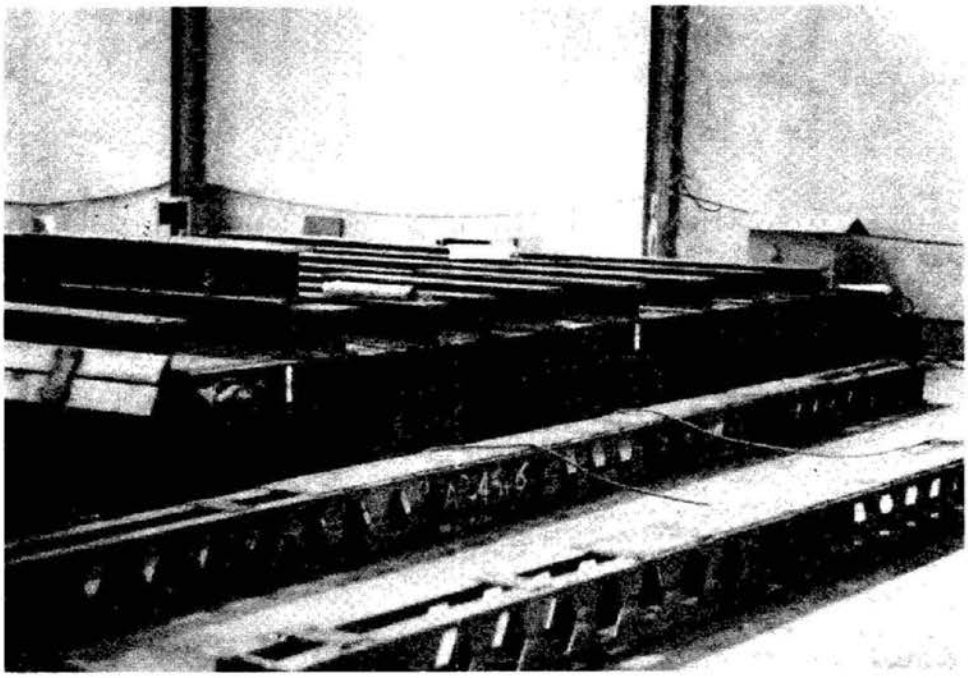


شکل ۹ ـ ۴۳

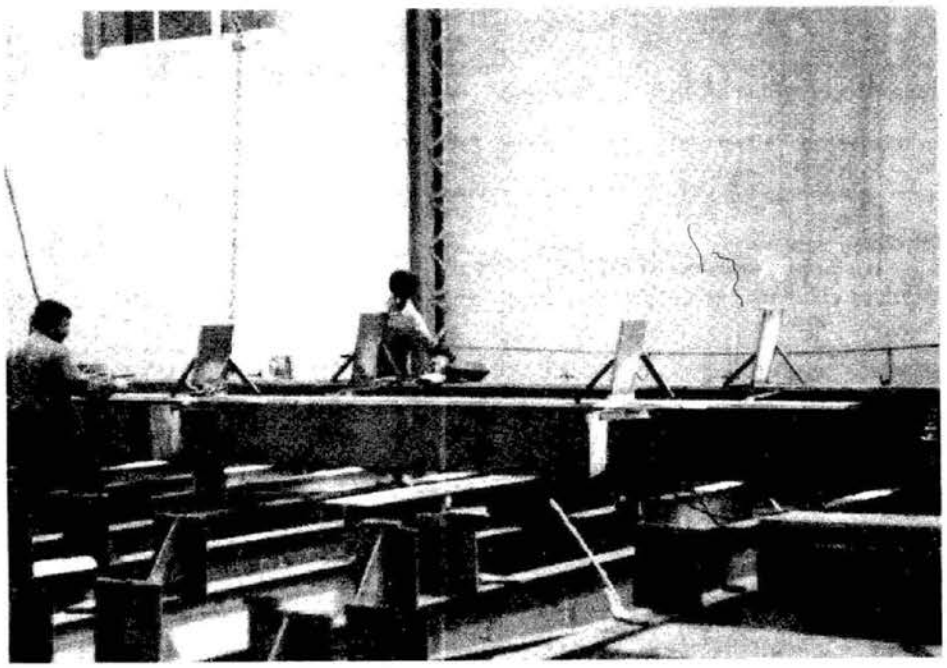
شکل ۹ ـ ۴۴ مونتاژ بال و جان در تیرورق‌های I.



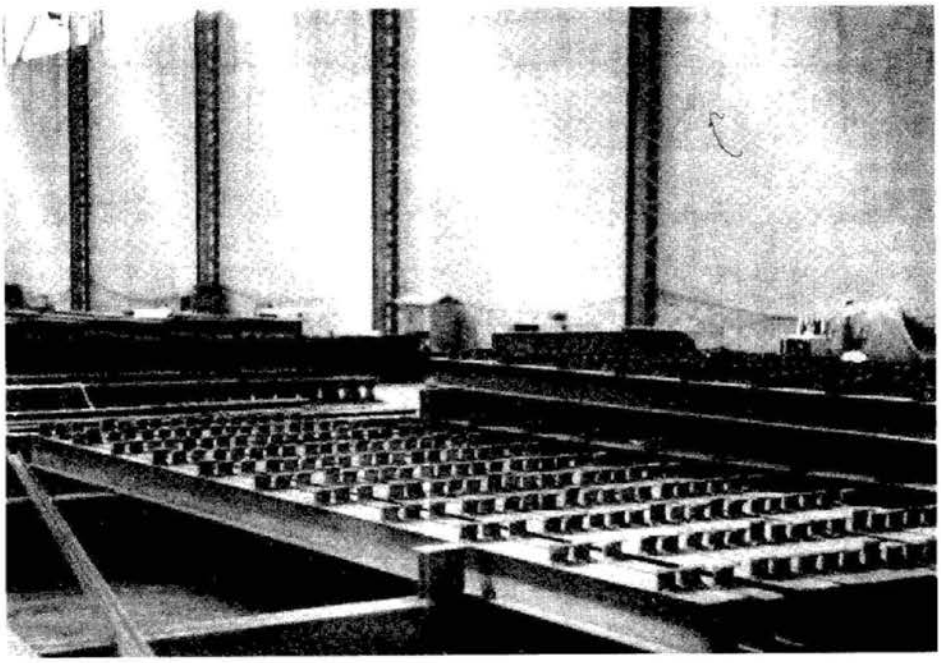
شکل ۹ ـ ۴۵ مونتاژ بال و جان ستون جعبه‌ای.



شکل ۹ ـ ۴۶ تولید تیرهای لانه‌زنبوری.



شکل ۹ ـ ۴۷ اتصال ورق‌های اتصال به‌ستون ساخته‌شده از ورق.



شکل ۹ ـ ۴۸ اتصال برشگیر به‌بال تیر.

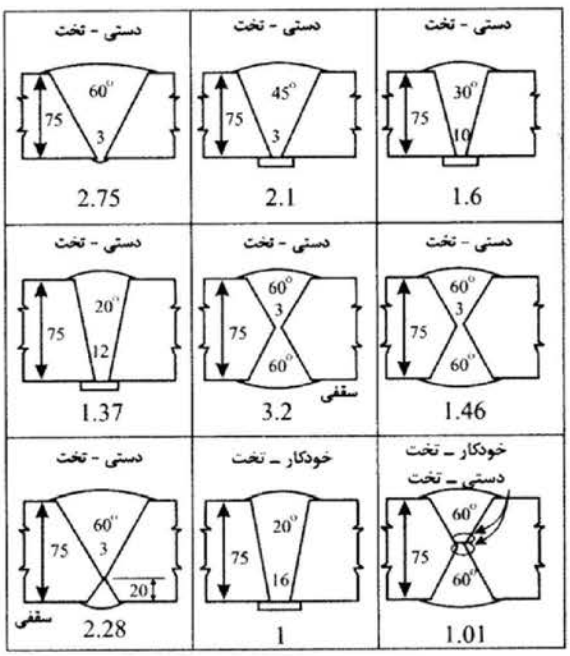
۹ ـ ۴ ـ ۱۳ وصله کارخانه‌ای

درزهای جوش در ورق‌های بال و جان، باید قبل از مونتاژ قطعات بال و جان و در مرحله تسمه‌سازی تکمیل شوند. محل جوش درز بال و جان بهتر است در یک صفحه واقع نشوند. محدودیت‌های موجود در طول ورق، حمل و نقل، تبدیل ورق نازک‌تر به‌ضخیم‌تر، تبدیل عرض و موارد مشابه، از جمله نقاط درز اجباری می‌باشند. در شکل ۹ ـ ۴۹ انواع مختلف جوش درز با هزینه مربوطه نشان داده شده است.

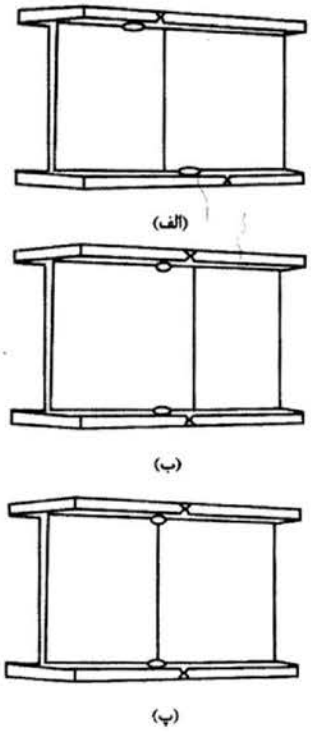
در کارخانه، ورق‌های بال به‌منظور انجام جوش پشت درز، برگردانده می‌شوند، بنابراین در ورق‌های ضخیم‌تر، می‌توان از درزهای X استفاده نمود. این‌گونه درزها، کمترین مقدار فلز جوش را مصرف می‌کنند و از آنجایی که جوش دارای تعادل است، لذا در این حالت هیچ‌گونه تغییرشکل زاویه‌ای به‌وجود نخواهد آمد. در ورق‌های عریض‌تر، حدود ۶۰ الی ۹۰ سانتی‌متر، اغلب وسایل جوش قوس الکتریکی زیرپودری تمام‌خودکار یا نیمه‌خودکار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۹ ـ ۴ ـ ۱۴ وصله‌کاری کارگاهی

وصله‌های کارگاهی معمولاً در یک صفحه تنها واقع می‌شوند. پس و پیش کردن جوش‌های لب به‌لب بال‌ها و جان‌ها، کیفیت اجرای تیر را افزایش نمی‌دهد. آماده کردن درزها به‌وسیله برش و پخ زدن آنها زمانی که همه آنها در یک صفحه قرار دارند، بسیار ساده‌تر می‌باشد (شکل ۹ ـ ۵۰). واقع شدن درز بال در یک صفحه و پس و پیش کردن درز جان سهولت خوبی در مونتاژ وصله ایجاد می‌کند.



شکل ۹ ـ ۴۹ هزینه نسبی جوش‌های لب به‌لب بال.



شکل ۹ ـ ۵۰ سه روش آماده‌سازی لبه‌های تیرها برای جوشکاری کارگاهی. قرار دادن سه جوش در سه صفحه متفاوت، جفت شدن ورق‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. قرارگیری هر سه جوش لب به‌لب در یک صفحه ساده‌تر است. واقع شدن درز بال در یک صفحه و پس و پیش کردن درز جان سهولت خوبی در مونتاژ وصله ایجاد می‌نماید.

متداول‌ترین روش به‌کار رفته در وصلهٔ کارگاهی تیرها، جوش یک‌در میان بال و جان به‌صورت زیر است (شکل ۹ ـ ۵۱):

۱ ـ بخشی از ضخامت هر دو بال (در حدود $\frac{۱}{۲}$ تا $\frac{۱}{۳}$)، در تمام عرض جوش می‌شود.

۲ ـ قسمتی از ضخامت جان (حدود $\frac{۱}{۲}$)، در تمام عرض جوش می‌گردد.

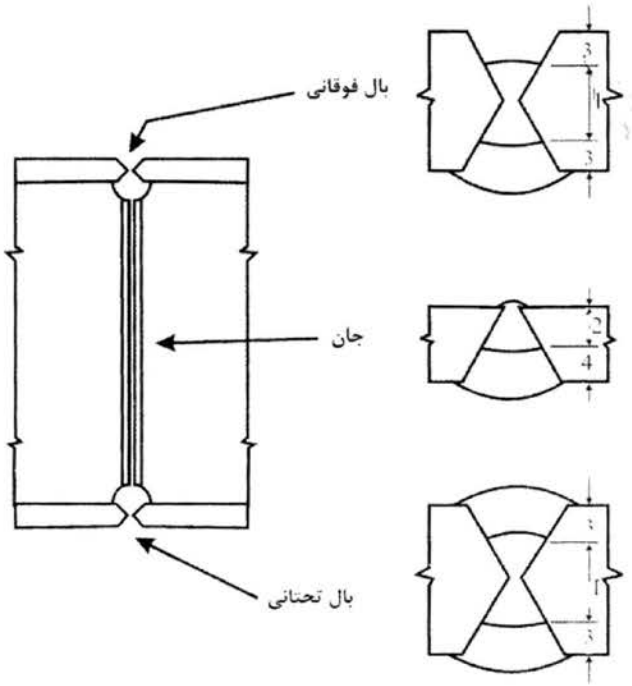
۳ ـ جوشکاری بال‌ها کامل می‌شود.

۴ ـ در نهایت جوشکاری جان نیز تکمیل می‌گردد.

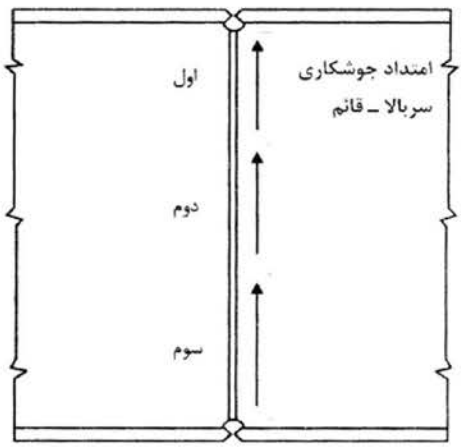
در مورد جان‌های مرتفع، گاهی اوقات جوش‌های قائم به‌دو یا سه قسمت تقسیم‌شده و روش گام به‌عقب مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۹ ـ ۵۲). این عمل انقباض یکنواخت‌تری را در درز نتیجه خواهد داد.

بیشترین درزهای لب به‌لب به‌کار رفته در وصله‌های کارگاهی از نوع جناغی یک‌طرفه (V) می‌باشند. در مورد ورق‌های ضخیم‌تر، ۲۰ میلی‌متر و بزرگتر، به‌منظور کاهش مقدار جوشکاری مورد نیاز و تعادل جوش در هر دو طرف و حذف تغییرشکل زاویه‌ای، از درز جناغی دوطرفه (X) استفاده می‌شود.

بیشترین درزهای لب به‌لب کارگاهی بال، برحسب ضخامت بال و روش جوشکاری، به‌صورت جناغی یک‌طرفه (V) و یا دوطرفه (X) می‌باشند. باید ترتیبی فراهم نمود که جوش‌ها در وضعیت تخت قابل انجام باشند.



شکل ۹ ـ ۵۱ جوش یک در میان بال و جان.

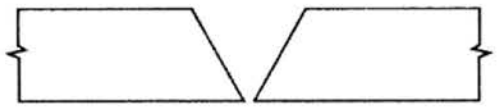


شکل ۹ ـ ۵۲ برای جان‌های عمیق، توالی گام به‌عقب به‌کارمی‌رود.

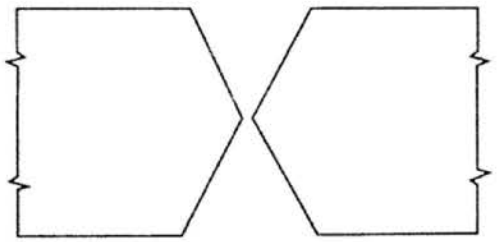
باید در نظر داشت که درز V ، تغییرشکل زاویه‌ای بیشتری را نتیجه می‌دهد، و با زیاد شدن ضخامت بال، میزان این تغییرشکل به‌سرعت افزایش می‌یابد. درز X ، با نیمه‌ای از جوش در بالا و نیمه‌ای در پایین درز، به‌جهت کاهش و

حتی حذف تغییرشکل‌ها بهتر خواهد بود. اما در اجرای این نوع درز، مقداری از عملیات جوشکاری در وضعیت سقفی خواهد بود. به‌همین دلیل AWS در درزهای استاندارد خود، درز X نامتقارن را نیز پیشنهاد می‌نماید (شکل ۹ ـ ۵۳). این حالت تا حدی مصرف فلز جوش را کاهش داده و از حجم عملیات جوشکاری سقفی نیز کم می‌کند.

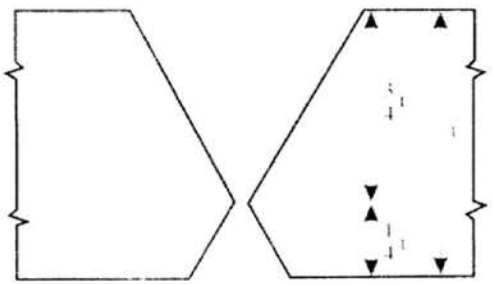
در درزهای X ، گاهی ابتدا عبور اول جوش تحتانی در وضعیت سقفی انجام می‌شود. ریشه این جوش در وضعیت تخت، سنگ‌خورده و اجرای عبور بعدی در موقعیت تخت انجام می‌شود. این روش عملیات سنگ‌زنی از پشت را در وضعیت سقفی، حذف می‌نماید.



(الف) درز V (جناغی یک‌طرفه)، ساده‌ترین آماده‌سازی و دارای تمایل به‌تغییرشکل زاویه‌ای.



(ب) درز X (جناغی دوطرفه)، برای ورق ضخیم‌تر مقدار فلز جوش را کاهش می‌دهد. چنانچه جوش‌ها به‌صورت متناوب در بالا و پایین اجرا شود، هیچ تغییرشکل زاویه‌ای ایجاد نمی‌شود.



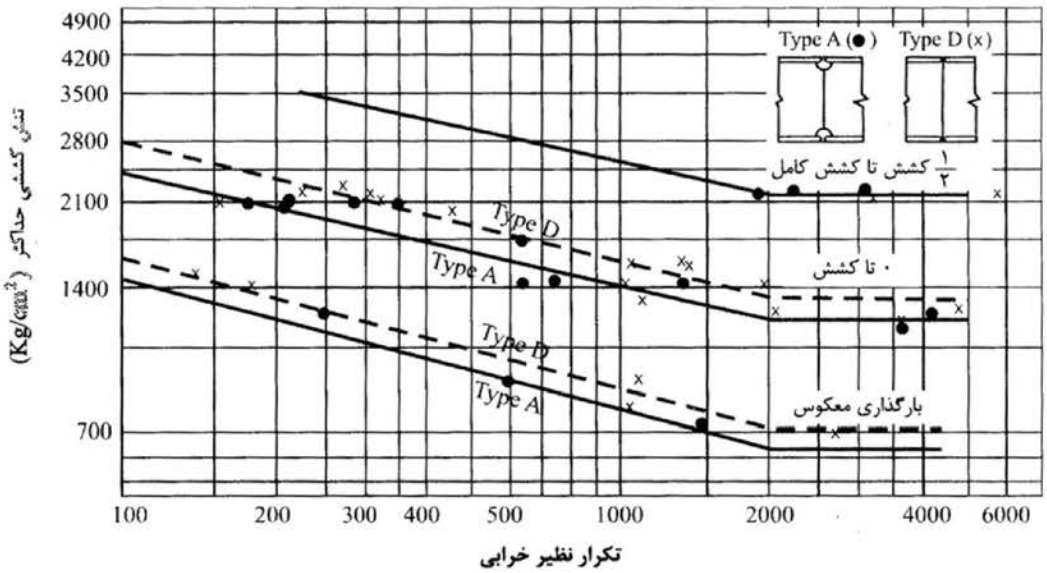
(پ) زمانی که ورق‌ها نمی‌توانند برگردانده شوند، مقدار جوش سقفی می‌تواند با ادامه دادن بخش بالایی درز X تا حداکثر $\frac{۳}{۴}$ ضخامت ورق، کاهش یابد (جناغی دوطرفه نامتقارن).

شکل ۹ ـ ۵۳

۹ ـ ۴ ـ ۱۵ سوراخ‌های دسترسی[6] در جان در محل درز بال

سؤال‌های عمده‌ای مطرح شده است که آیا سوراخ‌های دسترسی در جان، کمکی به‌اجرای جوش کارگاهی درز لب به‌لب در بال‌ها می‌کند یا خیر. معایب این سوراخ‌ها باید به‌دقت در مقابل مزایای ایجاد یک جوش سالم‌تر در بال سنجیده شود.

آزمایش‌های انجام‌شده روی تیرهایی به‌ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در دانشگاه ایلی‌نویز، نشان می‌دهد که در حالت سوراخ در جان، مقاومت خستگی در حدود ۸۴٪ در ۱۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری، و حدود ۹۰٪ در ۲۰۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری نسبت به‌حالت بدون سوراخ می‌باشد (شکل ۹ ـ ۵۴).



شکل ۹ ـ ۵۴ آزمایش خستگی روی سوراخ دسترسی جان.

با توجه به‌افزایش قابل توجه کیفیت جوش در حالت وجود سوراخ دسترسی، و کاهش ناچیز در مقاومت خستگی، ملاحظه می‌شود که مزیت این سوراخ‌ها از عیبشان بیشتر است. با افزایش ارتفاع تیرورق، کاهش در مقاومت خستگی نیز کمتر می‌شود. در صورت نگرانی، می‌توان بعد از اتمام جوش درز، محل سوراخ جان را با جوش پُر نمود.

۹ ـ ۵ عملیات تمیزکاری و رنگ

در سطح فولادی که به‌صورت نورد گرم تولید شده است، لایه‌ای از اکسید تشکیل می‌شود که چسبندگی دایمی با آن ندارد و به‌مرور زمان طبله کرده و جدا می‌شود. به‌این لایه فلس[7] می‌گویند. علاوه‌بر آن، به‌مرور زمان سطح فولاد زنگ

6. *Coped hole*
7. *Mill Scale*

می‌زند و لایه‌ای از زنگ روی آن تشکیل می‌شود که آن نیز چسبندگی دایمی نداشته و به‌مرور زمان از آن جدا می‌شود.

یکی از روش‌ها برای محافظت فولاد در مقابل عوامل خورنده خارجی، رنگ‌آمیزی سطح آن است. اما قبل از رنگ‌آمیزی باید سطح قطعه از لایه‌های شل مثل فلس و زنگ‌های قدیمی تمیز گردد. در مورد زدودن لایه‌های سطحی فولاد معمولاً سیاست زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱ ـ برای قطعه فولادی که در داخل بتن قرار می‌گیرد و دارای زنگ‌زدگی سطحی زیادی نمی‌باشد، معمولاً هیچ‌گونه تمیزکاری سطحی صورت نمی‌گیرد.

۲ ـ برای قطعاتی که در داخل ساختمان، آجرکاری‌ها، گچ‌کاری‌ها و موارد مشابه قرار می‌گیرند، تمیزکاری سطحی با استفاده از برس‌های سیمی کافی است. برس زدن قادر به‌زدودن لایه‌های سطحی زنگ است، لیکن تمام فلس‌ها را نمی‌تواند از سطح قطعه بکند و فلس‌هایی که چسبندگی خوبی با سطح فولاد دارند در روی آن باقی می‌ماند.

۳ ـ برای قطعاتی که به‌صورت نما و در معرض مستقیم هوا و حملات خوردگی قرار می‌گیرند، تمیزکاری به‌وسیله ماسه‌پاشی (سند بلاست[8]) انجام می‌شود. در این روش سطح قطعه فولادی از هرگونه مواد اضافی پاک می‌شود و کاملاً به‌صورت نقره‌ای در می‌آید. ماسه‌پاشی عبارت است از پاشیدن دانه‌های ریز ماسه کوارتزی به‌کمک هوای فشرده (شکل ۹ ـ ۵۵). این کار با گرد و غبار زیادی همراه است. در صورت مضر بودن گرد و غبار، استفاده از مس باره مفید خواهد بود. مس باره سرباره کوره‌های مس‌گدازی است که آسیاب شده و به‌صورت دانه‌های ریز درمی‌آیند.

شکل ۹ ـ ۵۵ عملیات ماسه‌پاشی.

8. Sand blast

در جدول ۹ ـ ۱ درجات زنگ‌زدگی و در جدول ۹ ـ ۲ درجات تمیزکاری سطحی ارایه شده است.

بعد از عملیات تمیزکاری، نوبت به‌رنگ‌آمیزی می‌رسد. سیستم‌های رنگ در حالت کلی به‌رنگ‌های آلی[9] و غیرآلی[10] طبقه‌بندی می‌شوند. این نام‌گذاری به‌واسطه آلی و یا غیرآلی بودن مواد چسباننده[11] (رنگ مایه) است.

مواد تشکیل‌دهنده رنگ عبارتند از: رنگدانه[12]، رنگ مایه (مواد چسباننده) و حلال[13].

رنگدانه‌ها مواد جامد رنگ هستند و رنگ، قوام و پایایی رنگ از آن است.

رنگ مایه شامل روغن‌ها، رزین‌ها، ترکیبات غیرآلی و سایر مواد مشابه هستند که همانند مواد سیمانی فضای بین رنگدانه‌ها را پر کرده و لایه رنگ را به‌وجود می‌آورند. سیالیت رنگ ناشی از رنگ مایه است.

حلال‌ها یا تینرها، مایعاتی هستند که به‌رنگ اضافه می‌شوند تا آن را رقیق نمایند و باعث کارپذیری آن شوند. حلال‌ها بعد از رنگ‌آمیزی، می‌پرند و سخت شدن رنگ به‌علت فعل و انفعالات پیچیده شیمیایی بین رنگدانه‌ها و رنگ مایه است.

رنگ را می‌توان به‌بتن تشبیه نمود که رنگدانه‌های آن نقش سنگدانه‌ها را بازی می‌کنند، رنگ مایه نقش سیمان، و حلال‌ها نقش آب و مواد روانساز را دارند.

رنگ‌ها معمولاً به‌دو دسته روغنی و اپوکسی تقسیم می‌شوند. گیرش رنگ‌های روغنی ناشی از تبخیر (پریدن) حلال و سخت شدن رنگ مایه و رنگدانه‌هاست. اما گیرش رنگ‌های اپوکسی به‌واسطه تشکیل بلور در رنگ مایه می‌باشد و در نتیجه این نوع رنگ‌ها بسیار سخت هستند و به‌خوبی به‌فلز پایه می‌چسبند.

جدول ۹ ـ ۱ درجات زنگ‌زدگی سطحی

درجهٔ زنگ‌زدگی	تشریح
A	سطوح فولادی که عمدتاً با لایه اکسیدی چسبنده حاصل از نورد پوشیده‌شده اما زنگ‌زدگی آن در صورت وجود بسیار اندک می‌باشد.
B	سطوح فولادی که شروع به‌زنگ زدن کرده است و در نتیجه آن، لایه اکسیدی حاصل از نورد شروع به‌ور آمدن و ورقه‌ای شدن نموده است.
C	سطوح فولادی که لایه اکسیدی حاصل از نورد روی آنها در اثر زنگ‌زدگی کاملاً از بین رفته و یا اینکه قابل تراشیدن از سطح می‌باشد، اما حفره‌های جزیی بر روی آنها ایجاد شده که با چشم غیرمسلح نیز قابل دیدن می‌باشد.
D	سطوح فولادی که لایه اکسیدی نورد روی آنها در اثر زنگ‌زدگی کاملاً از بین رفته و روی آن حفره‌های گسترده‌ای که با چشم غیرمسلح قابل دیدن می‌باشد وجود دارد.

9. *Organic*
10. *Inorganic*
11. *Binder or vehicle*
12. *Pigment*
13. *Solvent*

جدول ۹ ـ ۲ درجات تمیزکاری سطحی

آماده‌سازی سطح به‌وسیله‌ی ماسه‌پاشی با حروف "Sa" معرفی شده‌اند.
پیش از عملیات ماسه‌پاشی باید تمام لایه‌های سنگین زنگ به‌وسیله تراشیدن زدوده شوند. روغن، چربی و چرک‌های قابل مشاهده نیز باید کاملاً برطرف گردند.
بعد از ماسه‌پاشی باید سطح مورد نظر از گرد و غبار و ذرات باقیمانده عملیات پاک‌سازی شود. درجات تمیزکاری به‌شرح زیر می‌باشند:

Sa 1 : تمیز کردن به‌صورت شن‌پاشی خفیف (Light blast cleaning)

هنگامی که به‌سطح بدون بزرگنمایی بنگریم، باید عاری از روغن، چربی و چرک‌های مرئی بوده، همچنین لایه اکسیدی نورد که چسبندگی آن کم می‌باشد، زنگ، پوشش‌های رنگی و مواد خارجی نیز بر روی سطح موجود نباشد.

Sa 2 : تمیز کردن به‌صورت شن‌پاشی عمیق (Through blast cleaning)

هنگام نگریستن به‌سطح بدون بزرگنمایی باید عاری از روغن، چربی و چرک‌های مرئی بوده، بیشترین مقدار لایه اکسیدی نورد که چسبندگی آن کم می‌باشد، زنگ، پوشش‌های رنگی و مواد خارجی نیز از روی سطح زدوده شده باشد. هرگونه آلاینده باقیمانده دیگر باید به‌شدت به‌سطح چسبیده باشد که از روی آن جدا نشود.

Sa 2.5 : تمیز کردن به‌صورت شن‌پاشی عمیق‌تر (Very through blast cleaning)

هنگامی که به‌سطح بدون بزرگنمایی بنگریم، باید عاری از روغن، چربی و چرک‌های مرئی بوده همچنین لایه اکسیدی نورد که چسبندگی آن کم می‌باشد، زنگ، پوشش‌های رنگی و مواد خارجی کاملاً زدوده شده باشد. هرگونه اثر بجا مانده از آلاینده‌ها فقط به‌صورت لکه‌های خفیفی به‌شکل خال‌ها و نوارها به‌نظر خواهد آمد.

Sa 3 : تمیز کردن به‌صورت شن‌پاشی تا درجه نمایان شدن سطح فولاد(Visually cleen steel)

هنگام نگریستن به‌سطح بدون بزرگنمایی، باید عاری از روغن، چربی و چرک‌های مرئی بوده، همچنین لایه اکسیدی نورد که چسبندگی آن کم می‌باشد، زنگ، پوشش‌های رنگی و مواد خارجی نیز کاملاً زدوده شده باشند. این سطح تمیزشده دارای رنگ یکنواخت و نقره‌ای می‌باشد.

در مواردی لازم است فساد و خوردگی مصالح در طرح و محاسبه اعضای سازه در نظر گرفته شود و ابعاد آنها طوری داده شود که اثر خوردگی را جبران کند و یا در حالت دیگر با حفاظت در مقابل خوردگی به‌وسیله رنگ زدن و یا راه‌حل‌های دیگر، باید شرایط بهره‌برداری حفظ شود. دستورالعمل رنگ‌آمیزی قطعات فولادی به‌شرح جدول ۹ ـ ۳ می‌باشد. در شکل ۹ ـ ۵۶ ـ الف بازرس کارگاه در حال ضخامت‌سنجی رنگ قطعات نشان داده شده است.

در جاهایی که تیرها و یا ستون‌ها در معرض عوامل جوی قرار می‌گیرند باید سطوح داخلی آنها (در صورتی که قسمت‌های توخالی داشته باشند) برای مقابله با خوردگی کاملاً مسدود شود و به‌صورت آب‌بندی‌شده درآید، یا فضاهای داخلی آنها ابعاد کافی داشته باشند تا با دسترسی به‌داخل آنها هر چند وقت یک‌بار تمیز و رنگ شوند.

جدول ۹ ـ ۳ حداقل ضخامت رنگ‌آمیزی قطعات فولادی در شرایط محیطی مختلف

شرایط محیطی	آماده‌سازی سطح فولادی	نوع و ضخامت رنگ		
		قطعهٔ فولادی در داخل دیوار و نازک‌کاری	قطعهٔ فولادی به‌صورت روباز لیکن درون محیط بسته	قطعهٔ فولادی در معرض شرایط جوی
معتدل[1]	Sa 2	۴۰ میکرون ضدزنگ	۴۰ میکرون آستر الکیدی ۴۰ میکرون رویهٔ الکیدی	۴۰ میکرون آستر الکیدی ۴۰ میکرون لایهٔ میانی الکیدی ۴۰ میکرون رویهٔ الکیدی
سخت[2]	Sa 2.5	۴۰ میکرون آستراپوکسی غنی از روی	۴۰میکرون آستراپوکسی غنی از روی ۴۰ میکرون لایهٔ میانی اپوکسی ۴۰ میکرون رویهٔ اپوکسی	۶۰ میکرون آستراپوکسی غنی از روی ۶۰ میکرون آستر میانی اپوکسی ۶۰ میکرون رویهٔ اپوکسی پلی‌یورتان
بسیار[3] سخت و ساحلی	Sa 3	۴۰ میکرون آستراپوکسی غنی از روی ۴۰ میکرون رویهٔ اپوکسی	۶۰ میکرون آستراپوکسی غنی از روی ۶۰ میکرون لایهٔ میانی اپوکسی ۶۰ میکرون رویهٔ اپوکسی پلی‌یورتان	مثل ناحیهٔ جزر و مدی که نیاز به‌مطالعهٔ خاص ندارد

۱) شرایط معتدل، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی متوسط کمتر از ۵۰٪ (همانند شهر تهران).

۲) شرایط سخت، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی متوسط بیش از ۸۰٪ (همانند شهر رشت).

۳) شرایط بسیار سخت، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی متوسط بیش از ۸۰٪ همراه با بخار کلر یا نظایر آن (مانند شهر بندرعباس).

۴) در صورتی که دستورالعمل رنگ‌آمیزی توسط کارشناس ذیصلاح تهیه شود، می‌توان از شرایط جدول فوق عدول نمود.

۵) صفحاتی که قرار است در اتصال اصطکاکی رویهم قرار گیرند، نباید رنگ شوند، فقط به‌لایه‌ای در حد ۲۰ میکرون به‌عنوان رنگ انبارداری نیاز می‌باشد.

۶) یک میکرون، $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ میلی‌متر است.

۹ ـ ۶ عملیات حمل

با توجه به‌مخارج سنگین، عملیات حمل از موارد قابل تأمل در تولید اجزای اسکلت فولادی است. در هنگام تولید اعضا در کارخانه، طول، عرض، ارتفاع و وزن قطعه تولیدشده باید طوری انتخاب گردد که در هنگام حمل، شرایط بار ترافیکی ایجاد نگردد. بار می‌تواند در یکی از حالات زیر، در رده بارهای ترافیکی قرار گیرد:

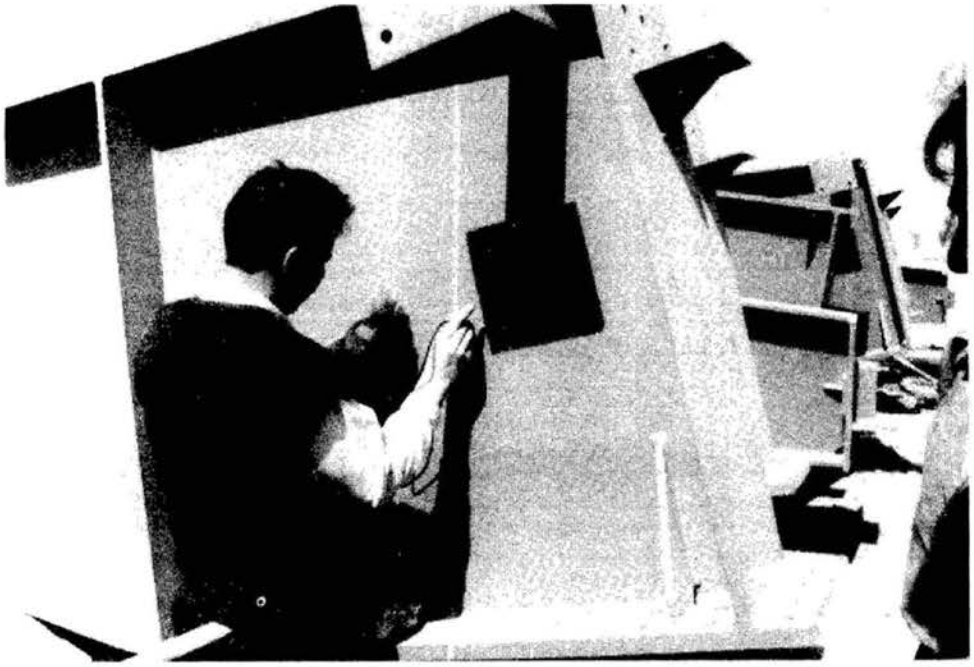
الف) داشتن عرض بیشتر از عرض تریلی (حدود ۲/۸۰ متر)

ب) داشتن طول بیشتر از طول تریلی (حدود ۱۲ متر)

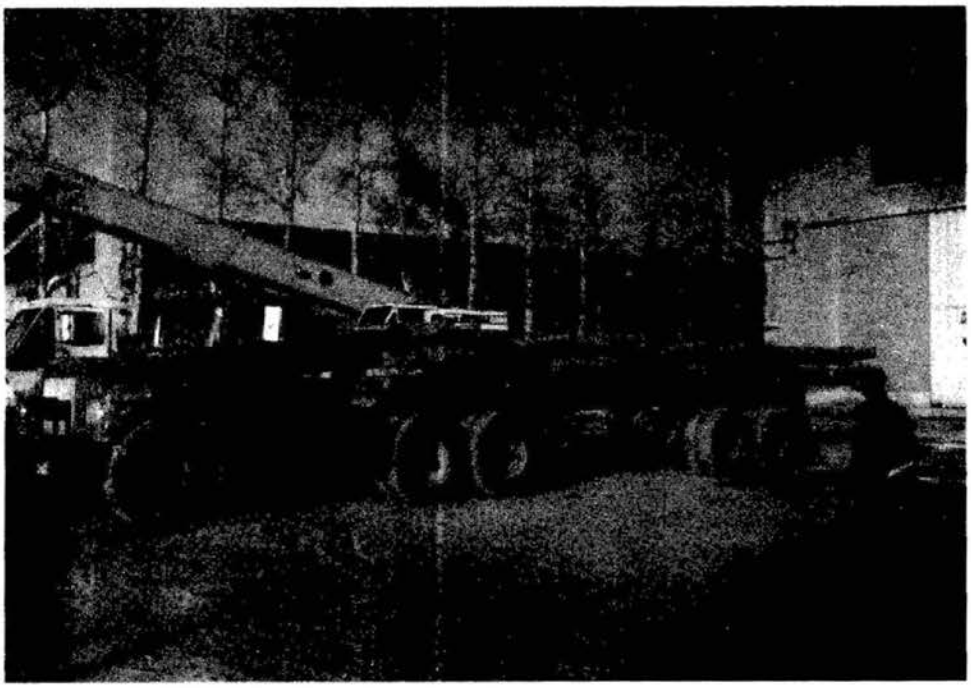
پ) داشتن ارتفاع بیش از حد (ارتفاع بالای بار از سطح جاده بیش از ۴ متر)

ت) داشتن وزن غیرعادی

بارهای ترافیکی دارای هزینه حمل بسیار گران‌قیمت می‌باشند و باید تا حد امکان از آن اجتناب نمود. در شکل ۹ ـ ۵۶ ـ ب، حمل یک قطعه سنگین توسط تریلی نشان داده شده است.



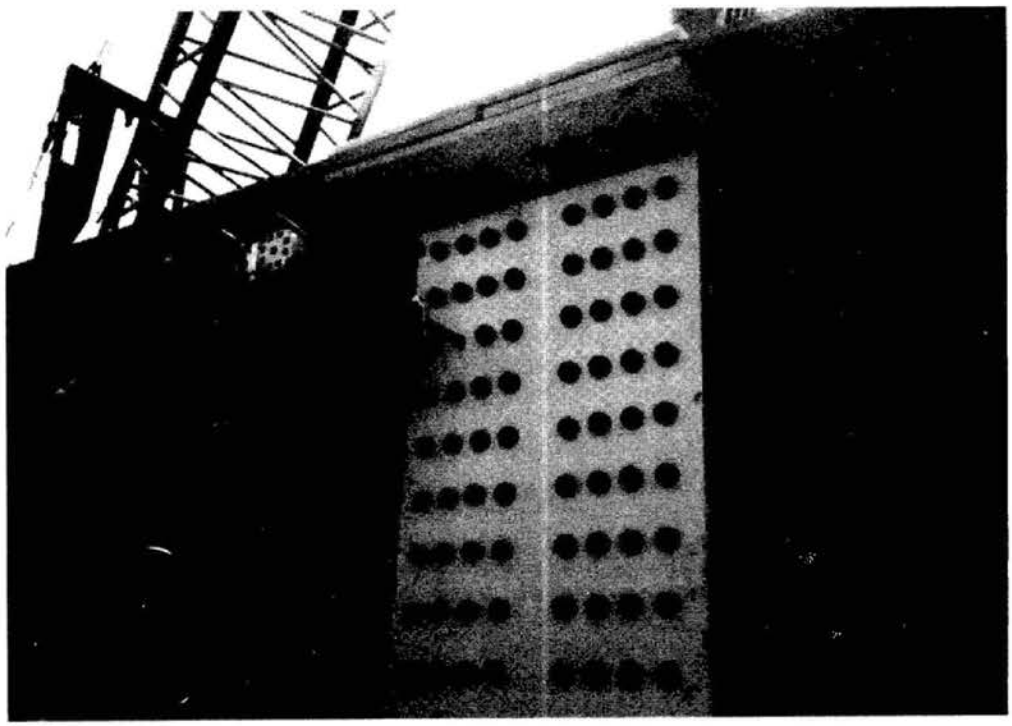
شکل ۹ ـ ۵۶ ـ الف ضخامت‌سنجی رنگ.



شکل ۹ ـ ۵۶ ـ ب حمل یک قطعه سنگین.

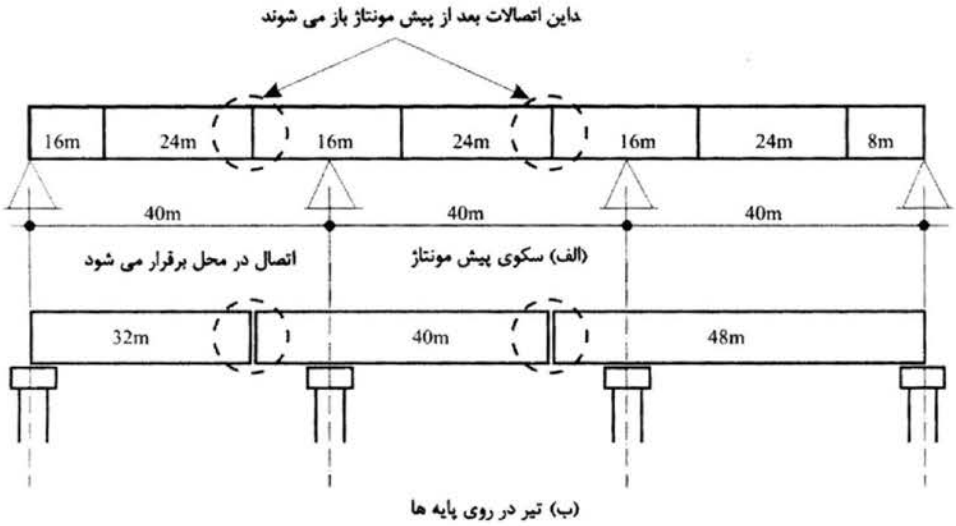
۹ ـ ۷ عملیات پیش‌مونتاژ و مونتاژ در پای کار

همان‌طور که در قسمت قبل عنوان شد، در اکثر موارد امکان ساخت عضو با طول کامل در کارخانه وجود ندارد و لازم است عضو در قطعات کوتاهتر ساخته شده و به‌کارگاه حمل گردد. بنابراین قبل از نصب لازم است قطعات در پای کار به‌صورت یکسره در آمده و سپس نصب شوند. به‌این عملیات مونتاژ و یا پیش‌مونتاژ گفته می‌شود. برای انجام کار ابتدا در پای کار شاسی‌های مخصوص عملیات پیش‌مونتاژ آماده می‌گردد. سپس قطعات در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و پس از ریسمان‌کشی و هم‌محور کردن آنها، قطعات به‌یکدیگر جوش و یا پیچ می‌شوند. گاهی مواقع امکان نصب یک‌مرتبه عضو کامل وجود ندارد. لذا در چنین مواردی مجدداً بعضی از وصله‌های عضو باز می‌شوند و عملیات نصب به‌صورت قطعه‌قطعه انجام می‌شوند. در این حالت از آنجا که قبلاً قطعات در پای کار به‌یکدیگر به‌صورت آزمایشی متصل شده‌اند، اتصال مجدد آنها در جبهه کار بسیار ساده خواهد بود. در صورتی که اتصال قطعات به‌یکدیگر دایمی باشد، عملیات را مونتاژ و در صورتی که به‌صورت آزمایشی و موقت باشد، پیش‌مونتاژ نامند. بسیاری از پیمانکاران ترجیح می‌دهند انجام بعضی سوراخ‌کاری‌ها را در مرحله مونتاژ و یا پیش‌مونتاژ انجام دهند. بدین معنی که در کارخانه عمداً از چند صفحه سوراخ‌کاری که در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، یکی را انجام نمی‌دهند. بعد از عملیات پیش‌مونتاژ، صفحه سوراخ‌کاری‌نشده از طرف صفحه سوراخ‌کاری‌شده علامت زده می‌شود (سنبه‌نشان) و سپس ورق اتصال باز شده و توسط مته مورد سوراخ‌کاری قرار می‌گیرد.



شکل ۹ ـ ۵۷ روش سوراخ کردن ورق‌های اتصال.

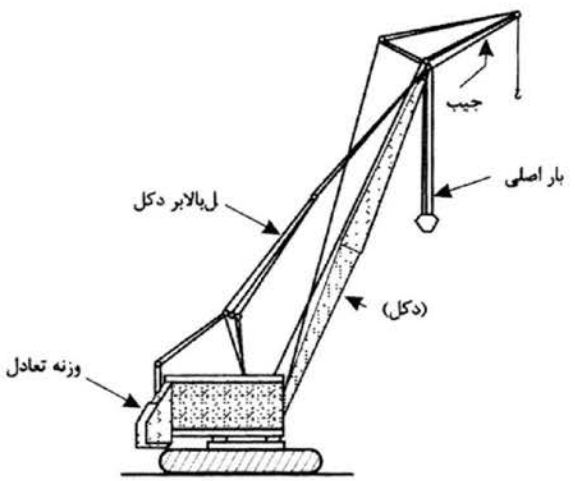
به‌عنوان مثال، در عملیات نصب شاهتیرهای یکسره پلی به‌طول کل ۱۲۰ متر در سه دهانه ۴۰ متری، شاهتیر در طول‌های ۸ ، ۱۶ و ۲۴ متری به‌کارگاه حمل گردید. در کارگاه کل ۱۲۰ متر در پای کار به‌یکدیگر مونتاژ گردید. سپس بعضی اتصالات مجدداً باز شدند و عملیات نصب در طول‌های ۴۸ ، ۴۰ و ۳۲ متر انجام شد (شکل ۹ ـ ۵۸).



شکل ۹ ـ ۵۸

۹ ـ ۸ عملیات واداشتن، نصب، خال‌جوش و اتصالات موقت

عملیات نصب توسط جرثقیل‌های متحرک و یا جرثقیل‌های برجی انجام می‌شود. در شکل ۹ ـ ۵۹ یک نمونه جرثقیل متحرک نشان داده شده است. جرثقیل‌های متحرک می‌توانند از نوع بوم خشک و یا بوم هیدرولیکی باشند. جرثقیل‌ها



شکل ۹ ـ ۵۹ جرثقیل نصب.

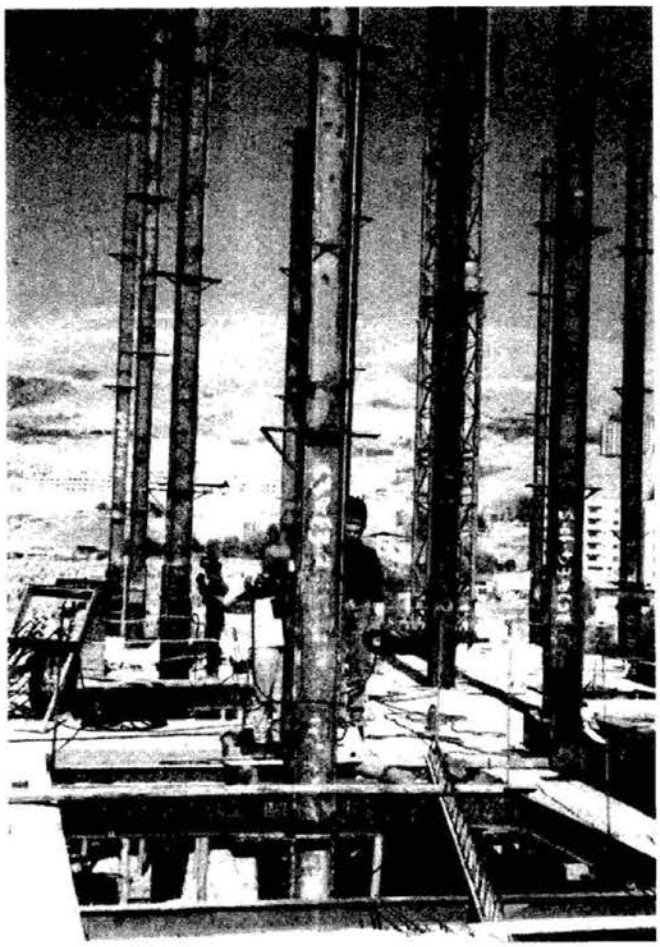
علاوه‌بر بوم اصلی، دارای یک اضافه بوم می‌باشند که به‌آن جیب می‌گویند و از آن می‌توان برای نصب قطعات سبک در ارتفاع بالا استفاده نمود.

در شکل‌های ۹ ـ ۶۰ تا ۹ ـ ۶۹ تصاویری از عملیات واداشتن و اجرای اتصالات موقت نشان داده شده است.

۹ ـ ۹ شاقولی کردن ستون‌ها، هم‌محور کردن تیرها و تکمیل اطلاعات

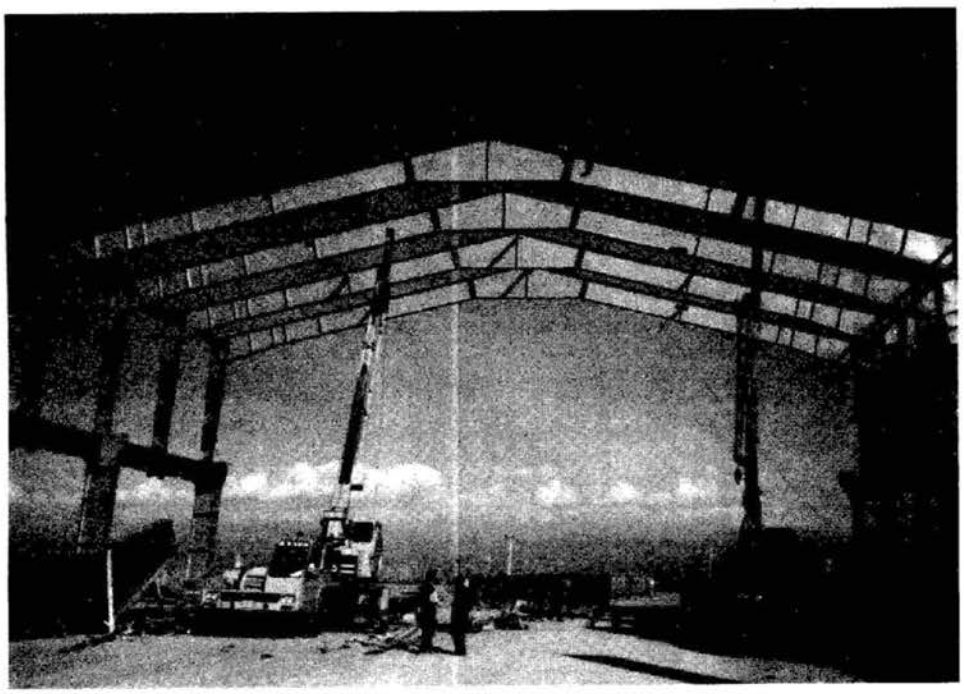
در آخرین مرحله، به‌کمک مهارهای ضربدری موقت و تجهیزات ایجاد کشش مثل تیفور یا دوپیچ، ستون‌ها در وضعیت شاقول قرار گرفته و با خال زدن اتصالات و یا سفت کردن پیچ‌های مونتاژ، تیرها و ستون‌ها در وضعیت نهایی قرار می‌گیرند.

در شکل‌های ۹ ـ ۶۲ تا ۹ ـ ۶۷ تصاویری از مراحل تنظیم نهایی و تکمیل اطلاعات ارایه شده است.

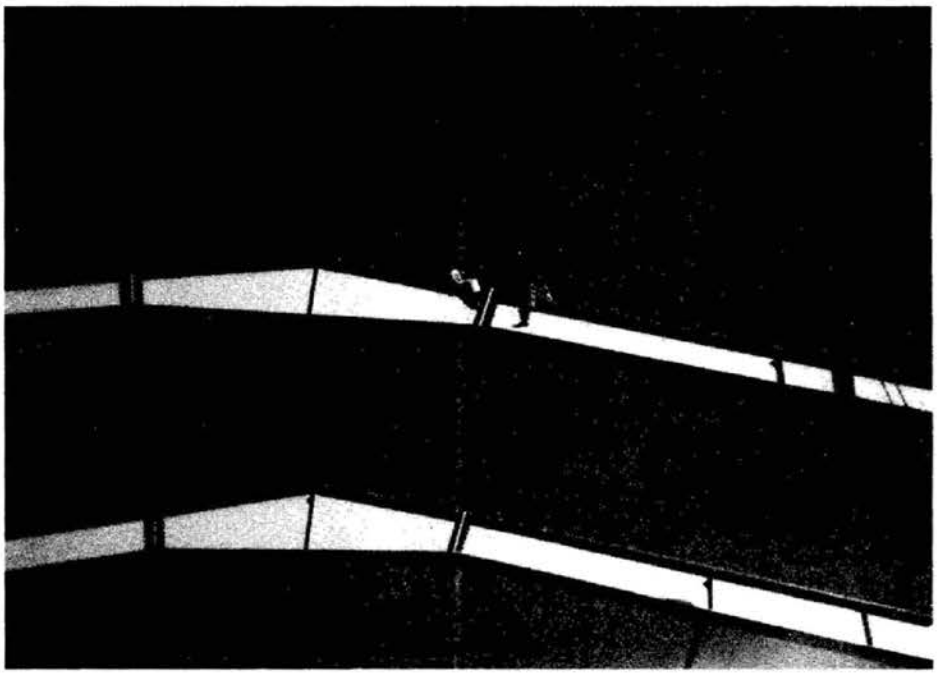


شکل ۹ ـ ۶۰ نصب ستون‌ها و اجرای وصله‌ها.

شکل ۹ ـ ۶۱ نصب و واداشتن ستون‌ها.

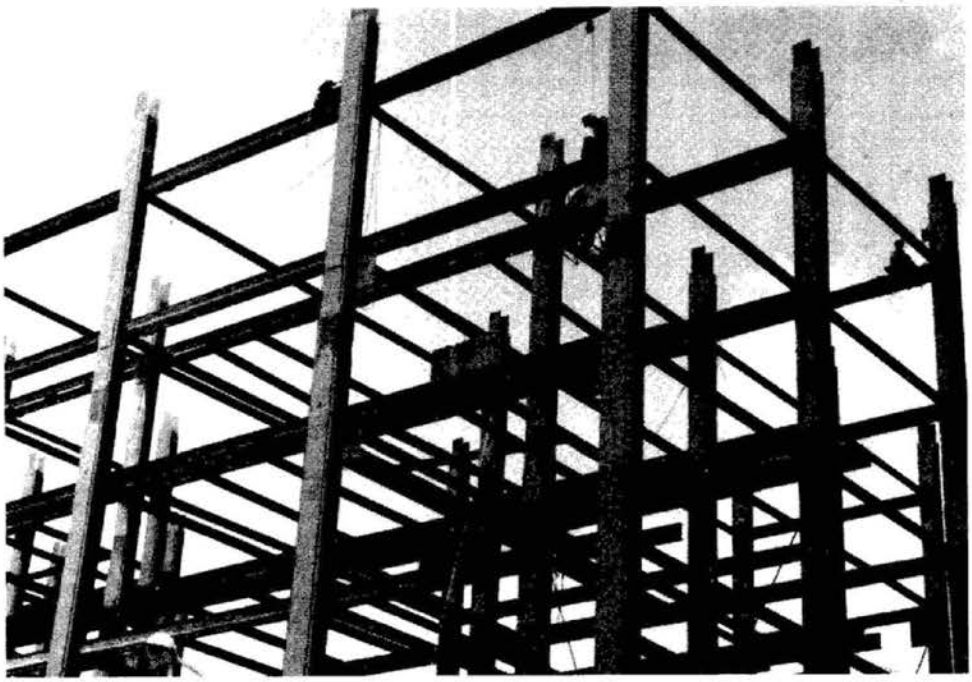


شکل ۹ ـ ۶۲ نصب قاب‌های ساختمان‌های صنعتی.

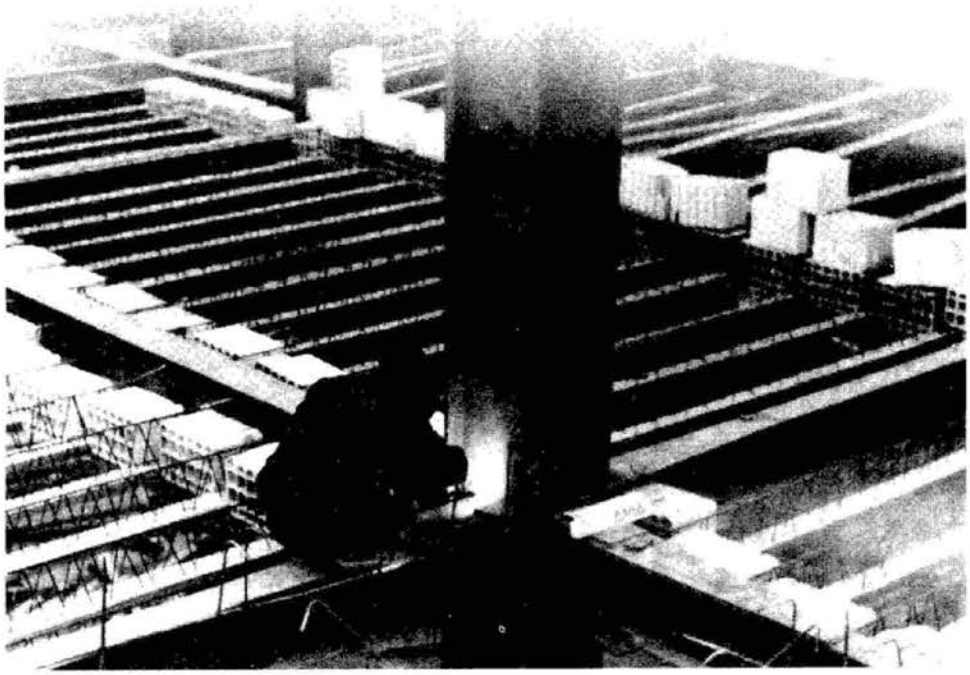


شکل ۹ ـ ۶۳ نصب پیچ‌ها در قاب واداشته شده.

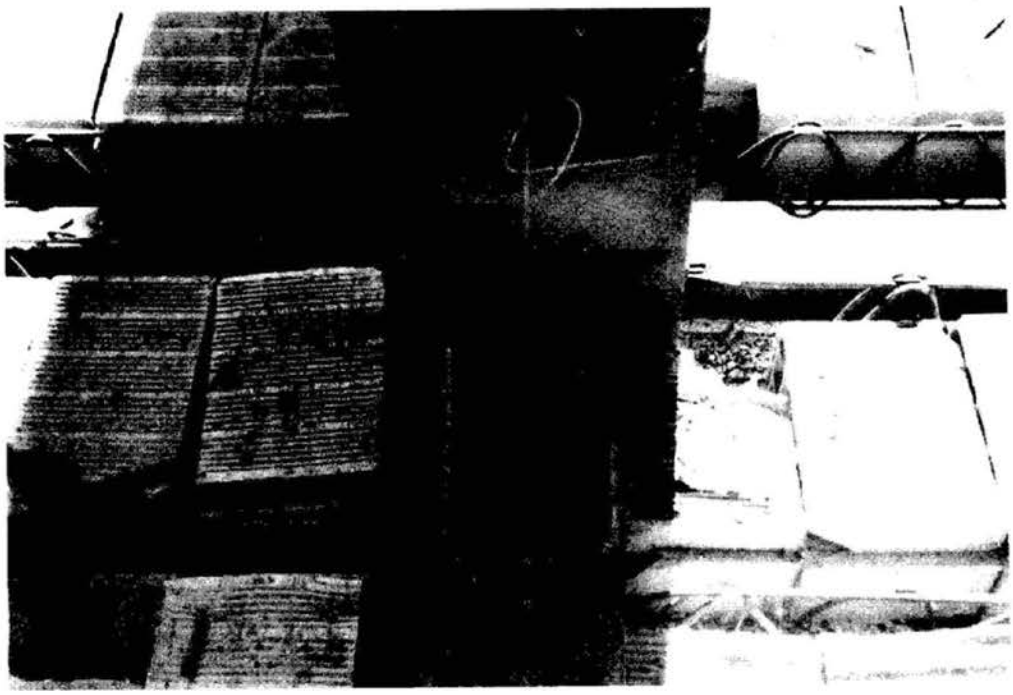
شکل ۹ ـ ۶۴ وصله ستون.



شکل ۹ ـ ۶۵ شاقولی کردن ستون‌ها و هم‌محور کردن تیرها.



شکل ۹ ـ ۶۶ تکمیل اتصال تیر به‌ستون.



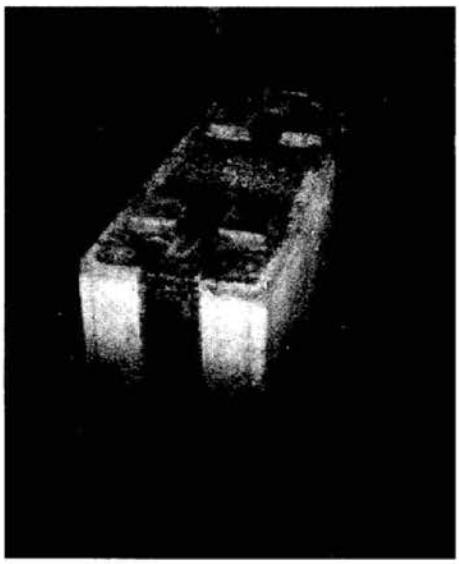
شکل ۹ ـ ۶۷ اتصال تکمیل‌شده.

۹ ـ ۱۰ نصب کف ستون

در انجام عملیات نصب اسکلت، دو روش عمومی برای نصب کف ستون بر روی فونداسیون وجود دارد:

۱ ـ روش سنتی :در این روش که در ساختمان‌سازی متعارف در ایران معمول است، ورق کف ستون به‌صورت جدا از ستون بر روی فونداسیون مستقر می‌گردد. حد فاصل ورق کف ستون و فونداسیون به‌کمک ملات پُر می‌شود. روش کار بدین‌ترتیب است که پس از تمیز کردن سطح فونداسیون و مرطوب کردن آن، ملات پُرسیمان با ضخامت لازم روی فونداسیون پخش شده و ورق کف ستون روی آن قرار گرفته و به‌کمک تراز و دوربین، در وضعیت نهایی خود قرار گرفته و مهره‌های میله مهارها سفت می‌شود. بعد از گرفتن ملات، کف ستون آماده نصب ستون بر روی آن می‌باشد.

۲ ـ روش صنعتی :در این روش کف ستون در کارخانه به‌صورت گونیا به‌پای ستون جوش و یکپارچه می‌شود. برای نصب، ابتدا روی فونداسیون پدگذاری (Pading) می‌شود. پدها ورق‌های ۴×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند که یک شاخک نبشی به‌سطح تحتانی آن جوش شده است. پدها به‌کمک ملات کاملاً در موقعیت مورد نظر، مستقر و تراز می‌شوند. بعد از گرفتن ملات زیر پد، ستون به‌همراه کف ستون روی آنها مستقر شده و با شیم‌گذاری، ستون کاملاً به‌صورت شاقولی در می‌آید و مهره‌های میله مهار سفت می‌شود. در مرحله آخر دور ورق کف ستون قالب‌بندی شده و فضاهای خالی زیر کف ستون به‌کمک ملات خیلی روان ضدانقباض پُر می‌شود (به‌این عمل گروت‌ریزی می‌گویند).



شکل ۹ ـ ۶۸ پدگذاری.

شکل ۹ ـ ۶۹ گروت‌ریزی.

۹ ـ ۱۱ رواداری نصب ستون

حداکثر میزان جابه‌جایی مجاز محور ستون از محل فرضی، مساوی ۶± میلی‌متر می‌باشد.

ناشاقولی مجاز ستون‌ها، تا طبقه بیستم به‌ازای هر طبقه مساوی $\frac{۱}{۵۰۰}$ ارتفاع و حداکثر ۲۵ میلی‌متر به‌سمت نما و ۵۰ میلی‌متر به سمت داخل ساختمان می‌باشد.

۱۰ طراحی جوش

۱۰ـ۱ مقدمه ۳۷۳
۱۰ـ۲ اندازه جوش گوشه ۳۷۳
۱۰ـ۳ محدودیت سایر جوش‌ها ۳۷۷
۱۰ـ۴ جوش شیاری با نفوذ نسبی ۳۷۹
۱۰ـ۵ انواع جوش ۳۸۰
۱۰ـ۶ تنش‌های مجاز جوش ۳۸۰
۱۰ـ۷ ارزش جوش ۳۸۱
۱۰ـ۸ حداکثر اندازه مؤثر ساق جوش گوشه ۳۸۲
۱۰ـ۹ اتصال اعضا با نیروی محوری ۳۸۳
۱۰ـ۱۰ اتصالات جوشی با برون‌محوری ۳۸۶
۱۰ـ۱۱ ترکیب برش و پیچش ۳۸۸
۱۰ـ۱۲ ترکیب برش و خمش ۳۹۲
۱۰ـ۱۳ تخمین طول جوش تحت اثر لنگر خمشی ۳۹۴

۱۰ طراحی جوش

۱۰ ـ ۱ مقدمه

جوش بیش از حد لازم، یکی از عوامل اصلی افزایش هزینه جوشکاری است. تعیین اندازه صحیح جوش اولین گام در کسب جوش اقتصادی است. این موضوع ایجاب می‌کند که روش صحیح و ساده‌ای برای تعیین اندازه جوش که استفاده از آن برای تمام اتصالات ممکن باشد، برقرار گردد.

در اتصال تمام قدرت، از جوش شیاری با نفوذ کامل در تمام طول درز استفاده می‌شود. از آنجایی که جوش شیاری نفوذی اگر به‌طور سالم انجام شود، دارای مقاومتی برابر مصالح اتصال می‌باشد، بنابراین در این حالت نه احتیاج به‌محاسبه تنش در جوش است و نه به‌پیدا کردن اندازه جوش نیازی می‌باشد. اگر جوش شیاری با نفوذ کامل صورت نگیرد، در این صورت لازم خواهد بود که اندازه جوش محاسبه شود. جوش‌های گوشه با اندازه‌ها و طول‌های مختلف می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، که تعیین اندازه‌های مورد نیاز، از اهداف یک برنامه طراحی است.

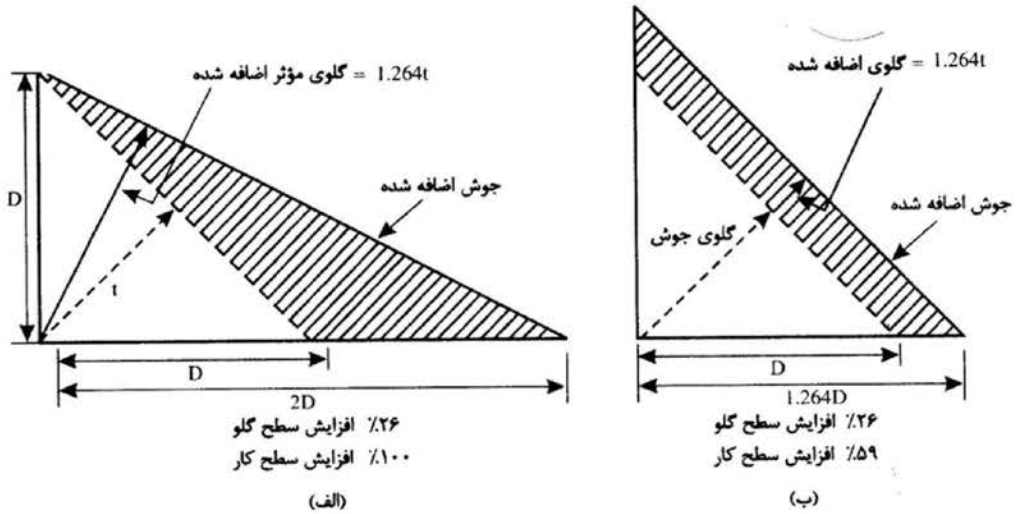
۱۰ ـ ۲ اندازه جوش گوشه

در آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی، سطح مؤثر گلوی جوش گوشه به‌صورت زیر تعریف شده است:

سطح مؤثر گلوی جوش گوشه برابر است با حاصل‌ضرب ارتفاع مؤثر گلو در طول مؤثر جوش، که ارتفاع مؤثر گلوی جوش برابر است با کوچکترین فاصله بین ریشه جوش تا سطح جوش (شکل ۱۰ ـ ۲).

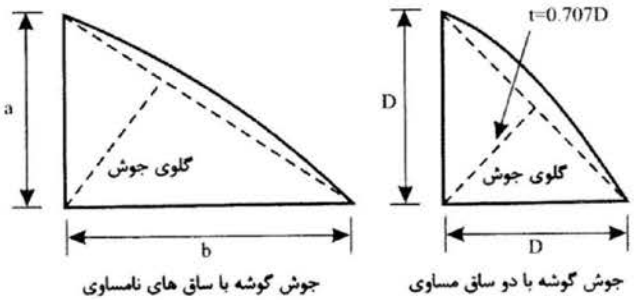
طبق تعریف، اندازه ساق جوش گوشه به‌وسیله بزرگترین مثلث قائم‌الزاویه که در داخل جوش محاط می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. تعریف بالا یک جوش با دو ساق نامساوی را مجاز می‌داند (شکل ۱۰ ـ ۱ ـ الف).

طبق تعریف دیگری، آیین‌نامه تصریح می‌کند که بزرگترین مثلث قائم‌الزاویه متساوی‌الساقین، نشان‌دهنده اندازه ساق جوش خواهد بود. پس این تعریف، جوش گوشه را فقط با ساق‌های مساوی محدود می‌کند (شکل ۱۰ ـ ۱ ـ ب).



شکل ۱۰ ـ ۱

جوش‌های با ساق نامساوی زمانی به‌کار می‌رود که هدف، افزایش سطح گلوی جوش باشد و امکان افزایش اندازه هر دو ساق، نمی‌باشد. به‌همین علت لازم است که فقط اندازه یکی از دو ساق افزایش یابد. البته اگر امکان افزایش اندازه هر دو ساق باشد، باید از به‌کار بردن ساق‌های نامساوی پرهیز کرد، چراکه عمل غیراقتصادی خواهد بود (شکل ۱۰ ـ ۱).

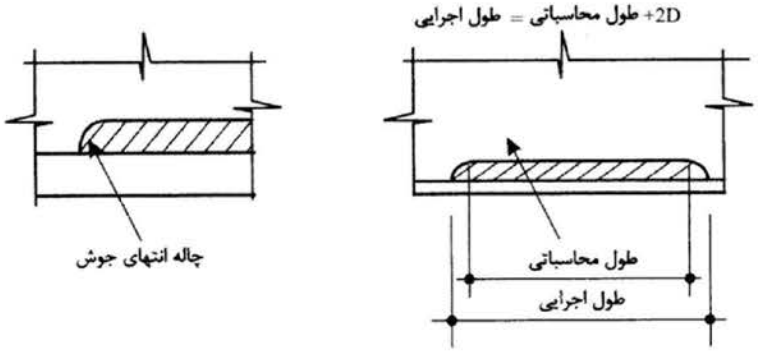


شکل ۱۰ ـ ۲

طول مؤثر جوش گوشه

طول مؤثر جوش، طولی از جوش است که در سر تا سر آن، گلوی جوش کوچکتر از گلوی مؤثر نباشد.

طبق مفاد آیین‌نامه فولاد، انتهای جوش‌های گوشه که معمولاً به‌شکل چاله می‌باشند باید تا سطح مقطع کامل محاسباتی جوش، پر شوند (شکل ۱۰ ـ ۳). در جوش‌های پیوسته عمل پُر کردن چاله انتهای جوش مشکل نخواهد بود، زیرا در این حالت جوشکار در موقع تعویض الکترود همواره چاله انتهایی قبلی را دوباره جوش داده و آن را پُر می‌نماید.



شکل ۱۰ ـ ۳

اما در جوش‌های منقطع برای رفع این مشکل، طول اجرایی جوش را به‌اندازه D در هر طرف از طول محاسباتی بزرگتر در نظر می‌گیرند و بنابراین در طول محاسباتی، جوش دارای سطح مؤثری یکنواخت خواهد بود.

البته در همین جوش‌های منقطع، اگر بتوان چاله‌های ابتدا و انتها را با تدابیر خاصی به‌وسیله جوش پر کرد، طول اجرایی جوشکاری را می‌توان برابر با طول محاسباتی در نظر گرفت. پُر کردن چاله‌ها به‌علت جلوگیری از ترک ستاره‌ای همواره توصیه می‌شود.

حداقل اندازه جوش گوشه

طبق ضوابط آیین‌نامه، حداقل اندازه جوش از جدول ۱۰ ـ ۱ به‌دست می‌آید. این حداقل بر مبنای ورق نازک‌تر می‌باشد که البته اندازه حداقل به‌دست آمده نباید بیشتر از ضخامت ورق نازک‌تر باشد.

جدول ۱۰ ـ ۱ اندازه حداقل جوش گوشه برحسب ضخامت ورق نازک‌تر

حداقل اندازه جوش[1] D (میلی‌متر)	ضخامت ورق نازکتر t (میلی‌متر)
۳	تا ۶ و کوچکتر
۵	بیش از ۶ تا ۱۲
۶	بیش از ۱۲ تا ۲۰
۸	بیش از ۲۰

۱ ـ حداقل به‌دست آمده نباید از ضخامت ورق نازک‌تر بیشتر باشد.

۲ ـ ضخامت‌های نشان داده شده باید با یک‌بار عبور به‌دست آید.

۳ ـ در اتصال بال به‌جان تیر ورق‌ها، حداقل جوش گوشه را می‌توان به‌جوش هم‌مقاومت با جان محدود نمود.

طبق گزارشات فنی، جوش نازکی که در لبه ورق ضخیم داده می‌شود، خیلی سریع سرد می‌شود و به‌همین دلیل شکننده است. علت این امر گرفته شدن حرارت جوش به‌وسیلهٔ ورق می‌باشد.

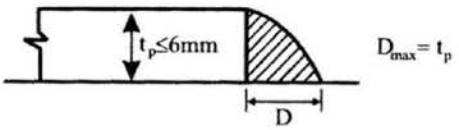
اعداد نوشته‌شده در جدول ۱۰ ـ ۱ نیز برای مراعات همین حقیقت در نظر گرفته شده‌اند. اندازه حداقل

نوشته‌شده در جدول فوق جوشی را به‌ما می‌دهد که حرارت کافی در ورق تولید می‌کند و همین حرارت باعث می‌شود که جوش به‌آرامی سرد شود. با استفاده از پیش‌گرمایش و یا کاربرد الکترودهای کم‌هیدروژن، اثرات نامطلوب جوش‌های کمتر از حداقل را می‌توان کاهش داد.

حداکثر اندازه ساق جوش گوشه (D)

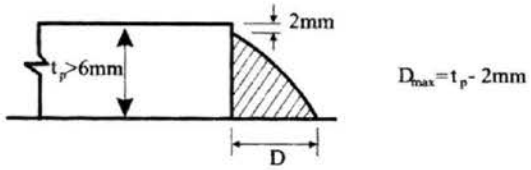
طبق توصیه‌های آیین‌نامه فولاد، حداکثر اندازه مؤثر جوش به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید:

۱ ـ در لبه مصالحی با ضخامت کمتر از ۶ میلی‌متر، حداکثر اندازه ساق جوش گوشه برابر است با ضخامت ورق (شکل ۱۰ ـ ۴).



شکل ۱۰ ـ ۴

۲ ـ در امتداد لبه مصالح با ضخامت بیش از ۶ میلی‌متر، حداکثر اندازه مؤثر جوش گوشه برابر با ضخامت ورق منهای ۲ میلی‌متر است، مگر اینکه در نقشه ذکر شود که اندازه جوش برابر با ضخامت ورق گردد (شکل ۱۰ ـ ۵).

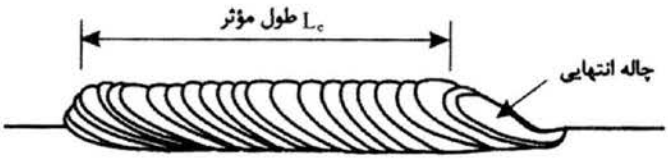


شکل ۱۰ ـ ۵

حداقل طول مؤثر جوش گوشه

حداقل طول مؤثر (L_e) برای جوش گوشه که به‌منظور انتقال نیرو به‌کار می‌رود، نباید کمتر از ۴ برابر اندازه ساق جوش یا ۴۰ میلی‌متر باشد (شکل ۱۰ ـ ۶).

$$L_e \geq 4D \geq 40mm$$

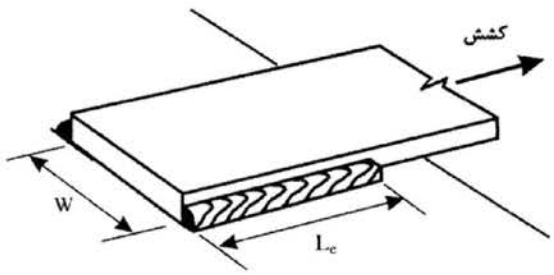


شکل ۱۰ ـ ۶

در صورتی که برای اتصال انتهای میله‌ها یا تسمه‌های تحت کشش، تنها از جوش گوشه استفاده شود، با مراجعه به‌شکل ۱۰ ـ ۷ باید داشته باشیم:

$L_e \geq W$

$W \leq 200\ mm$



شکل ۱۰ ـ ۷

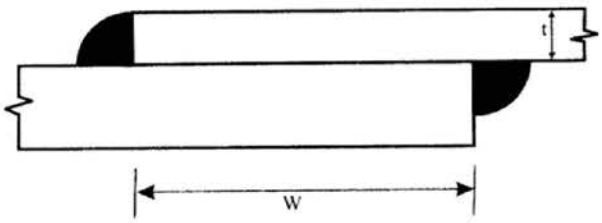
دو شرط بالا همیشه باید برقرار باشند، مگر اینکه جوش‌های اضافی دیگری به‌صورت جوش انگشتانه، خمش عرضی موجود در اتصال را تحمل کند.

۱۰ ـ ۳ محدودیت سایر جوش‌ها

حداقل طول پوششی در اتصالات پوششی

$W \geq 5t \geq 25\ mm$

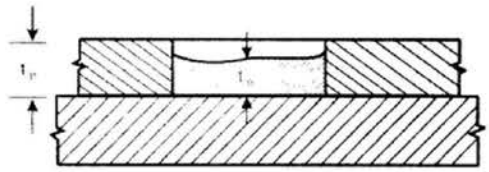
t = ضخامت ورق نازکتر



شکل ۱۰ ـ ۸

ضخامت جوش انگشتانه یا کام توپُر

جوش انگشتانه جوشی است که در سوراخ و جوش کام جوشی است که در شکاف داده می‌شود. از جوش انگشتانه توپُر و کام توپُر می‌توان در اتصالات پوششی به‌منظور انتقال نیروی برشی، جلوگیری از کمانش قطعات اتصال و یا در اتصال قطعات مختلف اعضای ساخته‌شده از چند نیمرخ استفاده نمود. در شکل ۱۰ ـ ۹ ضخامت حداقل جوش انگشتانه و کام، در شکل ۱۰ ـ ۱۰ فواصل و قطر حداقل جوش انگشتانه و در شکل ۱۰ ـ ۱۱، فواصل و ابعاد حداقل جوش کام نشان داده شده است.



شکل ۱۰ ـ ۹ اندازهٔ حداقل جوش انگشتانه و کام.

اگر $t_p \leq ۱۶$ mm :

$$t_w = t_p$$

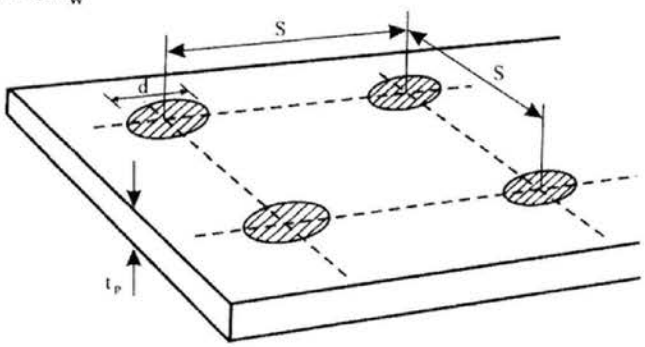
اگر $t_p > ۱۶$ mm :

$$t_w = \text{بزرگترین} \begin{cases} \frac{۱}{۲} t_p \\ ۱۶\text{mm} \end{cases}$$

$s \geq ۴d$

$d \geq t_p + ۸\text{mm} < ۲/۲۵\ t_w$

t_w = ضخامت جوش



شکل ۱۰ ـ ۱۰ فواصل و قطر حداقل جوش انگشتانه[1].

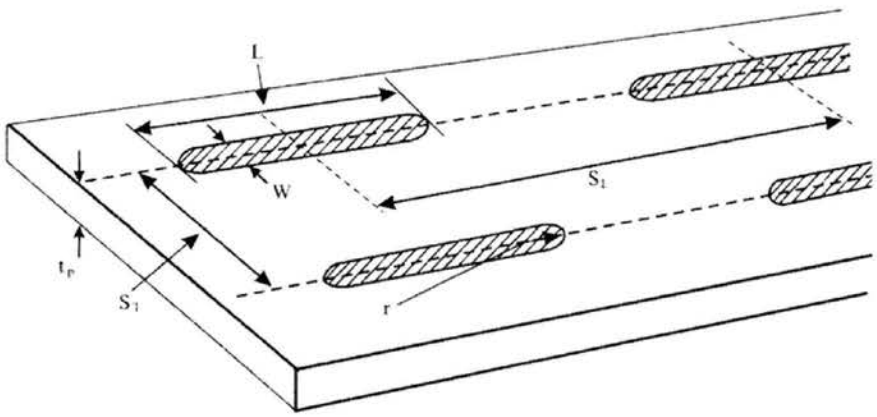
$L \leq ۱۰ \cdot t_w$

$W \geq t_p + ۸\text{mm} \leq ۲/۲۵ t_w$

$S_T \geq ۴W$

$S_L \geq ۲L$

$r \geq t_p$



شکل ۱۰ ـ ۱۱ فواصل و ابعاد حداقل جوش کام[2].

1. Plug weld
2. Slot weld

۱۰ ـ ۴ جوش شیاری با نفوذ نسبی

استفاده از جوش‌های شیاری با نفوذ نسبی در ساختمان‌ها مجاز می‌باشد. این‌گونه جوش‌ها کاربرد زیادی در ساخت اسکلت به‌خصوص ساخت مقاطع قوطی‌شکل یا I از ورق دارند.

ضخامت گلوی مؤثر برای جوش شیاری با نفوذ نسبی

برای هر نوع شکل لبه (جناغی، نیم‌جناغی، لاله‌ای، نیم‌لاله‌ای) اگر جوشکاری به‌صورت جوش خودکار زیرپودری صورت گیرد، ضخامت مؤثر گلوی جوش (t_e) برابر با ضخامت واقعی شیاری خواهد بود که برای جوشکاری مهیا شده است (شکل ۱۰ ـ ۱۲ ـ ب).

اما اگر جوش در کارگاه به‌وسیله جوش دستی انجام گیرد دو حالت اتفاق می‌افتد:

۱ ـ برای تمام شکل لبه‌ها به‌غیر از شکل لبه نیم‌جناغی ضخامت مؤثر گلو، همان ضخامت جوش نیمه‌نفوذی خواهد بود.

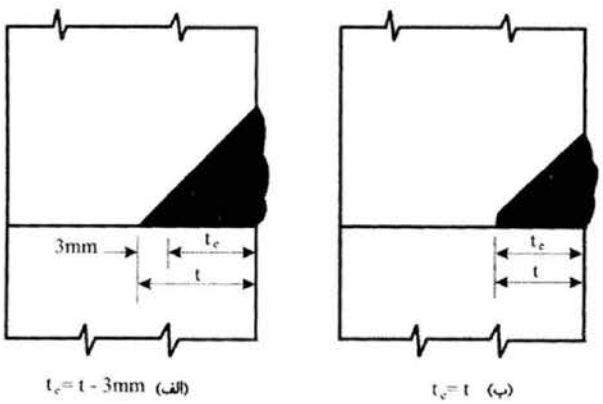
۲ ـ برای شکل لبه به‌صورت نیم‌جناغی چون احتمال می‌رود که جوشکار نتواند ریشه جوش را کامل جوش بدهد، ضخامت مؤثر گلو برابر با ضخامت جوش نیمه‌نفوذی منهای ۳ میلی‌متر خواهد بود (شکل ۱۰ ـ ۱۲ ـ الف). همانند جوش گوشه که اندازه حداقلی برای ورق‌های ضخیم به‌خاطر جلوگیری از سرد شدن سریع جوش دارد، برای جوش‌های شیاری نیمه‌نفوذی نیز ضخامت گلوی مؤثر حداقل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_e \geq \sqrt{\frac{t_p}{۲/۳۵}}$$

که در آن:

t_p= ضخامت ورق نازک‌تر (cm)

t_e= ضخامت گلوی مؤثر حداقل (cm)



شکل ۱۰ ـ ۱۲

۱۰ ـ ۵ انواع جوش

الف) جوش‌های اصلی: جوش‌هایی هستند که به‌منظور انتقال نیرو به‌کار می‌روند. در نقاط اتصال، اگر جوش از بین برود قطعه نیز از بین می‌رود. این‌گونه جوش‌ها باید همان خواصی را دارا باشند که عضو متصل شونده دارد. به‌عبارت بهتر در نقطه اتصال، جوش جایگزین عضو می‌گردد.

ب) جوش‌های فرعی: جوش‌هایی هستند که فقط برای نگه داشتن اعضا در فرم بخصوصی به‌کار می‌روند. نیروهای وارده بر این جوش‌ها بسیار ناچیز می‌باشند.

پ) جوش‌های طولی: جوش‌هایی هستند که نیروهای وارده، موازی محور جوش می‌باشند. در حالت جوش‌های گوشه، گلوی جوش فقط تحت تأثیر تنش‌های برشی قرار می‌گیرد. برای جوش گوشه با ساق‌های مساوی، حداکثر تنش برشی در گلوی جوش اتفاق می‌افتد.

ت) جوش‌های عرضی: جوش‌هایی می‌باشند که در آنها محور جوش و محور نیروی وارده با یکدیگر زاویه ۹۰ درجه می‌سازند. در حالت جوش‌های گوشه، گلوی جوش تحت تأثیر ترکیب تنش‌های برشی و تنش‌های فشاری یا کششی قرار می‌گیرند. برای جوش گوشه با ساق‌های مساوی، حداکثر تنش برشی در گلوی ۶۷/۵ درجه و حداکثر تنش عمودی در گلوی ۲۲/۵ درجه اتفاق می‌افتد.

به‌هر حال در محاسبات مربوط به‌جوش گوشه، عملکرد جوش به‌صورت برشی در نظر گرفته می‌شود. اصولاً بهتر است از جوش گوشه به‌عنوان جوش عرضی تحت کشش استفاده نکرد.

۱۰ ـ ۶ تنش‌های مجاز جوش

جوش‌ها باید طوری محاسبه شوند که محدودیت‌های تنش مندرج در جدول ۱۰ ـ ۲ را با اعمال ضرایب بازرسی زیر جوابگو باشند:

۱ ـ در صورت انجام آزمایش‌های غیرمخرب نظیر پرتونگاری و فراصوت:

$\phi = ۱/۰$

۲ ـ در صورت انجام جوش در کارخانه (و یا شرایط مشابه) و بازرسی چشمی جوش توسط افراد مجرب:

$\phi = ۰/۸۵$

۳ ـ در صورت انجام جوش در محل و بازرسی چشمی جوش توسط افراد مجرب:

$\phi = ۰/۷۵$

۱۰ ـ ۷ ارزش جوش

حاصل‌ضرب گلوی مؤثر جوش در تنش مجاز جوش، ارزش جوش R_w نامیده می‌شود. R_w در واقع نیروی مجاز جوشی با ضخامت گلوی t_w و طول ۱ سانتی‌متر می‌باشد.

به‌عنوان مثال برای جوش گوشه با الکترود E۶۰ ($F_u = ۴۲۰۰ kg/cm^۲$) که در شرایط کارگاهی با $\phi = ۰/۷۵$ اجرا می‌شود، ارزش جوش برابر است با:

$$R_w = (0.3F_u)\phi(t_w) = (0.3\times 4200)0.75\ (0.707D) = 650D$$

D اندازه ساق جوش و t ضخامت گلوی جوش گوشه می‌باشد که طبق رابطه $t = 0.707D$ به‌هم مربوط هستند.

جدول ۱۰ ـ ۲ تنش مجاز روی سطح مؤثر جوش

نوع جوش	نوع تنش روی سطح مؤثر	تنش مجاز	مقاومت جوش مورد نیاز
جوش شیاری با نفوذ کامل	کشش عمود بر سطح مؤثر	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود
	فشار عمود بر سطح مؤثر	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود
	کشش یا فشار موازی محور جوش	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود
	برش روی سطح مؤثر	۰/۳ × مقاومت کششی اسمی فلز جوش، ولی تنش برشی فلز پایه نباید از ۰/۴ × مقاومت تسلیم فلز پایه، تجاوز نماید.	فلز جوشی با مقاومت مساوی یا کمتر از جوش سازگار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
جوش شیاری با نفوذ نسبی	فشار عمود بر سطح مؤثر	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود
	کشش یا فشار موازی محور جوش	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود
	برش موازی محور جوش	۰/۳ × مقاومت کششی اسمی فلز جوش، ولی تنش برشی فلز پایه نباید از ۰/۴ × مقاومت تسلیم فلز پایه، تجاوز نماید.	فلز جوشی با مقاومت مساوی یا کمتر از جوش سازگار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
	کشش عمود بر سطح مؤثر	۰/۳× مقاومت کششی اسمی فلز جوش، ولی تنش کششی فلز پایه نباید از ۰/۶× مقاومت تسلیم فلز پایه، تجاوز نماید.	فلز جوشی با مقاومت مساوی یا کمتر از جوش سازگار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
جوش گوشه	برش روی سطح مؤثر	۰/۳× مقاومت کششی اسمی فلز جوش، ولی تنش برشی فلز پایه نباید از ۰/۴× مقاومت تسلیم فلز پایه، تجاوز نماید.	فلز جوشی با مقاومت مساوی یا کمتر از جوش سازگار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
	کشش یا فشار موازی محور جوش*	مثل فلز پایه	باید از جوش سازگار استفاده شود.
جوش انگشتانه و کام	برش موازی سطوح متصل شده به‌وسیلهٔ جوش (بر روی سطح مؤثر)	۰/۳× مقاومت کششی اسمی فلز جوش، ولی تنش برشی فلز پایه نباید از ۰/۴× مقاومت تسلیم فلز پایه، تجاوز نماید.	فلز جوشی با مقاومت مساوی یا کمتر از جوش سازگار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

* جوش‌های گوشه یا شیاری با نفوذ نسبی که اعضای نیمرخ‌های ساخته‌شده از ورق را به‌یکدیگر اتصال می‌دهند، نظیر جوشی که بال را به‌جان اتصال می‌دهد، می‌توانند بدون توجه به تنش کششی یا فشاری موجود در موازات محور جوش، طراحی گردند.

۱۰ ـ ۸ حداکثر اندازه مؤثر ساق جوش گوشه

مقاومت جوش نباید بیشتر از مقاومت فلز پایه منظور شود. به‌عنوان مثال در شکل ۱۰ ـ ۱۳ حداکثر اندازه مؤثر جوش برحسب ضخامت t در مقطع a-a برابر است با:

ارزش دو خط جوش گوشه با الکترود E۶۰ $= 2(0.3\times4200)\phi\ (0.707D) = 1782\phi D$

مقاومت ورق در برش $= 0.4F_y t$

$$1782\phi D = 0.4F_y t$$

$$D = \frac{0.4F_y t}{1782\phi}$$

با فرض $Fy = 2400\ kg/cm^2$ داریم:

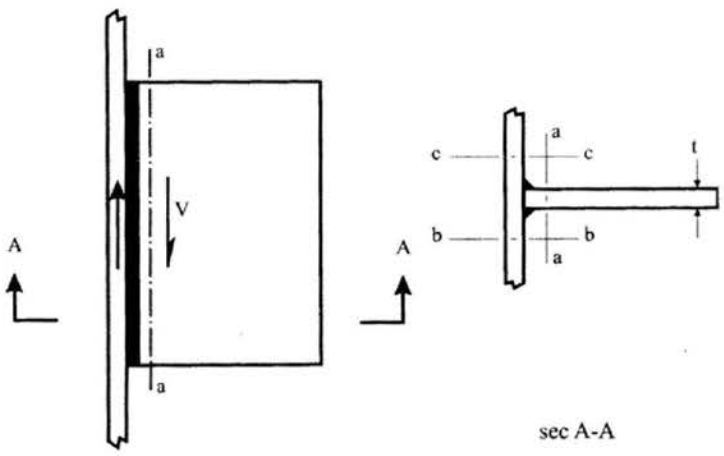
$$D = \frac{0.4\times2400t}{1782\phi} = \frac{0.54}{\phi}t$$

$$\phi = 1 \rightarrow D \cong 0.5t$$

$$\phi = 0.85 \rightarrow D \cong 0.6t$$

$$\phi = 0.75 \rightarrow D \cong 0.7t$$

اندازه‌های ساق معرفی‌شده در فوق، معرف جوش گوشه تمام‌قدرت هستند و اجرای اندازه‌های بزرگتر باعث افزایش بیشتر مقاومت اتصال نمی‌گردد.



شکل ۱۰ ـ ۱۳

۱۰ ـ ۹ اتصال اعضا با نیروی محوری

مثال ۱۰ ـ ۱ جوش گوشه طولی

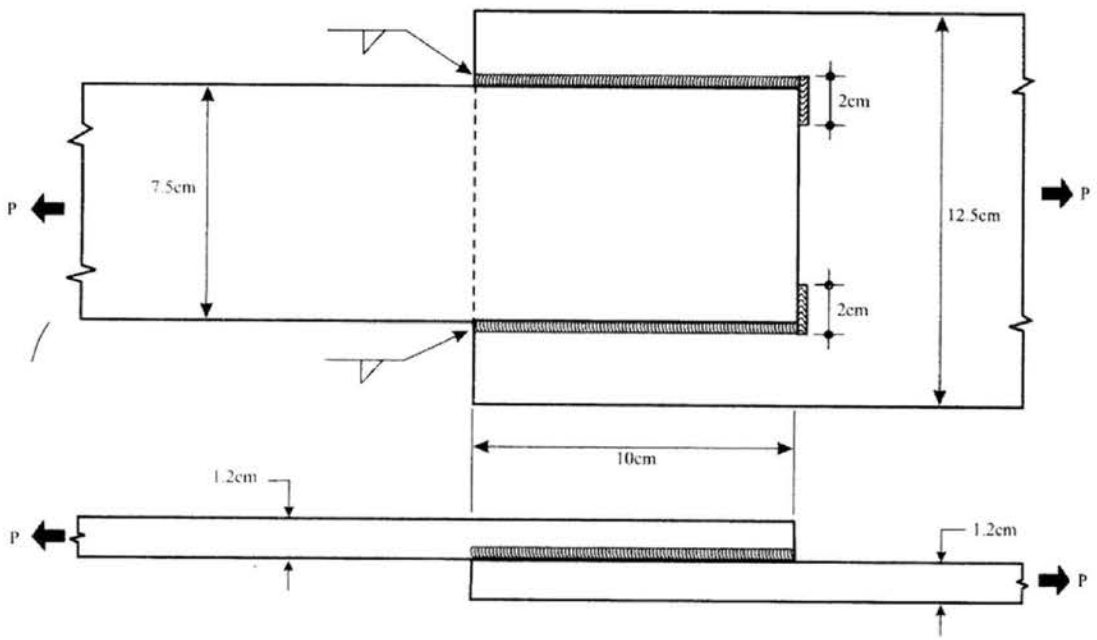
مطلوب است اندازه ساق و طول جوش لازم برای انتقال بار ورق کوچکتر در شکل ۱۰ ـ ۱۴.

$$P = (1400\,kg/cm^2)\times(7.5cm)(1.2cm) = 12600\ kg$$

حداکثر $D = 12 - 2 = 10mm$

ارزش جوش $R_w = 650D = 650\times1.0 = 650\ kg/cm$

طول کلی جوش گوشه $= \dfrac{12600}{650} = 19.39cm$



شکل ۱۰ ـ ۱۴ مربوط به‌مثال ۱۰ ـ ۱

به‌دلیل تقارن، طول جوش هر دو طرف باید یکسان باشد. بنابراین هر طرف به‌اندازه ۱۰ سانتی‌متر جوش داده می‌شود. طول مؤثر جوش باید از بزرگترین سه مقدار زیر بیشتر باشد:

$4D = 4\times1.0 = 4\ cm,\ 4.0\ cm,\ 7.5\ cm$

که در مسئله فوق این شرط برقرار است.

همچنین انتهای جوش‌های گوشه، حداقل به‌اندازه ۲D=۲ cm در انتها برگشت داده می‌شوند (قلاب).

مثال ۱۰ ـ ۲ جوش گوشه عرضی ورق‌های هم‌ضخامت در اتصال پوششی

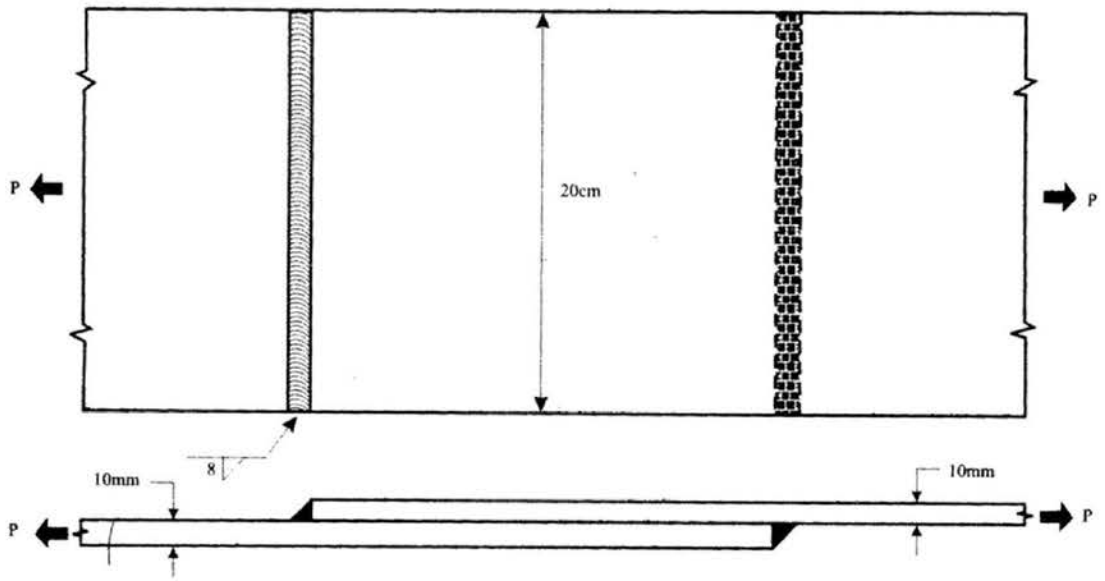
مطلوب است تعیین مقدار بار مجاز قابل انتقال به‌وسیله اتصال شکل ۱۰ ـ ۱۵.

حداکثر $D = 10 - 2 = 8\text{mm}$

جوش $P = 2\times(650D)\times L = 2\times(650\times 0.8)\times 20 = 20800\ \text{kg} = 20.8\ \text{ton}$

ورق $P = (1.0\times 20)\times(1400) = 28000\ \text{kg} = 28\text{ton}$

محاسبات نشان می‌دهد که جوش قادر به‌حمل تمام نیروی ورق نیست و حداکثر ظرفیت مجاز ۲۰/۸ton می‌باشد.



شکل ۱۰ ـ ۱۵ مربوط به‌مثال ۱۰ ـ ۲

مثال ۱۰ ـ ۳ جوش گوشه عرضی ورق‌های غیر هم‌ضخامت در اتصال رویهم

مطلوب است تعیین مقدار بار مجاز قابل حمل به‌وسیله اتصال شکل ۱۰ ـ ۱۶. فرض کنید که جوش‌ها به‌برش کار می‌کنند.

وقتی ورق‌ها، ضخامت‌های نامساوی داشته و به‌وسیله جوش عرضی به‌یکدیگر متصل گردند، میزان کرنش طولی ورق‌ها تحت اثر بار، در حد فاصل بین دو جوش یکسان می‌باشند. این بدان معنی است که در این فاصله تنش در ورق‌هابرابر بوده و در نتیجه نیرو در هر یک متناسب با ضخامت ورق می‌باشد. جوش‌های عرضی در انتهای ورق‌ها باید این نیروها را انتقال دهند، لذا اندازه ساق هر یک باید متناسب با ضخامت ورق باشد.

ظرفیت مجاز ورق ۶ میلی‌متر $P = 1400\times 20\times 0.60 = 16800\text{kg} = 16.8\ \text{ton}$

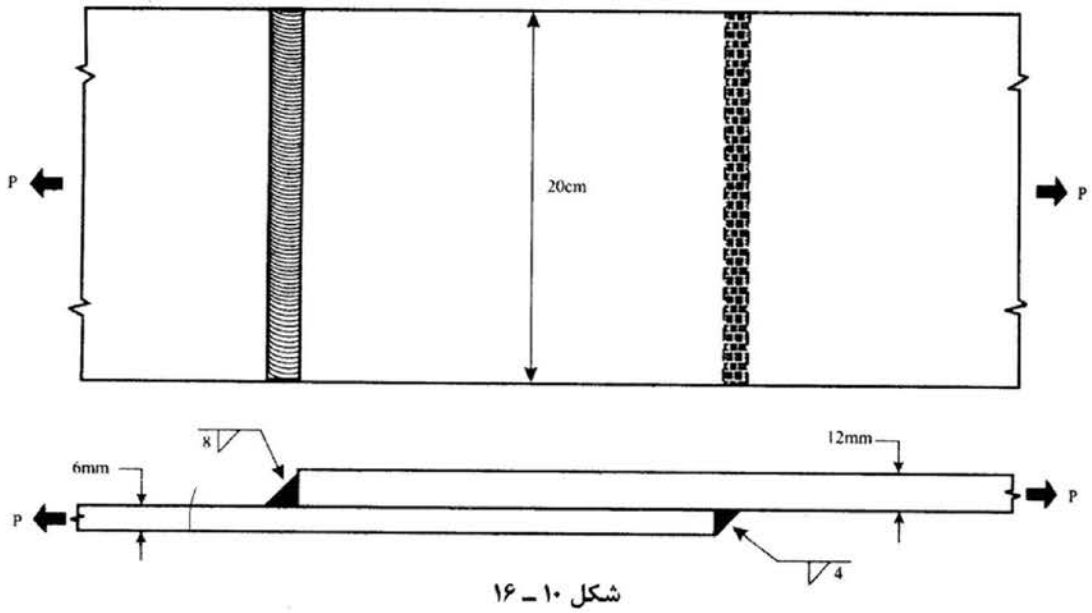
در انتهای ورق ۶ میلی‌متری از جوش گوشه‌ای با D=۴ mm و در انتهای ورق ۱۲ میلی‌متری در تناسب با ضخامت ورق‌ها، از جوش گوشه‌ای با D=۸ mm استفاده می‌شود.

ظرفیت مجاز جوش ۴ میلی‌متری $= 650 \times 0.4 \times 20 = 5200 \text{ kg}$

ظرفیت مجاز جوش ۸ میلی‌متری $= 650 \times 0.8 \times 20 = 10400 \text{ kg}$

ظرفیت مجاز کل جوش $= 5200 + 10400 = 15600 \text{kg} = 15.6 \text{ ton}$

بنابراین بار مجاز حمل، $P = 15.60 \text{ ton}$ خواهد بود.



شکل ۱۰ ـ ۱۶

مثال ۱۰ ـ ۴ اتصال متعادل در انتهای نبشی

مطلوب است تعیین طول و اندازه جوش‌های گوشه‌ای که قادر به‌انتقال ظرفیت کششی مجاز یک نبشی باشد (شکل ۱۰ ـ ۱۷). از جوش گوشه عرضی در انتهای نبشی و جوش‌های متعادل در کناره‌های آن استفاده نمایید.

اندازه نبشی ۱۲× ۱۰۰ × ۱۵۰ بوده که از بال ۱۵ cm به‌ورق متصل شده است. سطح مقطع نبشی $28/7 \text{ cm}^2$ می‌باشد. در نتیجه بار مجاز کششی نبشی برابر است با:

$P = 1400 \times 28.7 = 40180 \text{ kg} = 40.18 \text{ ton}$

اندازهٔ ساق جوش حداکثر $= 12 - 2 = 10 \text{ mm}$

برای سهولت اجرا از جوش ۹ میلی‌متر استفاده می‌شود.

$R_w = 650 \times 0.9 = 585 \text{ kg/cm}$

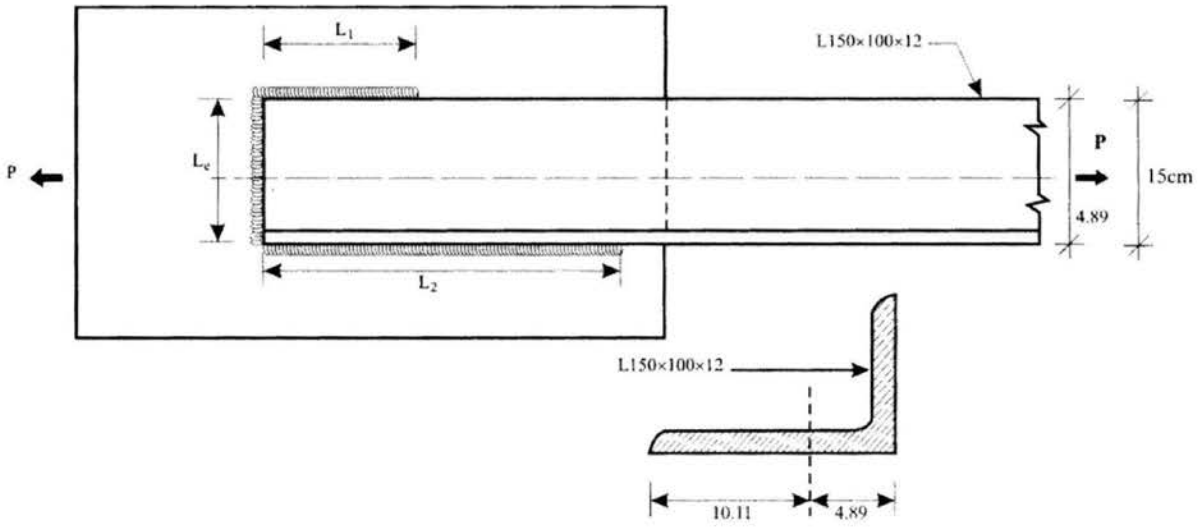
$P_e = 15 \times 585 = 8775 \text{ kg}$ در انتهای نبشی

برای تعیین L_1 حول خط اثر نیروی F_2 لنگر می‌گیریم.

$$(40180) \times (4.89) - (8775) \times (7.5) - (L_1 \times 585) \times (15) = 0 \rightarrow L_1 = 14.89\text{cm} \approx 15\text{cm}$$

برای تعیین L_2 ، از شرط صفر بودن مجموع نیروها در امتداد P استفاده می‌شود.

$$40180 - 8775 - (14.89)\times(585) - (L_2)\times(585) = 0 \rightarrow L_2 = 38.79\text{cm} \approx 40\text{cm}$$



شکل ۱۰ ـ ۱۷

۱۰ ـ ۱۰ اتصالات جوشی با برون‌محوری

کارآیی بسیار زیاد جوش و سادگی جوشکاری، باعث شده که اتصالات جوشی برای موارد استفاده بسیار وسیعی مانند اتصالاتی که تحت بارگذاری‌های ترکیبی شکل ۱۰ ـ ۱۸ قرار دارند، راه‌حل مناسبی باشد.

تحلیل الاستیک دقیق تنش‌ها در اتصال جوشی برون‌محور کاری غیرعملی است. در این مورد از فلسفه مقاومت نهایی با استفاده از تنش‌های مجاز اسمی استفاده می‌شود.

روند عمومی برای تعیین تنش‌های اسمی در گروه جوش‌ها براساس فرضیات عمومی مورد بحث در قبل و قوانین مقاومت مصالح قرار دارد. این روش به‌طور خلاصه از گام‌های زیر تشکیل می‌گردد:

۱ ـ بعد گلوی مؤثر جوش (t_e) را مساوی واحد فرض نموده و مقطعی از گروه جوش‌ها، رسم نمایید.

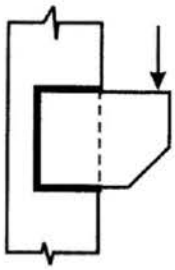
۲ ـ دستگاه مختصاتی تعیین کرده و مرکز هندسی جوش‌ها را به‌دست آورید.

۳ ـ نیروهای وارد بر گروه جوش را تعیین کنید.

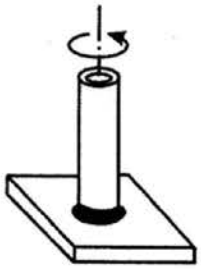
۴ ـ تنش‌های ناشی از برش مستقیم، پیچش و خمش را در نقاط بحرانی جوش با استفاده از روابط معمول مقاومت مصالح، به‌طور مستقل از هم پیدا کنید. در جدول ۱۰ ـ ۳ روابط مقاومت مصالح و روابط مورد استفاده در تعیین تنش جوش‌ها نشان داده شده است.

۵ ـ تنش‌های به‌دست آمده در یک نقطه را جمع‌برداری نمایید.

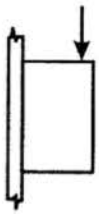
روش عمومی که در فوق ذکر شد، در مثال‌های بعد مورد استفاده قرار گرفته است.

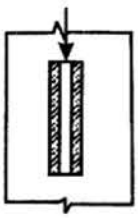


(الف) برش و پیچش



(ب) پیچش خالص

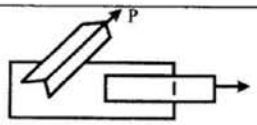
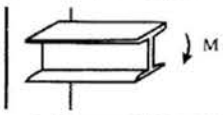
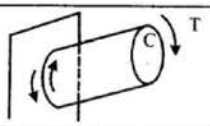
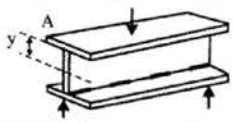




(پ) برش و خمش

شکل ۱۰ ـ ۱۸ انواع بارگذاری‌های خارج از مرکز.

جدول ۱۰ ـ ۳ روابط مقاومت مصالح و روابط تعیین تنش در جوش

نوع بارگذاری		رابطهٔ عمومی تنش	رابطهٔ نیروی واحد طول خط جوش
	جوش‌های اصلی		
	کشش یا فشار	$\sigma = \frac{P}{A}$	$f = \frac{P}{A_w}$
	برش عمودی	$\tau = \frac{V}{A}$	$f = \frac{V}{A_w}$
	خمش	$\sigma = \frac{M}{Z}$	$f = \frac{M}{Z_w}$
	پیچش	$\tau = \frac{TC}{J}$	$f = \frac{TC}{J_w}$
	جوش‌های فرعی		
	برش عمودی	$\tau = \frac{VAy}{I_t}$	$f = \frac{VAy}{I_n}$

۱۰ ـ ۱۱ ترکیب برش و پیچش

شکل ۱۰ ـ ۱۹ ـ الف، اتصال لچکی را نشان می‌دهد که تحت اثر نیروی برشی و لنگر پیچشی قرار دارد. مقطع مؤثر و سیستم نیروهای وارده، در شکل ۱۰ ـ ۱۹ ـ ب، به‌نمایش در آمده است. با استفاده از روابط مقاومت مصالح، تنش ناشی از نیروهای فوق برابر است با:

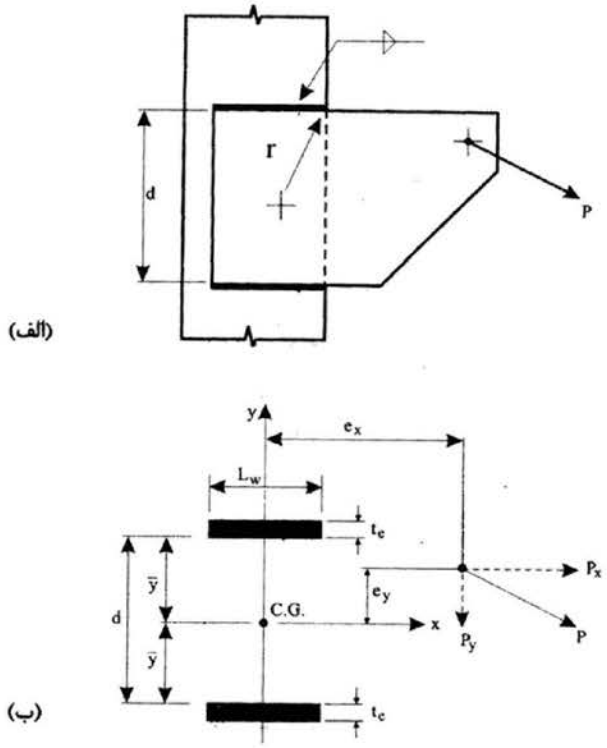
$$f' = \frac{P}{A} = \quad \text{تنش ناشی از نیروی برشی}$$

$$f'' = \frac{T.r}{I_p} = \quad \text{تنش ناشی از لنگر پیچشی}$$

که در آن:

r = فاصله شعاعی از مرکز هندسی تا نقطهٔ محاسبه تنش

I_p = لنگر اینرسی قطبی سطح مقطع مؤثر جوش‌ها



شکل ۱۰ ـ ۱۹

برای محاسبه تنش اسمی، محل خط‌های جوش به‌جای مرکز گلوی مؤثر، در لبه جوش‌های گوشه در نظر گرفته می‌شوند. این امر تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی‌نمایند.

برای حالت عمومی که در شکل ۱۰ـ۱۹ـ ب، به‌نمایش درآمده، مؤلفه‌های تنش در اثر نیروی برشی مستقیم عبارتند از:

$$f'_x = \frac{P_x}{A}$$
$$f'_y = \frac{P_y}{A}$$

مؤلفه‌های x و y تنش "f حاصل از پیچش عبارتند از:

$$f''_x = \frac{Ty}{I_p} = \frac{(P_x e_y + P_y e_x)y}{I_p}$$
$$f''_y = \frac{Tx}{I_p} = \frac{(P_x e_y + P_y e_x)x}{I_p}$$
$$I_p = I_x + I_y$$
$$I_x = 2Ad^2 = 2L_w t y^2$$
$$l_y = 2t\frac{L^3_w}{12} = \frac{1}{6}tL^3_w$$
$$I_p = \frac{tL_w}{6}(L^2_w + 12y^2)$$

با استفاده از نمادهای شکل ۱۰ ـ ۲۰، رابطه فوق به‌صورت زیر در می‌آید:

$$I_p = \frac{bt}{6}(b^2 + 3d^2)$$

بنابراین پس از تعیین مؤلفه‌های پیچشی، مؤلفه‌های x و y برآیند تنش‌ها عبارتند از:

$$f_x = f'_x + f''_x$$
$$f_y = f'_y + f''_y$$

و برآیند تنش عبارت است از:

$$f_r = \sqrt{(f_x)^2 + (f_y)^2}$$
$$= \sqrt{(f'_x + f''_x)^2 + (f'_y + f''_y)^2}$$

تنش برآیند به‌دست آمده، باید از مقدار تنش مجاز جوش کمتر باشد:

$$f_r < F \text{ مجاز جوش}$$

با توجه به‌مجهول بودن t ، برای محاسبه تنش در گروه جوش‌ها، I_p و سایر مشخصات هندسی مورد لزوم را می‌توان با روشی شبیه آنچه در تعیین مشخصات شکل ۱۰ ـ ۱۹ مورد استفاده قرار گرفت، منتها با فرض t=۱ به‌دست آورد. پس از تعیین f_r برای ضخامت واحد، آن را می‌توان مساوی ارزش جوش قرار داده و ضخامت مؤثر مورد نیاز را محاسبه نمود:

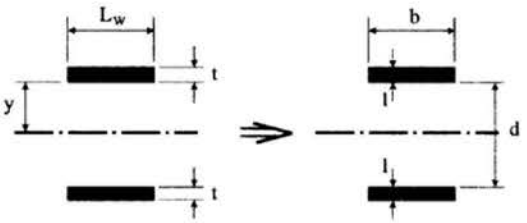
$$f_r = R_w = 650D$$

از معادلهٔ فوق به‌دست می‌آید:

$$D = f_r / 650$$

اگر جوش‌های تشکیل‌دهنده مقطع شکل ۱۰ ـ ۱۹ را با ضخامت واحد فرض نماییم، با استفاده از نمادهای عام b و d (شکل ۱۰ ـ ۲۰) رابطه ممان اینرسی قطبی به‌این صورت در می‌آید:

$$I_p = \frac{b}{6}(b^2 + 3d^2)$$



شکل ۱۰ ـ ۲۰ فرض جوش به‌عنوان شکل‌های مرکب ازخطوط با ضخامت واحد.

در جدول ۱۰ ـ ۴ مقادیر I_p و سایر مشخصات هندسی، برای شکل‌های معمول جوش، ارائه شده است.

مثال ۱۰ ـ ۵

اندازه جوش گوشه مورد نیاز برای استفاده در اتصال شکل ۱۰ ـ ۲۱ را با فرض استفاده از الکترود E60 با تنش‌های مجاز آیین‌نامه فولاد ایران به‌دست آورید. در طرح اتصال ضخامت ورق تعیین کننده نبوده، جوش ظرفیت اتصال را کنترل می‌نماید.

حل:

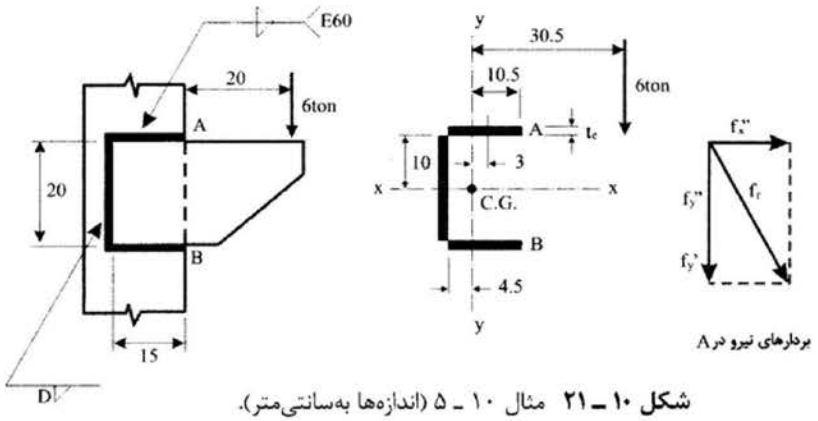
حداکثر تنش در گروه جوش‌ها، در نقاط A و B اتفاق می‌افتد.

با استفاده از ردیف پنجم جدول ۱۰ ـ ۴ مختصات مرکز هندسی و ممان اینرسی قطبی جوش تعیین می‌شود:

$$b = 15\text{cm} \quad , \quad d = 20\text{cm}$$

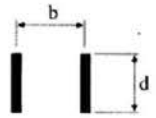
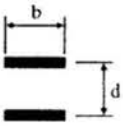
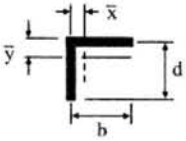
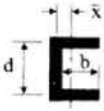
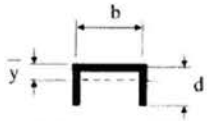
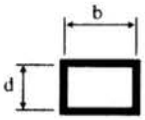
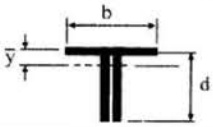
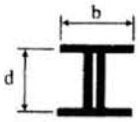
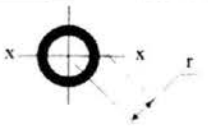
$$\overline{x} = \frac{(15)(15)}{2(15)+20} = 4.5\text{cm}$$

$$I_p = \frac{8(15)^3 + 6(15)(20)^2 + 20^3}{12} - \frac{15^4}{2(15)+20} = 4904.2\ \text{cm}^3$$



شکل ۱۰ ـ ۲۱ مثال ۱۰ ـ ۵ (اندازه‌ها به‌سانتی‌متر).

جدول ۱۰ ـ ۴ مشخصات هندسی جوش‌ها با ضخامت مؤثر واحد

ردیف	شکل مقطع	مختصات مرکز هندسی	اساس مقطع =S	لنگر اینرسی قطبی = I_p حول مرکز هندسی
۱		—	$S=\frac{d^2}{6}$	$I_p=\frac{d^3}{12}$
۲		—	$S=\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{d(3b^2+d^2)}{6}$
۳		—	$S=bd$	$I_p=\frac{b(3d^2+b^2)}{6}$
۴		$\bar{x}=\frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y}=\frac{d^2}{2(b+d)}$	$S=\frac{4bd+d^2}{6}$	$I_p=\frac{(b+d)^4-6b^2d^2}{12(b+d)}$
۵		$\bar{x}=\frac{b^2}{2b+d}$	$S=bd+\frac{d^2}{6}$	$I_p=\frac{8b^3+6bd^2+d^3}{12}-\frac{b^4}{2b+d}$
۶		$\bar{y}=\frac{d^2}{(b+2d)}$	$S=\frac{2bd+d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+6b^2d+8d^3}{12}-\frac{d^4}{2d+b}$
۷		—	$S=bd+\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{(b+d)^3}{6}$
۸		$\bar{y}=\frac{d^2}{b+2d}$	$S=\frac{2bd+d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+8d^3}{12}-\frac{d^4}{b+2d}$
۹		—	$S=bd+\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+3bd^2+d^3}{6}$
۱۰		—	$S=\pi r^2$	$I_p=2\pi r^3$

$$A = 2(15) + 20 = 50\,cm$$

$$f'_y = \frac{P}{A_p} = \frac{6\times1000}{(50)} = 120\ kg/cm$$

$$f''_x = \frac{T.y}{I_p} = \frac{(6\times1000)(30.5)(10)}{4904.2} = 373.15\ kg/cm$$

$$f''_y = \frac{T.x}{I_p} = \frac{(6\times1000)(30.5)(10.5)}{4904.2} = 391.81 kg/cm$$

جمع‌برداری تنش‌ها، برآیند f_r را به‌دست می‌دهد.

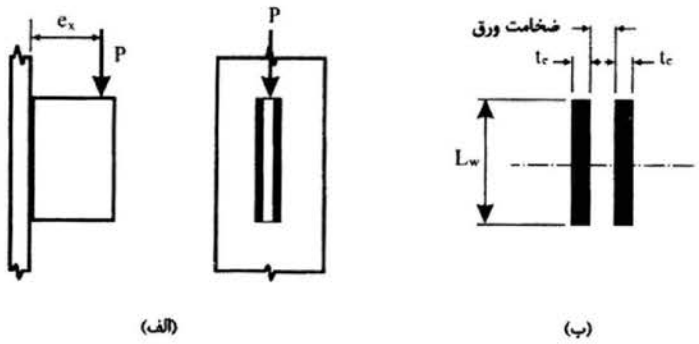
$$f_r = \sqrt{(373.15)^2 + (120+391/81)^2} = 633.40\ kg/cm$$

با مساوی قرار دادن f_r با حداکثر مقدار مجاز آن به‌دست می‌آوریم:

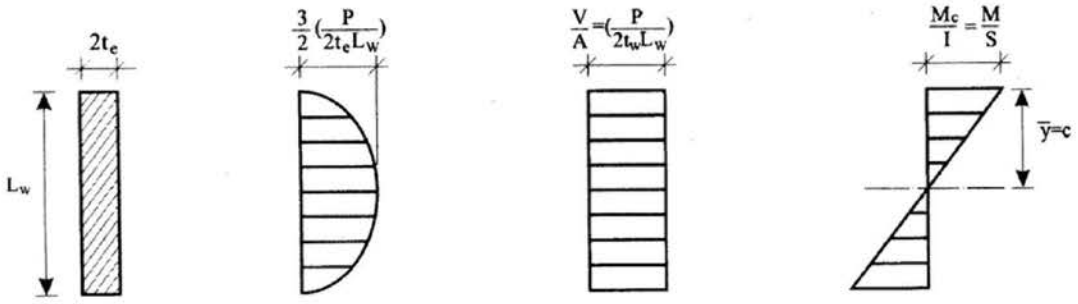
$$633.4 = 650D \rightarrow D = 0.974 \quad \text{بگوییم} \quad D = 10\,mm$$

۱۰ ـ ۱۲ ترکیب برش و خمش

ترکیب تنش‌های برشی و خمشی از جمع‌برداری تنش‌های اسمی برشی و خمشی به‌دست می‌آید. نحوه عمل با مثال تیغه نشیمن شکل ۱۰ ـ ۲۲ ـ الف و مقطع مؤثر گروه جوش‌های آن در شکل ۱۰ ـ ۲۲ ـ ب، به‌نمایش در آمده است. شکل ۱۰ ـ ۲۳ نمایشگر تغییرات تنش برشی و خمشی می‌باشد. باید متوجه این موضوع بود که حداکثرهای تنش برشی و خمشی در یک محل از جوش اتفاق نمی‌افتند. لیکن به‌منظور ساده کردن محاسبات، فرض می‌شود تنش برشی اسمی همانند شکل ۱۰ ـ ۲۳ ـ پ، توزیع می‌گردد. سپس حداکثر تنش خمشی با تنش برشی اسمی جمع‌برداری می‌گردد.



شکل ۱۰ ـ ۲۲ جوش تحت اثر توأم برش و خمش.



شکل ۱۰ ـ ۲۳ تنش روی خطوط قائم جوش تحت اثر برش و خمش.

برای این مورد خاص، تنش برشی قائم برابر است با:

$$f'_y = \frac{P}{A} = \frac{P}{2tL_w}$$

و تنش قائم ناشی از خمش عبارت است از:

$$f''_x = \frac{Mc}{I} = \frac{(Pe_x)(L_w/2)}{\left[\frac{2t(L_w)^3}{12}\right]} = \frac{3pe_x}{t(L_w)^2}$$

$$f_r = \sqrt{(f'_y)^2 + (f''_x)^2}$$

برآیند تنش‌ها به‌صورت زیر در می‌آید:

برای مؤلفه خمشی تنش ممان اینرسی I برحسب محور خمش، ممکن است I_x یا I_y باشد. مقادیر I را می‌توان به‌طریقی مشابه I_p ، برای شکل‌های مختلف جوش که از خطوطی به‌عرض واحد تشکیل داده‌اند به‌دست آورد. برای بعضی شکل‌های متداول مقدار $S = \frac{I}{c}$ در جدول ۱۰ ـ ۴ داده شده است.

مثال ۱۰ ـ ۶

اندازه ساق جوش لازم برای اتصال نمایش داده شده در شکل ۱۰ ـ ۲۴ ـ الف را با استفاده از الکترود E60 با تنش مجاز آیین‌نامه فولاد ایران و جوشکاری به‌روش جوش قوس الکتریکی با الکترود روکش‌دار به‌دست آورید. فرض کنید که نیمرخ ستون و ورق مورد استفاده، طرح را کنترل نمی‌کند.

حل:

تنش متوسط برشی با فرض اندازه جوش مساوی ۱ سانتی‌متر عبارت است از:

$$f'_y = \frac{P}{A} = \frac{5\times1000}{2(26)} = 96.15 \text{ kg.cm}$$

$$I_x = \frac{2(1)\times(26)^3}{12} 2929.33 \text{ cm}^3$$

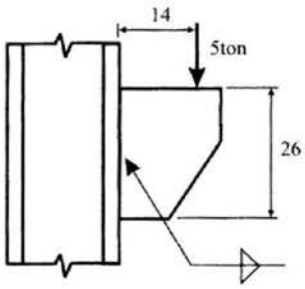
$$f_x = \frac{Mc}{I} = \frac{(5\times1000)(14)13}{2929.33} = 310.65 \text{ kg.cm}$$

$$f_r = \sqrt{(96.15)^2 + (310.65)^2} = 325.19 \text{ kg.cm}$$

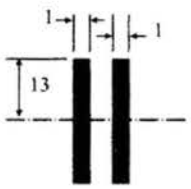
اندازه ساق جوش برابر می‌شود با:

$$650D = 325.19 \rightarrow D = 0.5 \text{ cm} = 5\text{mm}$$

استفاده شود از جوش ۵ میلی‌متری با الکترود E60 یا معادل آن.



(الف) تیغه نشیمن



(ب) سطح مقطع فرضی جوش

شکل ۱۰ ـ ۲۴ مربوط به‌مثال ۱۰ ـ ۶ (تمام اندازه‌ها به‌سانتی‌متر).

۱۰ ـ ۱۳ تخمین طول جوش تحت اثر لنگر خمشی

برای تخمین طول جوش گوشه مورد نیاز، در اتصالاتی که تحت اثر لنگر خمشی به‌علت نیروی خارج از مرکز می‌باشند، می‌توان روش زیر را به‌کار برد. اگر f_r برآیند تنش‌های وارده بر جوشی با t_e=۱ باشد، برای لنگری که تنها روی یک خط جوش اثر کرده می‌توان نوشت:

$$f_r = \frac{M}{S} = \frac{M}{(\frac{1}{6}L_w^2)}$$

چون حداکثر مقادیر f_r مساوی R_w می‌باشد:

$$R_w = \frac{6M}{L_w^2}$$

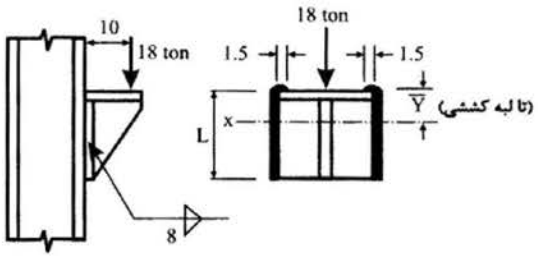
یا

$$L_w = \sqrt{\frac{6M}{R_w}}$$

از آنجا که این رابطه برای لنگر تنها صادق است، مقدار R_w ای که در عبارت فوق جاگذاری می‌شود را باید برای به‌حساب آوردن اثر برش مستقیم مقداری کاهش داد.

مثال ۱۰ ـ ۷

طول جوش مورد نیاز برای تحمل بار شکل ۱۰ ـ ۲۵ را با فرض استفاده از جوش گوشه‌ای به‌اندازه ساق ۸ میلی‌متر با الکترود E60 و تنش‌های مجاز آیین‌نامه فولاد ایران به‌دست آورید.



شکل ۱۰ ـ ۲۵ مثال ۱۰ ـ ۷ (اندازه‌ها به‌سانتی‌متر).

حل:

برای تخمین L با استفاده از رابطه قبل:

$$R_w = 650 \times 0.8 = 520 \text{ kg.cm}$$

$$M = 18(10) = 180 \text{ ton.cm} \qquad \text{(بر دو خط جوش)}$$

$$L = \sqrt{\frac{6M}{R_w}} = \sqrt{\frac{6(180 \times 1000)}{520}} = 45.57 \text{ cm}$$

L را مساوی ۳۵ سانتی‌متر با دو خط جوش با برگشت ۱/۵ سانتی‌متر در نظر می‌گیریم. با استفاده از حالت ۸ جدول ۱۰ ـ ۴ داریم:

$$b = 3\text{cm} \qquad d = 35 \text{ cm}$$

$$\text{(از بالا)} \quad \bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d} = \frac{35^2}{3 + 70} = 16.78 \text{ cm}$$

$$S_t = \frac{2bd + d^2}{3} = \frac{2 \times 3 \times 35 + 35^2}{3} = 478.33 \text{ cm}^3$$

$$A = 2d + b = 2 \times 35 + 3 = 73 \text{ cm}$$

(برش مستقیم) $f = \frac{18000}{73} = 246.58 \text{ kg.cm}$

(خمش) $f = 180000 / 478.33 = 376.31 \text{ kg.cm}$

$f_r = \sqrt{246.58^2 + 376.31^2} = 449.9 \text{ kg.cm}$

$R_w = 650 \times 0.8 = 520 \text{ kg.cm} > 449.9$ خوبست

۱۱ طراحی اتصالات

۱۱ـ۱ معرفی ۳۹۹
۱۱ـ۲ اتصال سادهٔ تیر با نبشی جان ۴۰۳
۱۱ـ۳ اتصال سادهٔ تیر با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر ۴۰۷
۱۱ـ۴ اتصال سادهٔ تیر با نشیمن تقویت‌شده ۴۱۱
۱۱ـ۵ اتصالات صلب تیر به‌ستون ۴۲۱
۱۱ـ۶ وصلهٔ تیرها ۴۶۴
۱۱ـ۷ وصلهٔ ستون‌ها ۴۷۰
۱۱ـ۸ اتصال مهاربندی همگرا ۴۷۷
۱۱ـ۹ اتصالات پای ستون (کف ستون) ۵۰۶
۱۱ـ۱۰ اتصالات لوله‌ها و قوطی‌ها ۵۳۲

۱۱ـ۱ معرفی

۱۱ـ۱ـ۱ انواع اتصالات

مبحث دهم از مقررات ملی ساختمانی ایران، ساختمان‌های فولادی را برحسب نوع اتصالاتی که در آنها به‌کار می‌رود به‌سه دسته تقسیم می‌کند. این سه دسته عبارتند از:

الف) ساختمان‌های نوع ۱، قاب‌های صلب : در این نوع ساختمان‌ها پیوستگی کامل در محل اتصالات برقرار می‌باشد، به‌این ترتیب که زاویه اولیه بین اعضای متقاطع در محل اتصال، ثابت نگاه داشته می‌شود. این عمل با تأمین درجه صلبیت چرخشی در حدود ۹۰ درصد یا بیشتر که برای جلوگیری از تغییر زاویه ضرورت دارد، انجام می‌پذیرد.

ب) ساختمان‌های نوع ۲، قاب‌های ساده : در این نوع ساختمان‌ها صلبیت چرخشی در انتهای اعضا در حدی که عملاً امکان آن وجود دارد، پایین نگاه داشته می‌شود. اگر زاویه اصلی بین اعضای متقاطع امکان تغییری تا حدود ۸۰ درصد مقدار چرخش نظری اتصال مفصلی و کاملاً بدون اصطکاک را دارا باشد، اتصال این اعضا را می‌توان ساده محسوب نمود.

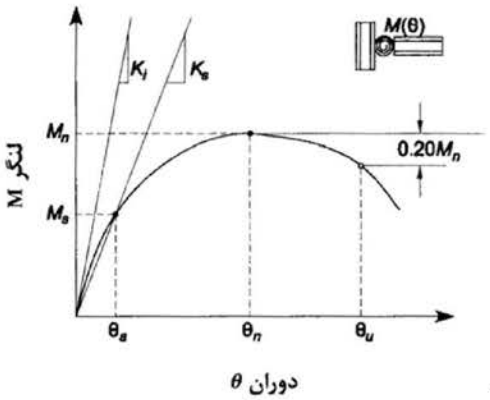
پ) ساختمان‌های نوع ۳، قاب‌های نیمه‌صلب : در این نوع اتصالات، صلبیت چرخشی بین ۲۰ تا ۹۰ درصد صلبیت لازم برای جلوگیری از هرگونه تغییر زاویه می‌باشد. به‌عبارت دیگر می‌توان فرض کرد که در اتصالات نیمه‌صلب لنگر انتقالی توسط اتصال، نه مانند اتصالات ساده صفر (یا مقداری کوچک) است و نه مساوی لنگر به‌دست آمده از تحلیل الاستیک قاب صلب می‌باشد. محدودیت استفاده از این نوع اتصال عمدتاً به‌خاطر اشکالاتی است که در تخمین صحیح درجه صلبیت آنها وجود دارد.

۱۱ ـ ۱ ـ ۲ نمودار لنگر ـ چرخش اتصال

مشخصه اصلی هر اتصال، نمودار لنگر ـ چرخش آن می‌باشد. برای رسم این نمودار باید نمونه‌ای از اتصال ساخته شده و با انجام آزمایش بر روی آن، نمودار $M-\theta$ برای آن رسم گردد. صلبیت اتصال را می‌توان توسط شیب منحنی $M-\theta$ تعیین نمود. از آنجا که رفتار غیرخطی حتی در مقدارهای ناچیز لنگر ـ انحنا خود را آشکار می‌سازد، سختی اولیهٔ اتصال نمی‌تواند شاخص مناسبی برای بررسی پاسخ سازه در شرایط بهره‌برداری باشد. علاوه‌بر این بعضی از اتصالات سختی اولیهٔ قابل اطمینانی از خود نشان نمی‌دهند و یا اینکه آن را تنها در لنگرهای بسیار کوچک نمودار می‌سازند. به‌همین دلیل شیب سکانتی منحنی لنگر ـ انحنا به‌عنوان شاخص صلبیت اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر K_s برابر است با M_s/θ_s که M_s و θ_s به‌ترتیب لنگر و دوران در بار بهره‌برداری هستند.

برای تعیین میزان صلبیت اتصال از شاخص $\alpha = K_s L/EI$ استفاده می‌شود که در آن L دهانه و EI سختی خمشی تیر و K_s شیب منحنی $M-\theta$ است. اگر این مقدار بزرگتر از ۲۰ باشد، اتصال صلب و اگر کوچکتر از ۲ باشد اتصال مفصلی در نظر گرفته می‌شود. اتصالاتی که مقدار α در آنها بین ۲ و ۲۰ است اتصالات نیمه‌صلب محسوب می‌شوند.

سختی، مقاومت و شکل‌پذیری سه مشخصهٔ اصلی در طراحی اتصال هستند. این تعریف‌ها در شکل‌های ۱۱ ـ ۱ ـ الف و ب نشان داده شده است.

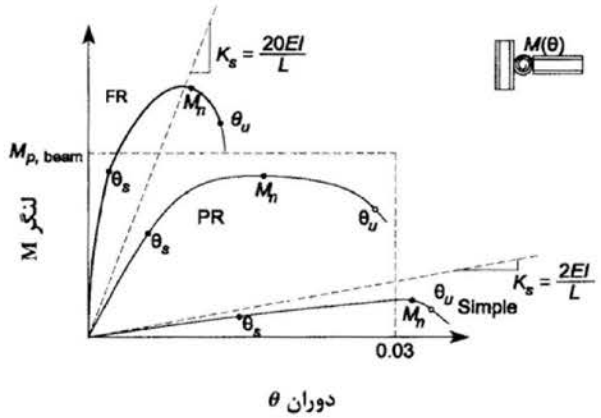


M_n = مقاومت اتصال

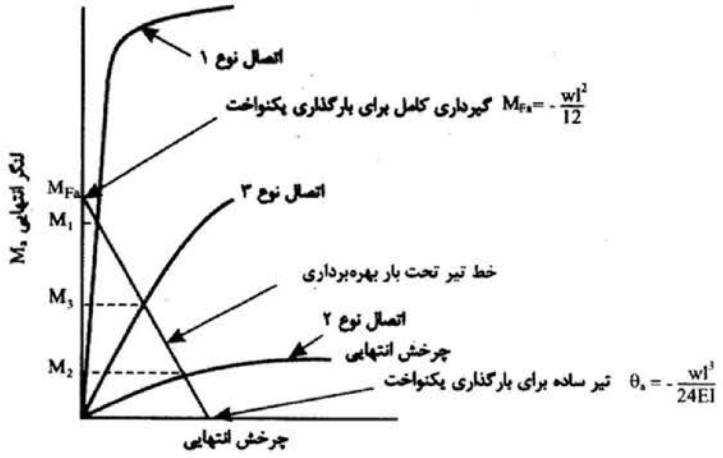
$K_s = \frac{M_s}{\theta_s}$ = سختی اتصال

θ_u = دوران نهایی

شکل ۱۱ ـ ۱ ـ الف تعریف مشخصات صلبیت، مقاومت و شکل‌پذیری بر روی منحنی لنگر ـ انحنا.



شکل ۱۱ ـ ۱ ـ ب طبقه‌بندی اتصال به‌صلب، نیمه‌صلب و ساده.



شکل ۱۱ ـ ۱ ـ پ مشخصه‌های «لنگر ـ چرخش» اتصالات نوع ۱ و ۲ و ۳

باید توجه داشت اتصالاتی که در ردهٔ اتصالات نیمه‌صلب قرار می‌گیرند، ممکن است نتوانند رفتار مورد انتظار را از خود نشان داده و تمام ظرفیت خمیری اتصال را بسیج کنند. ساز و کار تسلیم و گسیختگی این اتصالات متفاوت از اتصالات صلب است، با این حال ممکن است بتوانند رفتار لرزه‌ای مناسب از خود نشان دهند.

سختی اتصال به‌مقدار قابل توجهی در رفتار سازه تأثیر می‌گذارد. اتصالات با سختی زیاد مانند اتصالات جوشی با ورق‌های تحتانی و فوقانی و برشگیر جان به‌صورت اتصالات کاملاً صلب مدل می‌شوند و تغییرشکل آنها در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. اتصالات مفصلی مانند اتصالات جوش با نبشی جان در مدل‌سازی‌ها به‌صورت مفصل کامل در نظر گرفته می‌شوند که هیچ‌گونه مقاومت دورانی از خود نشان نمی‌دهند. این ساده‌سازی‌ها در پایداری سازه تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. اتصالات نیمه‌صلب باید در مدل‌سازی‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرند و علاوه‌بر سختی تیر و ستون، یک فنر با سختی دورانی K_s در محل گره در نظر گرفته می‌شود که این امر تحلیل ویژه‌ای را می‌طلبد.

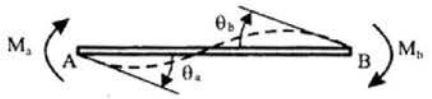
در شکل ۱۱ ـ ۱ ـ پ نمودار $M-\theta$ برای سه نمونه اتصال نوع ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده است. نمودار نوع ۱ مربوط به‌اتصال صلب می‌باشد که در آن تغییر زاویه بین اعضای متصل شده خیلی کوچک بوده و اتصال قادر به‌انتقال لنگر بزرگ می‌باشد. منحنی نوع ۲ مربوط به‌اتصال ساده تیر به‌ستون می‌باشد که در آن لنگر قابل انتقال اتصال کوچک بوده و تحت این لنگر کوچک قادر به‌دوران قابل توجه می‌باشد. نمودار اتصال نیمه‌صلب (اتصال نوع ۳)، نیز حالت بینابین را داراست.

۱۱ ـ ۱ ـ ۳ خط تیر[1]

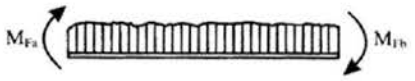
به‌منظور درک بهتر تفاوت‌های عملی بین انواع اتصالات می‌توان از مفهوم خط تیر که ابزار ترسیمی بسیار خوبی است، استفاده نمود.

1. *Beam line*

همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۲ به‌نمایش درآمده، تیری مانند AB را که تحت لنگرهای انتهایی M_a و M_b قرار گرفته و شیب‌های انتهایی آن θ_a و θ_b می‌باشد، در نظر بگیرید. لنگرهای انتهایی که برای حفظ وضعیت $\theta_a = \theta_b = 0$ مورد لزوم می‌باشند، با M_{Fa} و M_{Fb} نام‌گذاری می‌شوند که همان لنگرهای گیرداری[2] هستند.



(الف) لنگرها و دورانهای انتهایی



(ب) لنگرهای گیرداری

شکل ۱۱ ـ ۲ لنگر و چرخش برای معادلات شیب ـ افت (جهت مثبت لنگرها).

از معادلات شیب ـ افت می‌توان نوشت:

$$M_a = M_{Fa} + \frac{4EI}{L}\theta_a + \frac{2EI}{L}\theta_b$$
$$M_b = M_{Fb} + \frac{2EI}{L}\theta_a + \frac{4EI}{L}\theta_b \qquad (۱۱ ـ ۱)$$

با حل معادلات فوق برای θ_a و θ_b به‌دست می‌آید:

$$\frac{6EI}{L}\theta_a = 2(M_a - M_{Fa}) - (M_b - M_{Fb})$$
$$\frac{6EI}{L}\theta_b = -(M_a - M_{Fa}) + 2(M_b - M_{Fb}) \qquad (۱۱ ـ ۲)$$

با کسر معادله دوم از معادله اول نتیجه می‌شود:

$$\frac{6EI}{L}(\theta_a - \theta_b) = 3(M_a - M_b) - 3(M_{Fa} - M_{Fb}) \qquad (۱۱ ـ ۳)$$

با فرض بارگذاری قرینه خواهیم داشت:

$$M_b = -M_a \qquad \theta_b = -\theta_a \qquad M_{Fb} = -M_{Fa} \qquad (۱۱ ـ ۴)$$

با جایگذاری مقادیر بالا در رابطه ۱۱ ـ ۳ به‌دست می‌آید:

$$\frac{2EI}{L}\theta_a = M_a - M_{Fa}$$

2. *Fixed-end moment*

یا:

$$M_a = M_{Fa} + \frac{2EI}{L}\theta_a \qquad (۵ - ۱۱)$$

رابطهٔ بالا را معادله خط تیر[3] می‌نامند. برای $\theta_a = 0$ (گیرداری کامل)، داریم: $M_a = M_{Fa}$ و برای انتهای مفصلی که در آن $M_a = 0$ است، شیب $\theta_a = -\frac{M_{Fa}}{\frac{2EI}{L}}$ خواهد شد. در شکل ۱۱ ـ ۲ منحنی خط تیر به‌همراه نمودار لنگر ـ چرخش اتصالات نوع ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده است.

اتصال صلب باید قادر باشد لنگری معادل M_1 (حدود ۹۰ درصد لنگر گیرداری) یا بیشتر را انتقال دهد. اتصال ساده‌ای از نوع ۲ تنها باید ۲۰ درصد M_{Fa} یا کمتر را انتقال دهد، که با لنگر M_2 نشان داده شده است. ولی از اتصال نیمه‌صلب انتظار می‌رود که قادر به‌تحمل و انتقال لنگری مابین مقادیر فوق باشد که احیاناً حدود ۵۰ درصد لنگر گیرداری M_{Fa} می‌باشد.

۱۱ ـ ۲ اتصال ساده تیر با نبشی جان

۱۱ ـ ۲ ـ ۱ کلیات

اتصالات ساده برشی به‌کمک نبشی جان، برای اتصال تیرچه به‌شاهتیر یا تیر به‌بال ستون به‌کار می‌روند. در این نوع اتصال، نبشی باید تا حد امکان انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شود (شکل ۱۱ ـ ۳).

وقتی که از نبشی جان برای اتصال تیر به ستون استفاده می‌گردد، فاصله بادخور در حدود ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود تا نصب تیر ساده باشد. وقتی که اتصال تیرچه به شاهتیر به‌نحوی انجام می‌گیرد که بال‌های فوقانی هر دو در یک تراز واقع می‌گردد، باید قسمتی از بال تیرچه را زبانه کرد (شکل ۱۱ ـ ۳ ـ پ). در این حالت مقطع فقط مقدار کمی از بال خود را که در تحمل برش نقش ناچیزی دارد، از دست می‌دهد، بنابراین زبانه کردن تیرها فقط مقدار کوچکی از مقاومت برشی اولیه می‌کاهد.

در این نوع اتصال، جوش نبشی اتصال به‌جان تیر را جوش A و جوش نبشی اتصال به‌تکیه‌گاه را جوش B می‌نامند.

۱۱ ـ ۲ ـ ۲ طراحی اتصال نبشی جان به‌تیر (جوش A)

جوش این اتصال تحت برش برون محور قرار دارد. از اصول مطرح‌شده در فصل دهم در خصوص طراحی جوش در اینجا نیز استفاده به‌عمل می‌آید.

---

3. Beam line equation

مثال ۱۱ ـ ۱

در اتصال به‌کمک نبشی جان شکل ۱۱ ـ ۳ ، ظرفیت جوش A را به‌دست آورید (شکل الف). تیر مورد استفاده IPE600 و اندازه ساق جوش ۸ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد نبشی ۱۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر به‌طول ۴۰ سانتی‌متر بوده و از الکترود E60 و تنش‌های مجاز طبق آیین‌نامهٔ فولاد ایران، مبحث دهم استفاده می‌شود.

حل:

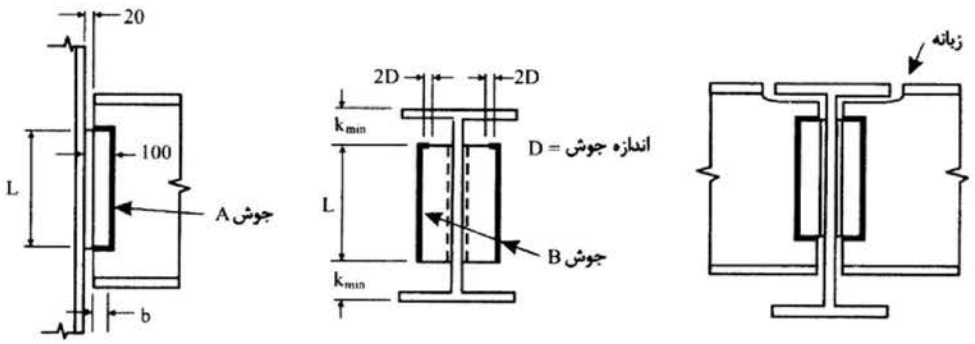
با استفاده از رابطه شماره ۵ جدول ۱۰ ـ ۴ ، ممان اینرسی قطبی جوش A برابر می‌شود با:

$$b = 8 \qquad d = L = 40\text{cm}$$

$$I_p = \frac{8(8)^3 + 6(8)(40)^2 + (40)^3}{12} - \frac{(8)^4}{2(8)+40} = 12001.5\ \text{cm}^3$$

مؤلفه برش مستقیم:

$$f'_y = \frac{P}{2(40+2\times 8)} = 0.0089P$$



شکل ۱۱ ـ ۳ اتصال ساده تیر با نبشی جان (اندازه‌ها به‌میلی‌متر).

مرکز هندسی نوار جوش:

$$\bar{X} = \frac{8^2}{(2\times 8+40)} = 1.14\ \text{cm}$$

$$e_l = 10 - 1.14 = 8.86\text{cm}$$

مؤلفه‌های x و y تنش پیچشی عبارتند از:

$$f''_y = \frac{T.x}{I_p} = \frac{P(8.86)(10-1.14-2.0)}{2(12001.5)} = 0.00253P$$

$$f''_x = \frac{T.y}{I_p} = \frac{P(8.86)(20)}{2(12001.5)} = 0.00738P$$

ارزش جوش:

$$f_r = P\sqrt{(0.0089+0.00253)^2 + (0.00738)^2} = 0.01361P$$

$$R_w = 650D = 650\times(0.8) = 520\,kg/cm$$

$$f_r = R_w$$

$$0.01361\ P = 520\times10^{-3}$$

$$P_{WA} = 38.2\ ton$$

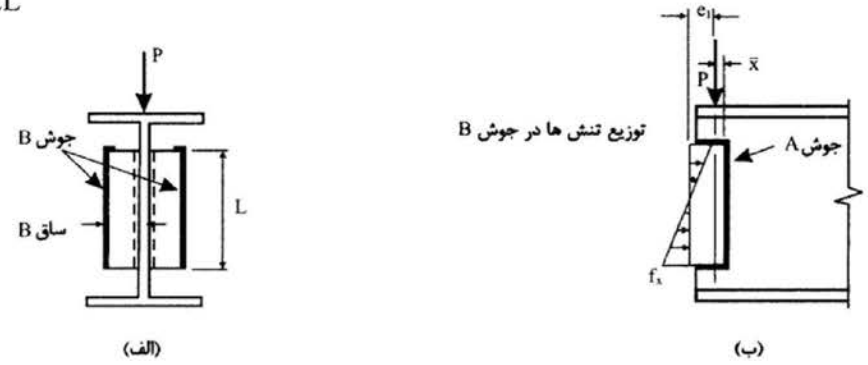
۱۱ ـ ۲ ـ ۳ طراحی اتصال نبشی جان به‌تکیه‌گاه (جوش B)

با توجه به‌توزیع تنش شکل ۱۱ ـ ۴ می‌توان نوشت:

مؤلفه خمشی تنش:

$$f'_x = \frac{MC}{I} = \frac{Pe_1\left(\frac{L}{2}\right)}{2\times\frac{1}{12}\times1\times L^3} = \frac{3Pe_1}{L^2}$$

$$f'_y = \frac{P}{2L}$$



شکل ۱۱ ـ ۴ اتصال نبشی جان (جوش‌شده در کارگاه).

با جمع دو مؤلفهٔ فوق نتیجه می‌شود:

$$f_r = \sqrt{\left(\frac{P}{2L}\right)^2 + \left(\frac{3Pe_1}{L^2}\right)^2} = \frac{P}{2L^2}\sqrt{L^2+36e_1^2} \qquad (۶ ـ ۱۱)$$

مثال ۱۱ ـ ۲

در ادامه مثال ۱۱ ـ ۱ ، مطلوب است تعیین ظرفیت جوش B در شکل ۱۱ ـ ۴ ـ الف، در صورتی که اندازه ساق جوش ۸ میلی‌متر بوده و طول L مساوی ۴۰ سانتی‌متر باشد. نبشی‌های به‌کار رفته ۱۰× ۱۰۰× ۱۰۰ میلی‌متر و الکترود مصرفی در طرح E60 بوده و تنش‌های مجاز جوش از آیین‌نامه فولاد ایران، مبحث دهم به‌دست می‌آید:

حل:

$$\bar{x} = \frac{(10-2)^2}{2(10-2)+40} = 1.14\text{cm}$$
$$e_1 = 10 - \bar{x} = 10 - 1.14 = 8.86\text{cm}$$

ارزش جوش:

$$f_r = \frac{P}{2(40)^2}\sqrt{(40)^2 + 36\times(8.86)^2} = 0.0208P$$
$$R_w = 650D = 650\times 0.8 = 520\ \text{kg/cm}$$
$$f_r = R_w$$
$$0.0208P = 520\times 10^{-3}$$
$$P_{WB} = 25\ \text{ton}$$

با مقایسه با مثال ۱۱ ـ ۱ ، ملاحظه می‌شود که جوش B کنترل‌کننده بوده و نیروی برشی مقاوم اتصال ۲۵ تن است.

۱۱ ـ ۲ ـ ۴ تنش برشی در تیر و نبشی

آنچه در بندهای قبل آمد، تنها محاسبه ظرفیت جوش‌های A و B نبشی جان بود. ظرفیت هر اتصال، حداقل ظرفیت قابل تحمل توسط هر یک از عناصر تشکیل‌دهنده آن اتصال می‌باشد. در اتصال نبشی جان، برای اینکه ظرفیت جوش‌های A و B حاکم بر طرح شوند، باید تیر، نبشی و تکیه‌گاه، ظرفیت بیشتری (یا حداقل مساوی) از جوش‌ها داشته باشند.

ظرفیت برشی تیر باید از ظرفیت برشی جوش A بیشتر باشد:

$$0.4F_y t_w \geq 2\times(650D_a)$$
$$t_w \geq \frac{1300D_a}{0.4F_y} \qquad (۷ ـ ۱۱)$$

ظرفیت برشی نبشی باید از ظرفیت برشی جوش‌ها بیشتر باشد:

$$P = 0.4F_y tL \geq P_w$$

$$t \geq \frac{P_w}{0.4F_y L} \qquad (۸ - ۱۱)$$

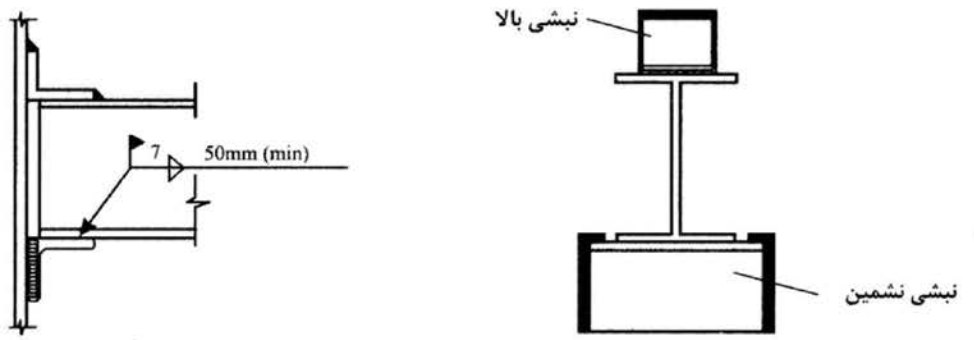
در روابط فوق، t_w ضخامت جان تیر، t ضخامت نبشی، D_a اندازه جوش A و L ارتفاع نبشی همه برحسب سانتی‌متر، F_y تنش تسلیم مصالح برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و P_w کمترین دو مقدار ظرفیت جوش A و جوش B برحسب کیلوگرم می‌باشد. در مورد تکیه‌گاه نیز، برحسب نوع آن باید شرایط تحمل برش ارضا گردد.

در صورتی که ضخامت جان تیر یا نبشی از مقادیر فوق کمتر باشد، ظرفیت اتصال توسط جان تیر و یا نبشی محدود می‌گردد.

۱۱ ـ ۳ اتصال ساده تیر با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر

۱۱ ـ ۳ ـ ۱ کلیات

در این نوع اتصال، تیر بر روی نبشی نشیمن که هیچ‌گونه تقویتی در آن صورت نگرفته است، قرار می‌گیرد. این نوع اتصال را باید همیشه همراه با نبشی بالایی که تنها وظیفه آن تأمین تکیه‌گاه جانبی برای بال فشاری است، به‌کار برد. (شکل ۱۱ ـ ۵).

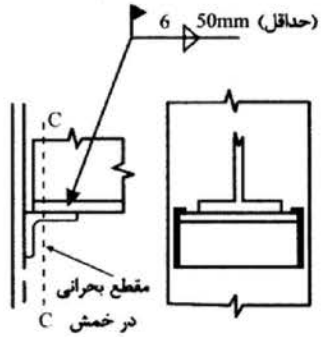


شکل ۱۱ ـ ۵ اتصال ساده با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر.

مانند اتصالات ساده با نبشی جان، منظور از اتصالات نشیمن، تنها انتقال واکنش تکیه‌گاهی قائم است. بنابراین اتصال نباید در انتهای تیر، گیرداری قابل توجهی ایجاد کند. به‌این دلیل است که نبشی نشیمن و نبشی بالایی باید نسبتاً قابل انعطاف باشند.

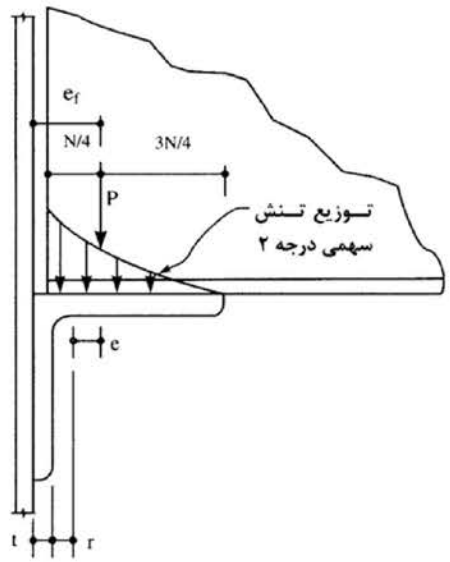
ضخامت نبشی نشیمن با توجه به‌تنش خمشی در مقطع بحرانی که در شکل ۱۱ ـ ۶ نشان داده شده است، تعیین می‌گردد. محل مقطع بحرانی را به‌طور تقریبی در فاصله ۱۰ میلی‌متری از وجه داخلی نبشی در نظر می‌گیرند.

در این مورد فرق نمی‌کند که تیر به‌نشیمن خود متصل شده باشد یا نه. در عمل، غالباً تیر را به‌نشیمن متصل می‌کنند. محل مقطع بحرانی در نزدیکی آغاز گردی اتصال ساق افقی نبشی به‌ساق قائم آن واقع شده است.



شکل ۱۱ ـ ۶

لنگر خمشی در مقطع بحرانی نبشی و محل اتصال به‌بال ستون، با ضرب واکنش تکیه‌گاهی در فاصله آن از مقطع مورد نظر به‌دست می‌آید. محل اثر واکنش تکیه‌گاهی در مرکز ثقل طول تماس N که از انتهای تیر اندازه‌گیری می‌گردد، درنظر گرفته می‌شود. توزیع تنش در طول N به‌صورت سهمی مقعر درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱ ـ ۷ محل تأثیر واکنش تکیه‌گاهی در نشیمن انعطاف‌پذیر.

۱۱ ـ ۳ ـ ۲ روش طراحی

طراحی نشیمن انعطاف‌پذیر شامل مراحل زیر است:

۱ ـ تعیین عرض نشیمن N

۲ ـ تعیین بازوهای لنگر e و e_f

۳ ـ تعیین طول و ضخامت نبشی

۴ ـ تعیین ابعاد ساق نبشی و اندازه جوش لازم

عرض نشیمن بر مبنای حداقل طول لازم N برای جلوگیری از تسلیم بین جان و بال، تعیین می‌گردد:

$$\text{حداقل} \quad N = \frac{P}{0.66F_y t_w} - 2.5K \geq K \qquad (۹ ـ ۱۱)$$

که در آن:

t_w= ضخامت جان تیر

K= فاصله سطح خارجی بال تا آغاز گردی بین جان و بال

بنابراین:

$$\text{عرض نشیمن} \geq N + \text{فاصله آزاد مونتاژ} \qquad (۱۰ ـ ۱۱)$$

عرض نشیمن نباید از ۷/۵ سانتی‌متر کمتر باشد. در این مورد عدد ۱۰ سانتی‌متر قابل توصیه است. بازوهای لنگر e و e_f به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید:

$$e_f = \text{فاصلهٔ آزاد مونتاژ} + \frac{N}{4} \qquad (۱۱ ـ ۱۱)$$

$$e = e_f - t - r \qquad (۱۲ ـ ۱۱)$$

لنگر خشمی در مقطع بحرانی نبشی برابر است با:

$$M = P.e$$

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{Pe}{\frac{1}{6}bt^2} = \frac{6Pe}{bt^2} \qquad (۱۳ ـ ۱۱)$$

با استفاده از تنش مجاز مقطع توپر مربعی که حول محور ضعیف خود خم شده است، داریم:

$$F_b = 0.75\, F_y$$

$$t^2 = \frac{6Pe}{0.75F_y b} = \frac{8Pe}{F_y b} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{8Pe}{F_y\, b}} \qquad (۱۴ ـ ۱۱)$$

مثال ۱۱ ـ ۳

مطلوب است طراحی اتصال ساده با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر برای تیری با نیمرخ IPE300 و به‌دهانه ۷/۵ متر که دارای تکیه‌گاه جانبی کافی می‌باشد. تیر از جنس فولاد نرمه با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

حل:

در خیلی از موارد، عاقلانه آن است که نشیمن را برای حداکثر واکنش تکیه‌گاهی مربوط به‌هنگامی که تیر به‌ظرفیت خمشی خود می‌رسد، طراحی نماییم. به‌چنین اتصالی، اتصال «تمام‌قدرت» می‌گویند. به‌کار بردن چنین اتصالی موجب آن می‌گردد که اعضای اصلی و اتصالات آنها از ضرایب اطمینان یکسانی برخوردار باشند و طرح یکنواخت‌تر شود. در مورد بعضی تیرهای با دهانه خیلی کوچک، ممکن است ظرفیت برشی معرف واکنش تمام‌قدرت باشد.

الف) تعیین طول و ضخامت نبشی

$$\text{IPE300}:\ b=15\text{cm}\ ,\ t_w=0.71\text{cm}\ ,\ K=2.57\text{cm}\ ,\ S_x=557\text{cm}^3$$

$$M=0.66F_yS_x=0.66\times2400\times557\times10^{-5}=8.82\ \text{ton.m}$$

$$R=\frac{qL}{2}=\frac{8M}{2L}=\frac{8\times8.82}{2\times7.5}=4.70\ \text{ton}$$

$$\text{حداقل } N=\frac{P}{0.66F_yt_w}-2.5K=\frac{4.70\times10^3}{0.66\times2400\times0.71}-2.5\times2.57=-2.25<0\Rightarrow N=N_{min}=75\text{mm}$$

با انتخاب نبشی ۱۲ و با فرض ۲ سانتی‌متر فاصلهٔ آزاد، طول تماس مساوی ۱۰ سانتی‌متر به‌دست می‌آید.

طول تماس $N=10\ \text{cm}$

$$e_f=\frac{10}{4}+2=4.5\ \text{cm}$$

انتخاب اول برای ضخامت نبشی:

$$t=12\text{mm}$$

$$e=e_f-t-r=4.5-1.2-1.3=2\ \text{cm}$$

طول نبشی را بیشتر از پهنای بال تیر اختیار می‌کنیم:

$$b=15+2\times3.5=22\ \text{cm}$$

$$t^2=\frac{8Pe}{F_yb}=\frac{8\times(4.70\times10^3)\times2}{2400\times22}=1.42\ \rightarrow t=1.19\ \text{cm}$$

استفاده می‌شود از نبشی ۱۲×۱۲۰×۱۲۰ و طول ۲۲۰ میلی‌متر.

ب) تعیین ابعاد ساق نبشی و اندازه جوش لازم برای اتصال نبشی به‌ستون

در طرح اولیه از نبشی ۱۲×۱۲۰×۱۲۰ L که طول هر یک از ساق‌های آن ۱۲ سانتی‌متر است، استفاده می‌شود.

براساس محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای: حداکثر اندازه جوش ۱۰ و حداقل اندازه جوش ۵ میلی‌متر می‌باشد.

با صرف‌نظر از طول‌های جوش برگشت داریم:

$$f_r = \frac{P}{2L^2}\sqrt{L^2 + 36e_f^2}$$

$P = 4.70\ \text{ton}\ ,\ L = 12\text{cm}\ ,\ e_f = 4.5\ \text{cm}$

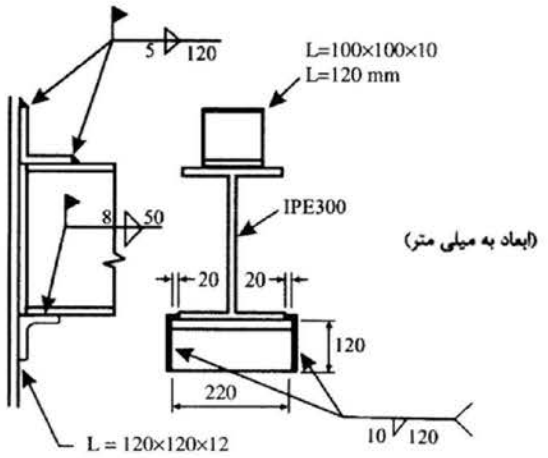
$$f_r = \frac{4.7\times10^3}{2\times12^2}\sqrt{12^2 + 36\times4.5^2} = 482\ \text{kg/cm}$$

$650D = 482 \rightarrow D = 0.74\ \text{cm}$ اندازهٔ جوش

بنابراین از جوش با اندازه $D = 10\ \text{mm}$ استفاده می‌کنیم.

$2D = 2\times10 = 20\ \text{mm}$ = طول جوش برگشت

نبشی بالایی و جوش‌های آن اسمی می‌باشند. به‌عنوان مثال می‌توان از نبشی ۱۰×۱۰۰×۱۰۰ L با طول ۱۲۰ میلی‌متر و اندازه جوش ۵ میلی‌متر استفاده نمود.



شکل ۱۱ ـ ۸ مربوط به‌مثال ۱۱ ـ ۳.

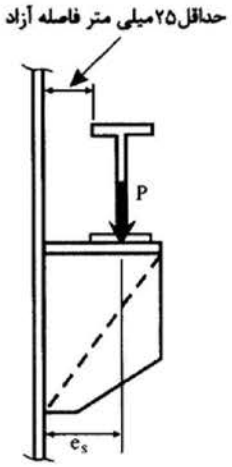
۱۱ ـ ۴ اتصال ساده تیر با نشیمن تقویت‌شده

۱۱ ـ ۴ ـ ۱ کلیات

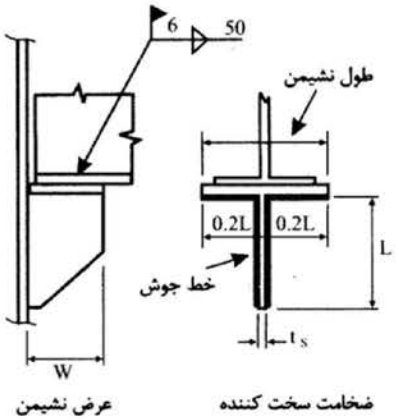
وقتی در اتصالات ساده با نشیمن انعطاف‌پذیر، واکنش تکیه‌گاهی از حد قابل قبولی تجاوز نماید، باید از نشیمن تقویت‌شده استفاده کرد. در غیر این صورت ضخامت نبشی نشیمن تقویت نشده (انعطاف‌پذیر) بسیار بزرگ می‌شود. این اتصال نیز از نوع ساده بوده و تنها وظیفه آن انتقال بارهای قائم است و هیچ لنگری را منتقل نمی‌کند.

واکنش‌های تکیه‌گاهی به‌دو صورت ممکن است بر نشیمن تقویت شده وارد گردند؛ در حالت متداول، واکنش تکیه‌گاهی به‌وسیله تیری که جان آن در امتداد سخت‌کننده قرار گرفته است، منتقل می‌شود (شکل ۱۱ ـ ۹).

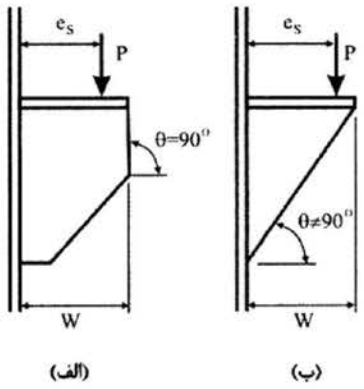
در حالت دوم، تیر طوری قرار گرفته است که جان آن عمود بر ورق سخت‌کننده است (شکل۱۱ ـ ۱۰). در حالت دوم، برون‌محوری e_s مقدار مشخصی می‌باشد، لیکن در حالت اول این برون‌محوری باید به‌نحو مناسبی تعریف گردد. همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۱۱ دیده می‌شود، یکی دیگر از عوامل تفاوت رفتار نشیمن‌های تقویت‌شده، زاویه برش لبه



شکل ۱۱ ـ ۱۰



شکل ۱۱ ـ ۹



شکل ۱۱ ـ ۱۱

آزاد سخت‌کننده آن می‌باشد. اگر زاویه θ در حدود ۹۰ درجه باشد، سخت‌کننده خود مانند ورق سخت‌نشده تحت فشار یکنواخت، رفتار می‌نماید که باید در مقابل کمانش موضعی محاسبه گردد. وقتی که ورق سخت‌کننده طوری برش خورده باشد که از آن یک صفحه سه‌گوش ایجاد گردد، رفتار متفاوتی از آن بروز می‌کند.

۱۱ ـ ۴ ـ ۲ روش طراحی

روش گام به‌گام برای طراحی نشیمن تقویت‌شده به‌ترتیب زیر می‌باشد:

۱ ـ تعیین طول نشیمن (W)

۲ ـ تعیین برون‌محوری بار، e_s

۳ ـ تعیین ضخامت سخت‌کننده، t_s

۴ ـ تعیین اندازه و طول جوش

همانند حالت قبل، طول نشیمن بر مبنای حداقل طول لازم N برای جلوگیری از تسلیم بین جان و بال تیر تکیه داده شده، تعیین می‌گردد.

به‌خاطر صلبیت سخت‌کننده، قسمتی که تحت بیشترین تنش‌ها قرار دارد، برخلاف نشیمن‌های تقویت‌نشده، به‌جای کناره داخلی، در لبه خارجی نشیمن واقع می‌گردد (شکل ۱۱ ـ ۱۲ ـ ب). بنابراین فرض می‌شود که واکنش P ، به‌صورت مثلثی در طول تماس توزیع گردد.

ضخامت صفحه نشیمن‌گاه، در حدود ضخامت بال تیر انتخاب می‌گردد.

t_s (ضخامت سخت‌کننده) باید طوری تعیین شود که شرایط زیر را ارضا نماید:

شرط ۱ :ضخامت سخت‌کننده حداقل به‌اندازه ضخامت جان تیر باشد:

$$t_s \geq t_w \qquad (۱۱ ـ ۱۵)$$

شرط ۲ :به‌منظور جلوگیری از کمانش موضعی سخت‌کننده:

$$t_s \geq \frac{w}{795/\sqrt{F_y}} \qquad (۱۱ ـ ۱۶)$$

شرط ۳ :برای جلوگیری از تسلیم سخت‌کننده:

$$f_b = \frac{P}{A} + \frac{M}{S} = \frac{P}{wt_s} + \frac{P\left(e_s - \frac{w}{2}\right)}{t_s \frac{w^2}{6}} = \frac{P}{t_s w^2}(6e_s - 2w) \qquad (۱۱ ـ ۱۷)$$

$$t_s \geq \frac{P(6e_s - 2w)}{0.9F_y w^2}$$

در رابطهٔ فوق، تنش مجاز تسلیم برابر F_y ۰/۹ اختیار شده است.

شرط ۴ :برای کنترل تنش برشی انتقال‌یافته از جوش بین سخت‌کننده و تکیه‌گاه:

$$t_s \geq \frac{\text{ارزش دو خط جوش}}{\text{تنش برشی مجاز فولاد}} = \frac{2\times \text{ ضریب بازرسی } \times 0.3F_u}{0.4F_y} \qquad (۱۸ - ۱۱)$$

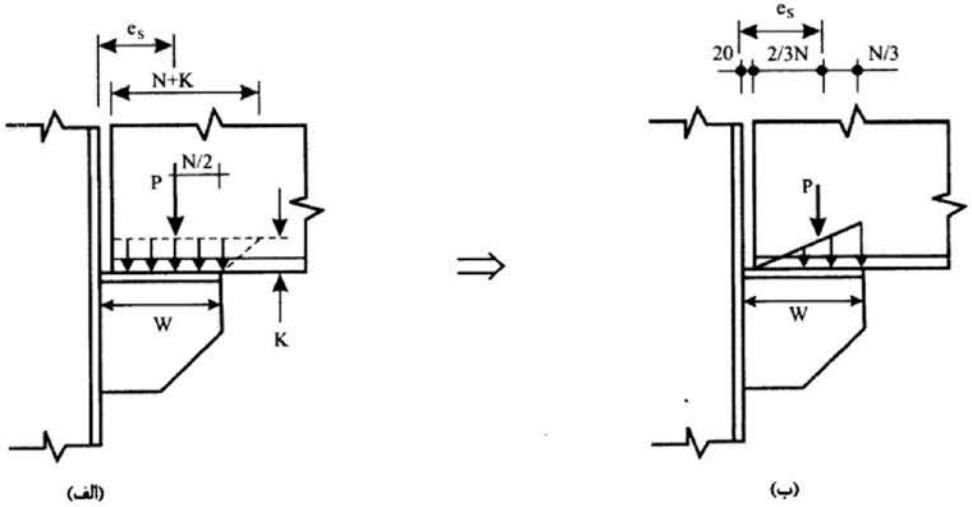
با فرض دو خط جوش گوشه با اندازه ساق D سانتی‌متر با الکترود E60 و با تنش‌های مجاز مبحث دهم، برای اینکه جوش کاملاً مؤثر بوده و در ورق سخت‌کننده باعث اضافه تنش برشی نگردد، باید داشته باشیم:

$$2\times(0.707D)(0.75\times 0.30\times 4200) = 0.4F_y t_s \Rightarrow t_s = \frac{3340D}{F_y}$$

که این معادله رابطه ۱۱ ـ ۱۸ را نتیجه می‌دهد. برای فولاد ساختمانی عادی با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع داریم:

$$t_s \geq 1.40D$$

به‌ترتیبی که در بالا آمد، می‌توان برای انواع فولاد و الکترود و براساس تنش‌های مجاز آیین‌نامه‌های مختلف، ضخامت سخت‌کننده را در رابطه با اندازه جوش لازم، به‌دست آورد.



شکل ۱۱ ـ ۱۲ تنش فشاری تماسی بر روی نشیمن‌های تقویت‌شده.

وقتی که ابعاد سخت‌کننده تعیین گردید، باید جوش اتصال را طوری طراحی نمود که واکنش تکیه‌گاهی تیر را با بازوی لنگر e_s به‌ستون انتقال دهد. برای نشیمن‌های جوش‌شده، طرح جوشی همانند شکل ۱۱ ـ ۹ پیشنهاد می‌شود. این جوش تحت برش مستقیم و خمش قرار دارد که تنش ترکیبی در بالای جوش، تنش بحرانی طرح می‌باشد.

وضعیت جوش‌ها، مشابه حالت ۴ جدول ۱۰ ـ ۴ می‌باشد. با قرار دادن $d = L$, $b = 0.2L$ در مقادیر جدول مذکور، داریم:

$$\bar{y} = \frac{L^2}{2(L+b)} = \frac{L^2}{2(1.2L)} = \frac{L}{2.4}$$

$$S_x = \frac{2(4bL + L^2)}{6} = \frac{4(0.2L)L + L^2}{3} = 0.6L^2$$

$$f''_x = \frac{M}{S_x} = \frac{Pe_s}{0.6L^2} \rightarrow$$

$$f'_x = \frac{P}{2(L+0.2L)} = \frac{P}{2.4L} \downarrow$$

$$f_r = \sqrt{\left[\frac{Pe_s}{0.6L^2}\right]^2 + \left[\frac{P}{2.4L}\right]^2} = \frac{P}{2.4L^2}\sqrt{16e^2{}_s + L^2} \qquad (۱۱ - ۱۹)$$

مثال ۱۱ ـ ۴

نشیمن تقویت‌شده‌ای با استفاده از جوش طوری طراحی نمایید که تیر IPE450 با واکنش تکیه‌گاهی ۴۰ تن را تحمل نماید. فولاد مورد استفاده از نوع ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. (شکل ۱۱ ـ ۱۳).

حل:

$$\text{IPE450:} \quad b = 19\text{cm} \ , \ t_w = 0.94\ \text{cm} \ , \ t = 1.46\ \text{cm} \ , \ k = 3.56\text{cm}$$

$$N = \frac{P}{0.66F_y t_w} - 2.5K = \frac{40\times10^3}{0.66\times2400\times0.94} - 2.5\times3.56 = 17.96\ \text{cm}$$

$W = 17.96 + 2$ (باد خور) $= 19.96\text{cm}$ لازم

طول نشیمن W را مساوی ۲۲ سانتی‌متر در نظر می‌گیریم.

$$W = 22\text{cm} \Rightarrow N = 20\text{cm}$$

چون ضخامت بال تیر ۱/۴۶ سانتی‌متر است، از ورقی به‌ضخامت ۱۵ میلی‌متر برای نشیمن استفاده می‌کنیم.

حداقل اندازه جوش لازم برای جوشکاری ورق ۱۵ میلی‌متری نشیمن و بال تیر به‌ضخامت ۱۴/۶ میلی‌متر، برابر ۶ میلی‌متر می‌باشد. ما از همین اندازه جوش برای تثبیت تیر روی نشیمن استفاده می‌نماییم.

در مرحله بعد ضخامت سخت‌کننده را تعیین می‌کنیم.

$$t_s \geq t_w = 0.94\ \text{cm}$$

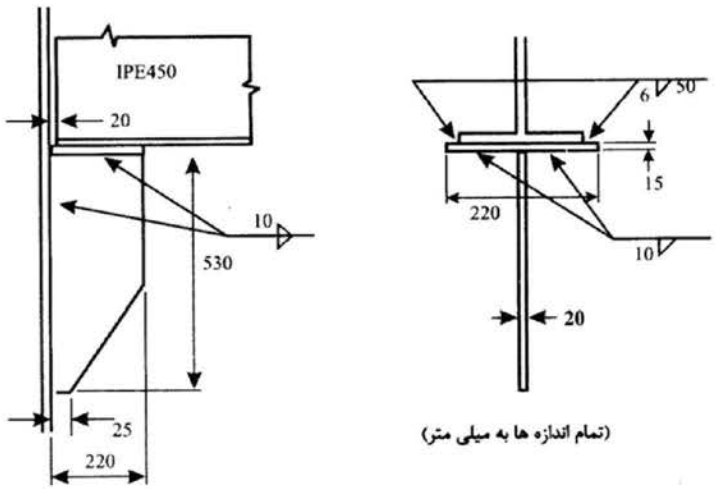
$$t_s \geq \frac{w}{795/\sqrt{F_y}} = \frac{22}{795/\sqrt{2400}} = 1.35\ \text{cm}$$

$$e_s = 2 + 2\frac{N}{3} = 2 + \frac{2\times 20}{3} = 15.33\ \text{cm}$$

$$t_s \geq \frac{P(6e_s - 2w)}{0.9F_y w^2} = \frac{40\times 10^3 (6\times 15.33 - 2\times 22)}{0.9\times 2400\times 22^2} = 1.83\text{cm}$$

با استفاده از ورق ۲۰ میلی‌متری، حداکثر اندازه مجاز جوش از رابطه ۱۱ ـ ۱۸ به‌دست می‌آید:

$$D_{max\,eff} = \frac{F_y t_s}{3340} = \frac{2400\times 2}{3340} = 1.43\ \text{cm}$$



شکل ۱۱ ـ ۱۳ مربوط به‌مثال ۱۱ ـ ۴.

برای یافتن اندازه و طول جوش از e_s=۱۵ /۳۳ استفاده می‌نماییم. با استفاده از رابطهٔ ۱۱ ـ ۱۹ با فرض L= ۵۵ cm داریم:

$$f_r = \frac{P}{2.4L^2}\sqrt{16(e_s)^2 + L^2}$$

اگر از جوش ۸ میلی‌متری استفاده نماییم:

$$f_r = \frac{40\times 10^3}{2.4\times 55^2}\sqrt{16\times 15.33^2 + 55^2} = 454\ \text{kg/cm}$$

$$650D = 454 \rightarrow D = 0.69\text{cm} \rightarrow D = 8\text{mm}$$

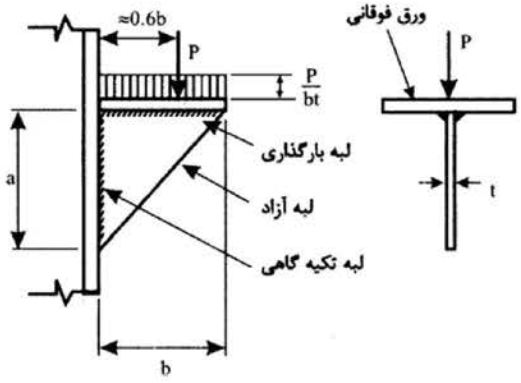
عرض ورق نشیمن، مساوی عرض بال، به‌علاوه فاصله کافی برای جوشکاری (تقریباً چهار برابر بُعد جوش) انتخاب می‌گردد (شکل ۱۱ـ ۱۳).

۱۱ ـ ۴ ـ ۳ استفاده از سخت‌کننده مثلثی در نشیمن‌های تقویت‌شده

وقتی که صفحات سخت‌کننده در زیر یک نشیمن طاقچه‌ای به‌صورت مثلثی مانند شکل ۱۱ ـ ۱۱ ـ ب، برش داده می‌شود، صفحه به‌صورتی متفاوت با حالتی که لبه آزاد موازی جهت بار وارده است عمل می‌نماید.

شکل ۱۱ ـ ۱۴ نمایشگر قرارگیری صفحه لچکی زیر نشیمن و علایمی است که در مورد آن به‌کار می‌رود. برای صفحات سخت‌شده کوچک که واکنش تیر را متحمل می‌شوند، در صورت مثلثی بودن ورق سخت‌کننده، خطر کمانش و خرابی بسیار کم می‌باشد.

در حالت کلی، برش ورق به‌صورت مثلثی باعث ایجاد اتصالی سخت‌تر از حالت ورق مستطیلی، می‌گردد.



شکل ۱۱ ـ ۱۴ صفحه مثلثی در زیر نشیمن.

۱۱ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۱ توصیه‌های دقیق برای تحلیل و طراحی

در طی سالیان دراز طرح این نوع از نشیمن‌ها یا به‌صورت تجربی و بدون بهره‌گیری از تئوری و آزمایش انجام می‌گردید و یا اینکه هرگاه طراح دچار شک می‌شد، نبشی یا ورق سخت‌کننده‌ای در طول لبه آزاد قرار می‌داد. توصیه‌هایی که در اینجا عرضه می‌گردد براساس فرضیات مشخص به‌شرح زیر قرار دارند:

۱ ـ صفحه بالایی در سرتاسر طول خود به‌ستون متصل گردیده است.

۲ ـ نیروی P گسترده می‌باشد (لازم نیست که گسترده یکنواخت باشد) و مرکز اثر آن در فاصله‌ای حدود ۰/۶b از سطح تکیه‌گاه واقع شده است.

۳ ـ نسبت b/a یعنی طول لبه بارگذاری‌شده به‌لبه تکیه داده‌شده بین ۰/۵ و ۰/۲ قرار دارد.

تحلیل تئوریک فقط کمانش الاستیک را در نظر می‌گیرد، در حالی‌که مشاهدات تجربی نشان می‌دهند لچکی‌های مثلثی از مقاومت بعد از کمانش قابل توجهی برخوردارند. معمولاً تسلیم فولاد لبه آزاد قبل از وقوع کمانش اتفاق می‌افتد، در این مرحله توزیع مجددی از تنش‌ها به‌وقوع می‌پیوندد. در عمل حاشیه اطمینان قابل توجهی مشاهده شده که نماینده آن است که ظرفیت نهایی مورد انتظار حداقل ۱/۶ برابر بار کمانش می‌باشد.

ملاحظه گردیده که حداکثر تنش در لبه آزاد به‌وجود می‌آید، اگرچه به‌خاطر طبیعت پیچیده توزیع تنش، تنش

موجود در لبه آزاد را نمی‌توان به‌روش‌های ساده تعیین نمود. به‌خاطر این شکل‌ها، نسبت Z بین تنش‌های متوسط P/bt روی لبه بارگذاری‌شده و f_{max} (تنش حداکثر روی لبه آزاد) برقرار نموده‌اند. رابطه تئوریک اصلی برای Z با توجه به‌نتایج آزمایش‌ها، اصلاح گردیده تا نزدیکی بیشتری با آنچه واقعاً در عمل می‌توان انتظار داشت، پیدا نماید. این رابطه به‌صورت زیر عرضه گردیده است:

$$Z=\frac{P/bt}{f_{max}}=1.39-2.2\left(\frac{b}{a}\right)+1.27\left(\frac{b}{a}\right)^2-0.25\left(\frac{b}{a}\right)^3 \qquad (۲۰ - ۱۱)$$

اگر تسلیم فولاد ورق، کنترل‌کننده مقاومت باشد و مقدار F_y ۰/۶ به‌عنوان ضابطه مطمئنی برای تنش مجاز در نظر گرفته شود، می‌توان این ضابطه را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$f_{max}=\frac{P/bt}{Z}\le 0.6F_y \qquad (۲۱ - ۱۱)$$

برای جلوگیری از کمانش سخت‌کننده از روابط زیر می‌توان استفاده نمود:

$$0.5\le b/a\le 1.0 \quad ; \quad \frac{b}{t}\le\frac{2092}{\sqrt{F_y}} \qquad (۱۱ - ۲۲ - الف)$$

$$1.0\le b/a\le 2.0 \quad ; \quad \frac{b}{t}\le\frac{2092(b/a)}{\sqrt{F_y}} \qquad (۱۱ - ۲۲ - ب)$$

ارضای شرایط فوق بدان معنی است که تسلیم در لبه قطری آزاد قبل از وقوع کمانش اتفاق می‌افتد. نتایج به‌دست آمده در بالا تا حدودی بیشتر از نتایج حاصل از مطالعات صرفاً تئوریک می‌باشد.

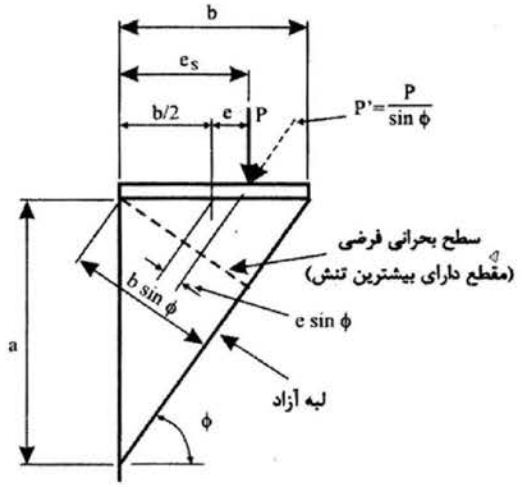
۱۱ ـ ۴ ـ ۳ ـ ۲ تحلیل تقریبی براساس فرضیات خمش تیرها

برای سالیان دراز، تنش روی صفحات لچکی مثلثی و انواع دیگر صفحات سخت‌کننده زیر نشیمن‌ها براساس تحلیل تیر، و با استفاده از روابطی که از شکل ۱۱ ـ ۱۵ به‌دست می‌آیند، انجام می‌گرفت. تنش مرکب لبه آزاد روی مقطع بحرانی به‌ترتیب زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_{max}=\frac{P}{A}+\frac{Mc}{I}=\frac{\frac{P}{\sin\phi}}{bt\sin\phi}+\frac{\left(\frac{P}{\sin\phi}\right)(e\sin\phi)\left(b\sin\frac{\phi}{2}\right)}{(b\sin\phi)^3\frac{t}{12}}=\frac{P}{bt\sin^2\phi}\left[1+\frac{6e}{b}\right] \qquad (۲۳ - ۱۱)$$

و یا برحسب e_s رابطه ۱۱ ـ ۲۳ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$f_{max}=\frac{P}{bt\sin^2\phi}\left(\frac{6e_s}{b}-2\right) \qquad (۲۴ - ۱۱)$$



شکل ۱۱ ـ ۱۵ تحلیل تیر برای صفحات سخت‌کننده نشیمن.

اگر تنش حداکثر را به $0/6\ F_y$ محدود کنیم، ضخامت لازم برای به‌وجود آمدن این تنش به‌ترتیب زیر می‌باشد:

$$t \geq \frac{P}{b(0.60F_y)\sin^2\phi}\left(\frac{6e_s}{b}-2\right) \qquad (۲۵ ـ ۱۱)$$

وقتی که از راه‌حل تحلیل تیر استفاده می‌نماییم، فرض بر این است که نواری به‌عرض $\frac{b\sin\phi}{4}$ به‌صورت عضو فشاری عمل می‌کند.

برای جلوگیری از اثرات کمانش رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{L_d}{t} \leq \frac{1355}{\sqrt{F_y(kg/cm^2)}} \qquad (۲۶ ـ ۱۱)$$

در رابطهٔ فوق، t ضخامت سخت‌کننده و L_d طول آزاد لبه قطری می‌باشد.

مثال ۱۱ ـ ۵

ضخامت لازم برای صفحه سخت‌کننده نشیمنی به‌شکل مثلث و به‌اضلاع ۵۰ در ۶۰ سانتی‌متر را که تحت بار ۲۰ تن قرار گرفته است، به‌دست آورید. فرض کنید که بار مانند شکل ۱۱ ـ ۱۶ در ۳۵ سانتی‌متری از تکیه‌گاه واقع شده و در طرح از فولاد ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده به‌عمل آمده است.

حل:

الف) با استفاده از روش دقیق و طراحی الاستیک

چون بار در حدود نقطه ۰/۶ از تکیه‌گاه قرار گرفته است، فرضیات روش مورد استفاده ارضا می‌گردد.

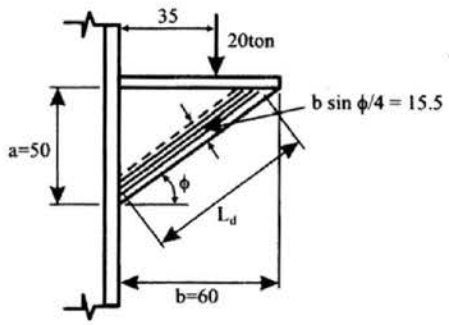
از رابطه ۱۱ ـ ۲۰ با $\frac{b}{a}=\frac{۶۰}{۵۰}=۱/۲$ مقدار $Z=۰/۱۵$ به‌دست می‌آید. برای ضابطه تسلیم داریم:

$$t \geq \frac{P}{bz(0.60F_y)} = \frac{20000}{60(0.15)(1440)} = 1.54\,cm$$

با استفاده از رابطهٔ ۱۱ ـ ۲۲ ـ ب داریم:

$$t \geq \frac{b\sqrt{F_y}}{2092\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{60\sqrt{2400}}{2092(1.2)} = 1.17\,cm$$

از ورق ۱۶ میلی‌متر استفاده می‌شود.



شکل ۱۱ ـ ۱۶ طاقچه نشیمن مثال ۱۱ ـ ۵. (تمام اندازه‌ها به‌سانتی‌متر)

ب) با استفاده از روش تقریبی تحلیل تیر و طراحی الاستیک

از رابطه ۱۱ ـ ۲۵ داریم:

$$t \geq \frac{P}{b(0.60F_y)\sin^2\phi}\left(\frac{6e_s}{b}-2\right)$$

که $\sin^2\phi=(0.64)^2=0.41$، پس:

$$t \geq \frac{20000}{60(1440)0.41}\left(\frac{6\times35}{60}-2\right) = 0.85\,cm$$

که در مقایسه با روش قبل در خلافِ اطمینان است.

برای کنترل پایداری طبق رابطه ۱۱ ـ ۲۶ داریم:

$$t \geq \frac{L_d\sqrt{F_y}}{1355} = \frac{(68)\sqrt{2400}}{1355} = 2.46\,cm$$

که L_d در طول مرکز نوار لبه‌ای اندازه‌گیری شده است. سالمون و جانسون اعتقاد دارند که روش تحلیل تیر جواب‌های واقع‌بینانه‌ای به‌دست نمی‌دهد. ضابطه تنش، جواب‌های دست‌پایین و ضابطه پایداری، جواب‌های دست‌بالا عرضه می‌دارد. به‌هر حال براساس این روش قدیمی یا باید از یک ورق ۲۵ میلی‌متری و یا از ورق ۱۶ میلی‌متر همراه با سخت‌کننده در لبه آن استفاده نمود.

۱۱ ـ ۵ اتصالات صلب تیر به‌ستون

۱۱ ـ ۵ ـ ۱ معرفی

هدف طراح در استفاده از اتصال صلب تیر به‌ستون، انتقال کامل لنگر و عدم چرخش نسبی بین اعضای وارد به‌اتصال می‌باشد. از آنجایی که اکثر لنگر خمشی تیر به‌صورت زوج نیرو در بال‌های کششی و فشاری تیر با بازویی مساوی ارتفاع تیر حمل می‌گردد، نقش اصلی اتصال صلب فراهم آوردن امکاناتی برای انتقال این نیروهای محوری می‌باشد. همچنین چون اکثر نیروی برشی توسط جان تیر حمل می‌گردد، پیوستگی کامل اتصال ایجاب می‌کند که نیروی برشی مستقیماً از جان انتقال پیدا نماید.

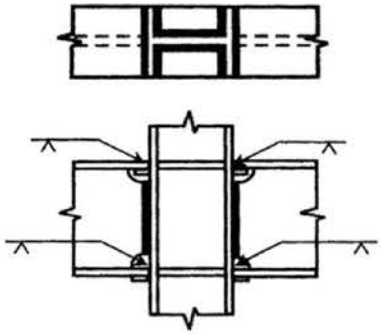
در اتصال صلب تیر به‌ستون، تیرها ممکن است از دو طرف به‌هر دو بال ستون متصل شده باشند (شکل‌های ۱۱ ـ ۱۷ ـ الف و ۱۱ ـ ۱۷ ـ ب) و یا فقط به‌یک بال ستون متصل شوند (شکل ۱۱ ـ ۱۷ ـ پ). همچنین ممکن است همانند شکل ۱۱ ـ ۱۸ ، تیرها از یک یا دو طرف به‌جان ستون به‌طور صلب متصل شده باشند. اگر در سیستم قاب صلب، تیرها فقط از دو طرف بر دو بال و یا جان متصل شده باشند (البته نه با هم)، سیستم، قاب صلب دو طرفه یا صفحه‌ای خوانده می‌شود. سیستم قاب صلبی که شامل اتصالاتی باشد که در آن تیرها از چهار طرف بر دو بال و جان ستون متصل شده باشند (البته ممکن است که فقط بر یک طرف جان باشد) به‌نام قاب صلب فضایی یا چهارطرفه خوانده می‌شود.

اتصال صلب دو وظیفه اصلی دارد:

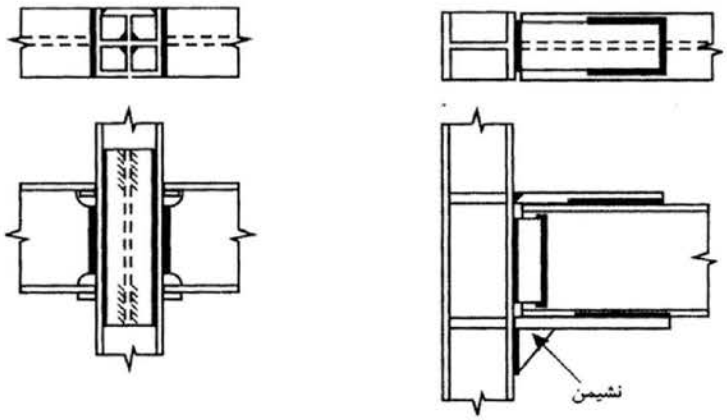
(۱) انتقال لنگر انتهایی تیر به‌ستون ؛

(۲) انتقال برش انتهایی تیر به‌ستون.

در شکل ۱۱ ـ ۱۹ ـ الف، دو حالت برای انتقال لنگر انتهایی تیر به‌ستون نشان داده شده است. در جزییات سمت چپ بال‌های پایینی و بالایی تیر به‌طور مستقیم و بدون هیچ واسطه‌ای با جوش شیاری به‌ستون جوش شده است. اجرای این جزییات در پای کار مشکل است، زیرا طول تیر باید درست به‌اندازه فاصله آزاد دو ستون بریده شود که این عمل به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. در جزییات سمت راست برای اتصال هر دو بال پایینی و بالایی از ورق‌های روسری و زیرسری استفاده شده است.



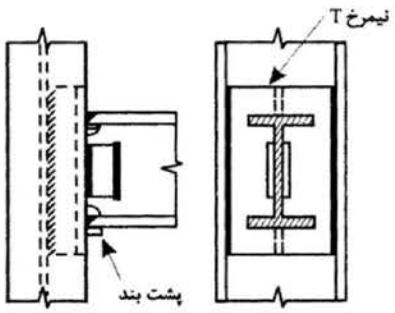
(الف) اتصال مستقیم بال به‌بال توسط جوش شیاری



(ب) سخت‌کننده قائم

(پ) اتصال با ورق روسری و زیرسری

شکل ۱۱ ـ ۱۷ اتصالات صلب تیر به‌ستون از نوع جوشی که در آنها تیر به‌بال ستون متصل شده است.

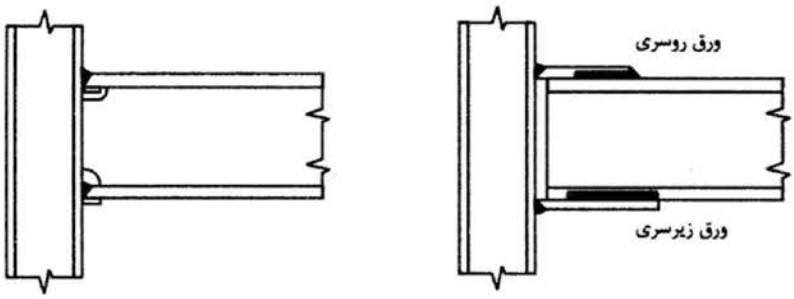


شکل ۱۱ ـ ۱۸ اتصالات صلب تیر به‌ستون از نوع جوشی با استفاده از نیمرخ T برای حالتی که تیر از طرف جان ستون متصل شده است.

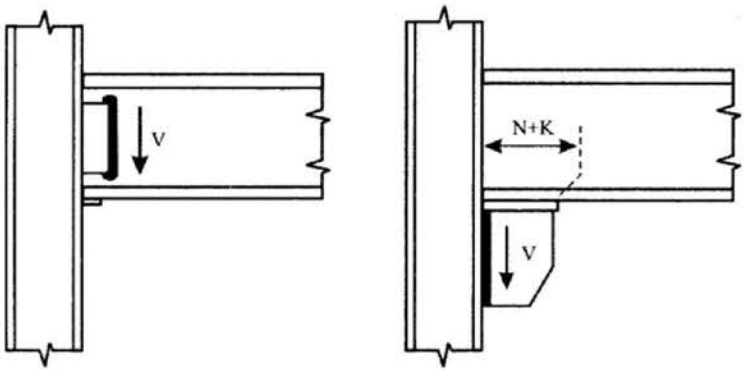
در شکل ۱۱ ـ ۱۹ ـ ب ، دو حالت برای انتقال برش انتهایی تیر به‌ستون نشان داده شده است. در جزییات سمت چپ، برش توسط ورق جان و در جزییات سمت راست توسط نبشی نشیمن انتقال یافته است.

تنوع اتصالات صلب تیر به‌ستون آنقدر زیاد است که مشکل بتوان لیست کاملی از آنها تهیه نمود، لیکن اتصالات نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ ـ ۱۷ تا ۱۱ ـ ۱۹ امروزه به‌نحو گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. قسمتی از اغلب اتصالات در کارخانه و یا در روی زمین انجام می‌شود و باقی آن پس از نصب توسط جوش در محل و یا پیچ‌های پُرمقاومت تکمیل می‌گردد.

هدف اصلی در طرح اتصال صلب، انتقال نیروهای موجود از طریق اتصال بدون هرگونه تغییرشکل موضعی ناشی از این نیروها می‌باشد.



(الف) انتقال لنگر انتهایی تیر



(ب) انتقال برش انتهایی تیر

شکل ۱۱ ـ ۱۹

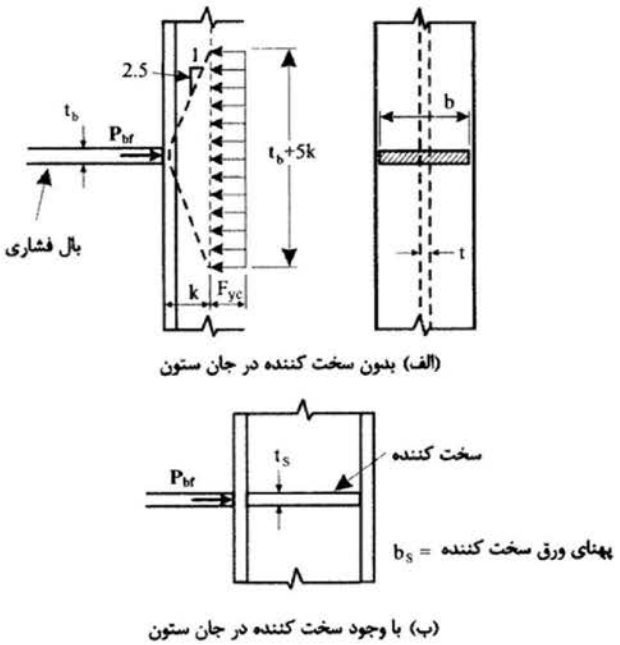
۱۱ ـ ۵ ـ ۲ سخت‌کننده‌های افقی در ناحیه فشاری اتصال

از آنجایی که در اتصال صلب، نیروهای موجود در بال‌های تیر به‌صورت نیروهای فشاری و کششی وارد بال ستون می‌شوند، ممکن است که احتیاج به‌سخت‌کننده‌های فشاری و کششی داشته باشیم (شکل ۱۱ ـ ۱۷ ـ الف و پ). این سخت‌کننده‌ها در ناحیه‌ای که نیروی بال فشاری می‌باشد، از لهیدگی جان ستون و در ناحیه‌ای که نیروی بال، کششی است، از کنده شدن بال ستون جلوگیری می‌نمایند.

در شکل ۱۱ ـ ۲۰ ـ الف، روش آیین‌نامه برای تعیین مقاومت لهیدگی جان ستون در مقابل نیروی فشاری بال تیر نشان داده شده است. در این روش اینطور فرض می‌شود که در مقاومت نهایی جان ستون، نیروی فشاری بال تیر با شیب ۱ به ۲/۵ در جان ستون گسترش می‌یابد تا به‌آغازگردی اتصال جان به‌بال ستون برسد. اگر فاصله شروع‌گردی اتصال جان به‌بال را از سطح خارجی بال مساوی K در نظر بگیریم، پهنای گسترش نیروی فشاری مساوی t_b+5 K می‌شود که در آن t_b مساوی ضخامت بال تیر می‌باشد. در حالت نهایی رابطه تعادل نیروها در امتداد افقی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$P_{bf} = F_{yc}(t_b + 5K)t \qquad (۲۷ - ۱۱)$$

که در آن P_{bf} نیروی نهایی بال فشاری تیر و F_{yc} تنش تسلیم جان ستون می‌باشد. بر پایه فلسفه مقاومت نهایی، اگر خواسته باشیم که تیر در محل اتصال به‌ستون به‌لنگر پلاستیک M_p برسد، مقدار P_{bf} مساوی $F_{yb}A_f$ می‌شود که در آن A_f سطح مقطع و F_{yb} تنش تسلیم بال فشاری می‌باشند.



شکل ۱۱ ـ ۲۰ مقاومت جان ستون در مقابل بال فشاری تیر.

بر پایه تعریف P_{bf} به‌صورت فوق، حداقل ضخامت لازم برای جان ستون به‌منظور جلوگیری از لهیدگی آن در مقابل بال فشاری تیر، به‌صورت زیر در می‌آید:

$$t \geq \frac{A_f F_{yb}}{(t_b + 5K)F_{yc}} \quad , \quad F_{yb} = F_{yc} \rightarrow t \geq \frac{A_f}{(t_b + 5K)} \qquad (۲۸ - ۱۱)$$

در رابطهٔ فوق:

t_b= ضخامت بال فشاری تیر

K= فاصله آغاز گردی اتصال جان به‌بال ستون تا سطح خارجی بال آن

A_f= سطح مقطع بال فشاری تیر

F_{yb}= تنش تسلیم بال تیر (در طراحی لرزه‌ای باید در ۱/۲۵ ضرب شود تا مقدار مورد انتظار به‌دست آید.)

F_{yc}= تنش تسلیم جان ستون

t= ضخامت جان ستون

علاوه بر جلوگیری از لهیدگی جان ستون، از کمانش قائم جان ستون نیز باید اجتناب شود. طبق مطالعات تئوریک، آیین‌نامه برای جلوگیری از کمانش قائم جان، رابطه زیر را پیشنهاد می‌کند:

$$\frac{d_c}{t} \le \frac{34500t^2\sqrt{F_{yc}}}{P_{bf}} \qquad (۲۹ - ۱۱)$$

که در رابطه فوق:

d_c= ارتفاع مقطع ستون به‌سانتی‌متر

t= ضخامت جان ستون برحسب سانتی‌متر

F_{yc}= تنش تسلیم جان ستون برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

P_{bf}= نیروی فشاری بال تیر در حالت نهایی برحسب کیلوگرم

وقتی که یکی از معادلات ۱۱ ـ ۲۸ و ۱۱ ـ ۲۹ برقرار نشود، باید در مقابل بال فشاری تیر سخت‌کننده‌ای تعبیه گردد. در صورتی که ابعاد سخت‌کننده به‌طرز مناسبی انتخاب شود و سخت‌کننده به‌طور کامل در محل خود جوش شود، سخت‌کننده‌ها می‌توانند نیرویی مساوی $A_{st}F_{yst}$ در حالت نهایی تحمل نمایند که در آن A_{st} و F_{yst} به‌ترتیب سطح مقطع و تنش تسلیم سخت‌کننده می‌باشند. بنابراین معادلات تعادل نیروها در ناحیه فشاری در امتداد افقی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$P_{bf} = F_{yc}(t_b + 5K)t + A_{st}F_{yst}$$

با حل معادلهٔ فوق برای A_{st} به‌دست می‌آوریم:

$$A_{st} \ge \frac{P_{bf} - F_{yc}(t_b + 5K)t}{F_{yst}} = \frac{A_f F_{yb} - F_{yc}(t_b + 5K)t}{F_{yst}} \qquad (۳۰ - ۱۱)$$

که تمام جملات فوق در روابط قبل تعریف شده‌اند.

در کنار رابطه ۱۱ ـ ۳۰ و یا در مواقعی که مقدار A_{st} از رابطه ۱۱ ـ ۳۰ منفی به‌دست می‌آید، آیین‌نامه روابط تجربی زیر را برای انتخاب ابعاد سخت‌کننده پیشنهاد می‌کند:

۱ ـ پهنای b_s هر سخت‌کننده به‌علاوه $\frac{۱}{۲}$ ضخامت جان ستون نباید از $\frac{۱}{۳}$ پهنای b بال فشاری تیر (یا هر ورق اتصالی که نیروی P_{bf} را بر بال ستون وارد می‌آورد)، کمتر باشد (در طرح لرزه‌ای، ضریب $\frac{۱}{۳}$ به $\frac{۱}{۲}$ افزایش می‌یابد):

$$b_s + \frac{t}{۲} \geq \frac{b}{۳} \quad \left(\frac{b}{۲}\right. \text{ در طرح لرزه‌ای} \qquad (۱۱ - ۳۱)$$

۲ ـ ضخامت t_s سخت‌کننده نباید از نصف ضخامت بال تیر کمتر باشد و همچنین محدودیت‌های ابعاد قطعات فشاری باید بر آن اعمال شود، به‌طوری که:

$$t_s \geq \frac{t_b}{2} \qquad (۱۱ - ۳۲)$$

$$\frac{b_s}{t_s} < \frac{795}{\sqrt{F_y(kg/cm^2)}} \qquad (۱۱ - ۳۳)$$

۳ ـ جوشی که سخت‌کننده را به‌جان ستون متصل می‌نماید باید برای نیروی ناشی از ظرفیت کششی سخت‌کننده طراحی شود.

۱۱ ـ ۵ ـ ۳ سخت‌کننده در ناحیه کششی اتصال

همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۲۱ ـ الف، نشان داده شده است، در اثر نیروی کششی ناشی از بال کششی تیر، بال ستون به‌طرف بیرون کشیده شده و کنده می‌شود. با استفاده از تحلیل براساس تئوری خطوط گسیختگی[4] برای ورق بالی به‌پهنای q و طول P (شکل ۱۱ ـ ۲۱ ـ ب)، ظرفیت باربری نهایی آن در مقابل نیروی کششی بال کششی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$P_u = F_{yc} t_f^2 \left[\frac{4/\beta + \beta/\beta_1}{2 - \beta_1/\alpha}\right] \qquad (۱۱ - ۳۴)$$

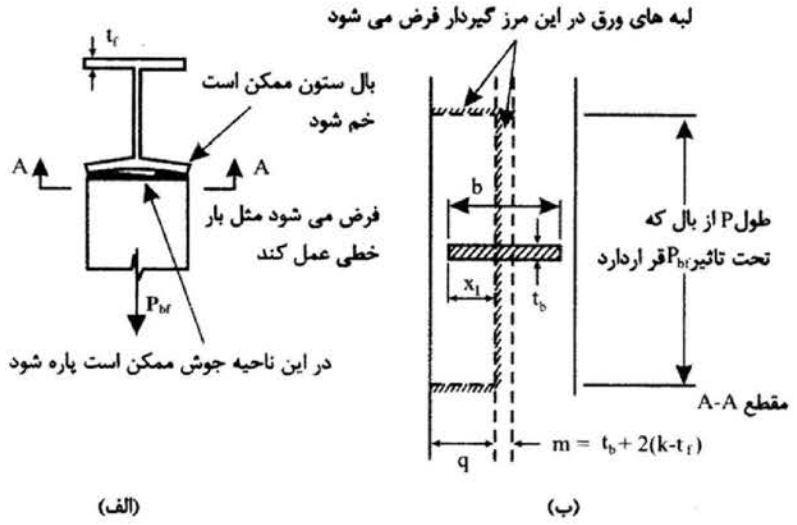
که در آن t_f ضخامت بال ستون و F_{yc} تنش تسلیم بال ستون می‌باشد. به‌علاوه داریم:

$$\beta = \frac{P}{q}$$

$$\alpha = \frac{x_1}{q}$$

$$\beta_1 = \frac{\beta}{4}\left[\sqrt{\beta^2 + 8\alpha} - \beta\right]$$

4. *Yield-line analysis*



شکل ۱۱ ـ ۲۱ مقاومت بال ستون در ناحیه کششی اتصال.

رابطه ۱۱ ـ ۳۴ را به‌طور محافظه‌کارانه‌ای می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$P_u = 3.5F_{yc}t_f^2 \qquad (۱۱ ـ ۳۵)$$

از رابطه فوق به‌دست می‌آید:

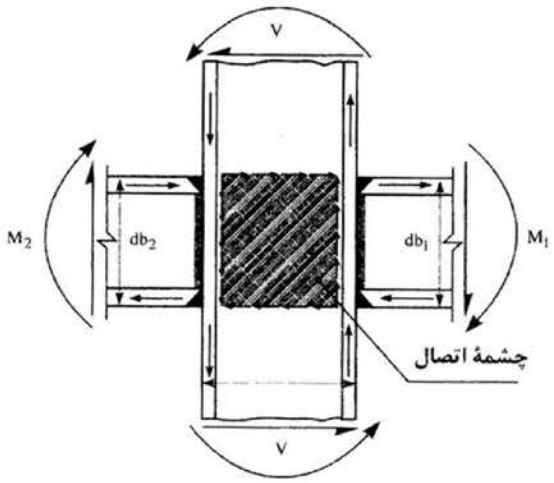
$$t_f \geq 0.4\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yc}}} \rightarrow t_f \geq 0.4\sqrt{\frac{A_f F_{yb}}{F_{yc}}} \quad \left(F_{yb} = F_{yc} \Rightarrow t_f \geq 0.4\sqrt{A_f}\right) \qquad (۱۱ ـ ۳۶)$$

در صورتی که ضخامت بال ستون نتواند رابطه فوق را اقناع نماید، باید یک جفت سخت‌کننده در مقابل بال کششی تیر، در ستون تعبیه گردد. (در طرح لرزه‌ای، F_{yb} باید در ضریب ۱/۲۵ ضرب شود).

در طراحی لرزه‌ای، توصیه می‌شود همواره ورق پیوستگی در مقابل بال‌های کششی و فشاری تیر در جان ستون تعبیه گردد.

چشمهٔ اتصال

چشمهٔ اتصال، ناحیه‌ای از جان یا جان‌های ستون است که محصور بین امتداد بال‌های بالایی و پایینی تیرهای متصل به‌دو وجه ستون و بال‌های ستون می‌باشد.



شکل ۱۱ ـ ۲۲ ناحیهٔ چشمهٔ اتصال

برش مورد نیاز چشمهٔ اتصال

چشمهٔ اتصال باید توانایی تحمل برش نظیر نیروهای کششی و فشاری در بال‌ها، حاصل از لنگرهای حداکثر ناشی از زلزله در تراز بهره‌برداری را داشته باشد. این برش از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است:

$$V_p = \frac{M_1}{d_{b1}} + \frac{M_2}{d_{b2}} - V$$

M_2 , M_1 = به‌ترتیب لنگر انتهایی تیرهای سمت چپ و راست حاصل از بارگذاری قائم و جانبی

V = برش انتهایی ستون فوقانی

d_{b1} و d_{b2} = به‌ترتیب ارتفاع تیرهای سمت چپ و راست

تنش مجاز برشی چشمهٔ اتصال برابر است با:

اگر $\frac{f_a}{F_y} \le 0.5$

$$F_v = 0.4F_y\left(1+\frac{3b_{cf}\ t^2_{cf}}{d_b d_c t_{cw}}\right)$$

اگر $\frac{f_a}{F_y} > 0.5$

$$F_v = 0.4F_y\left(1+\frac{3b_{cf}\ t^2_{cf}}{d_b d_c t_{cw}}\right)\left(1.9-1.8\frac{f_a}{F_y}\right)$$

که در آن:

t_{cw} = ضخامت جان (یا جان‌های) ستون، به‌علاوهٔ ضخامت ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال در صورت وجود

d_b = ارتفاع مقطع تیر (یا فاصلهٔ ورق‌های پوششی اتصال بال‌های تیر به‌ستون)

d_c = ارتفاع مقطع ستون در جهت اثر برش

b_{cf} = عرض بال ستون

t_{cf} = ضخامت بال ستون

f_a = تنش محوری فشاری موجود ستون در اثر بارهای ثقلی

روابط فوق برای ستون‌های با مقطع H شکل است که در آنها نیروی برشی جانبی لرزه‌ای در راستای صفحهٔ جان وارد می‌گردد.

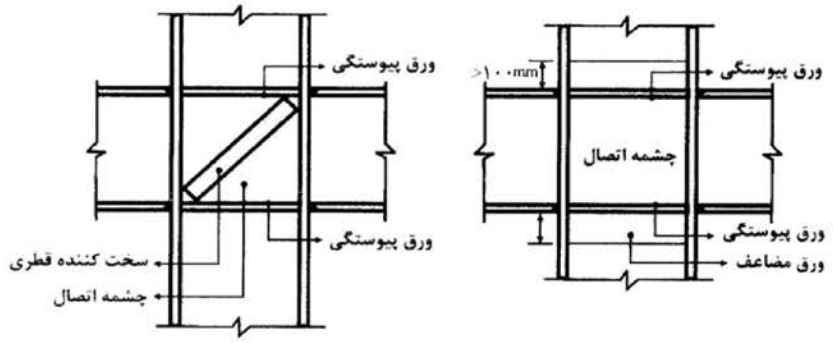
برای ستون‌های با مقطع قوطی شکل، تنش موجود و مجاز برشی با قرار دادن مجموع ضخامت جان‌های ستون و ضخامت ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال، در صورت وجود به‌جای t_{cw} در روابط فوق به‌دست می‌آید. برای ستون‌های با مقطع H که در آنها نیروی برشی جانبی لرزه‌ای عمود بر صفحهٔ جان وارد می‌گردد، تنش موجود با جایگزین کردن t_{cw} با $2t_{cf}$ و تنش مجاز برشی، با حذف جملهٔ $\frac{3b_{cf}\ t_{cf}^2}{d_b d_c\ t_{cw}}$ از روابط فوق به‌دست می‌آید.

جوش اتصال جان (یا جان‌های) ستون در ناحیهٔ چشمهٔ اتصال به‌بال ستون باید برای نیروی برشی چشمهٔ اتصال طراحی شود. در این مورد طول اتصال جوشی می‌تواند برابر عمق تیر به‌اضافهٔ عمق ستون در بالا و پایین ورق‌های پیوستگی در نظر گرفته شود.

ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال

در صورتی که برش مورد نیاز چشمهٔ اتصال از تنش مجاز برشی چشمهٔ اتصال بیشتر باشد، تعبیهٔ ورق تقویتی جان (ورق مضاعف) و یا یک جفت سخت‌کنندهٔ قطری دارای مقاومتی حداقل برابر با اختلاف برش مورد نیاز و تنش مجاز برشی در محدودهٔ چشمهٔ اتصال ضروری است.

ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال به‌منظور کاهش تنش برشی جان (یا جان‌های) ستون و علاوه بر آن در صورتی که با جوش انگشتانه کافی، به‌جان (جان‌های) ستون متصل شوند، برای جلوگیری از ناپایداری جان (یا جان‌های) ستون به‌کار گرفته می‌شوند. این ورق‌ها باید چسبیده به‌جان ستون و یا با فاصلهٔ از آن، به‌صورت متقارن نسبت به محور تقارن مقطع ستون ـ که موازی جهت اثر نیروی برشی می‌باشد ـ به‌کار روند.



شکل ۱۱ ـ ۲۳ نمایش سخت‌کننده‌های قطری و ورق مضاعف در چشمهٔ اتصال.

پایداری ورق‌های چشمهٔ اتصال

ضخامت هر یک از ورق‌های واقع در چشمهٔ اتصال، شامل جان (یا جان‌های) ستون و ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال، باید رابطهٔ زیر را برآورده نماید:

$$t_z \geq \frac{(d_z + w_z)}{90}$$

که در آن:

t_z = ضخامت جان (یا هر یک از جان‌های) ستون یا هر یک از ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال

d_z = عمق چشمهٔ اتصال که فاصلهٔ خالص بین ورق‌های پیوستگی می‌باشد.

w_z = عرض چشمهٔ اتصال که فاصلهٔ خالص بین بال‌های ستون می‌باشد.

در صورتی که ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال، با جوش انگشتانه کافی به‌جان ستون متصل شده باشند، مجموع ضخامت جان ستون و ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال به‌عنوان t_z منظور می‌گردد.

مقررات تکمیلی برای ورق‌های تقویتی جان (ورق مضاعف) در مقابل نیروهای متمرکز

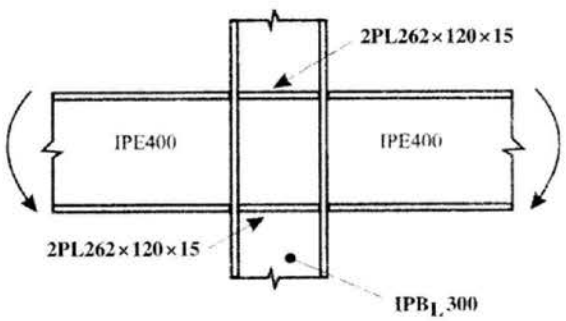
ورق‌های تقویتی جان (ورق مضاعف) باید شرایط زیر را برآورده نمایند:

۱ ـ ضخامت ورق مضاعف و ابعاد آن باید جبران کمبود تنش مجاز موجود را بنماید.

۲ ـ ورق‌های مضاعف باید به‌بال‌های ستون و ورق‌های پیوستگی بالایی و پایینی متصل گردند و یا مطابق شکل ۱۱ ـ ۲۳ قبل از ورق پیوستگی به‌اندازهٔ ۱۰۰ میلی‌متر عبور کرده و به‌جان ستون جوش شوند. جوش‌های فوق برای سهم ورق مضاعف از برش چشمهٔ اتصال طراحی می‌گردند.

مثال ۱۱ ـ ۶

مطلوب است طراحی اتصال صلب دو تیر IPE400 به‌بال‌های ستونی از نیمرخ بال پهن سبک IPB_L300 . تنش تسلیم فولاد تیر و ستون ۳۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش تسلیم سخت‌کننده‌های مورد مصرف ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد (شکل ۱۱ ـ ۲۴).



شکل ۱۱ ـ ۲۴ مربوط به‌مثال ۱۱ ـ ۶.

حل:

مشخصات نیمرخ‌های مصرفی برحسب سانتی‌متر:

	IPE400	IPB_L300
ارتفاع	۴۰	۲۹
پهنای بال	۱۸	۳۰
ضخامت بال	۱/۳۵	۱/۴
ضخامت جان	۰/۸۶	۰/۸۵
K	۳/۴۵	۴/۱

الف) ناحیه فشاری

ناحیه فشاری را برای حداکثر نیروی فشاری بال تیر طراحی می‌نماییم:

$$P_{bf} = A_f F_{yb} = (18)(1.35)(3500)10^{-3} = 85.05 \text{ ton}$$

ضخامت لازم جان ستون برای جلوگیری از لهیدگی (رابطه ۱۱ ـ ۲۸):

$$t \geq \frac{P_{bf}}{(t_b + 5K)F_{yc}} = \frac{85.05(1000)}{(1.35 + 5(4.1))3500} = 1.11 \text{ cm}$$

ضخامت لازم جان ستون برای جلوگیری از کمانش قائم (رابطه ۱۱ ـ ۲۹):

$$t \geq \sqrt[3]{\frac{P_{bf} d_c}{34500\sqrt{F_{yc}}}} = \sqrt[3]{\frac{85.05(10)^3 29}{34500\sqrt{3500}}} = 1.07 \text{ cm}$$

چون ضخامت جان ستون (مساوی ۰/۸۵ سانتی‌متر) کمتر از ضخامت لازم برای لهیدگی و کمانش می‌باشد، احتیاج به‌سخت‌کننده‌های فشاری در این ناحیه داریم:

$$A_{st} \geq \frac{P_{bf} - F_{yc}(t_b + 5K)t}{F_{yst}} = \frac{85.05(1000) - 3500(1.35 + 5 \times 4.10)0.85}{2400} = 8.35 \text{ cm}^2$$

با استفاده از رابطهٔ ۱۱ ـ ۳۱ برای حداقل پهنای سخت‌کننده داریم:

$$b_s + \frac{t}{2} \geq \frac{b}{3}$$

$$b_s + \frac{0.85}{2} \geq \frac{18}{3}$$

$$b_s = 5.57 \text{ cm}$$

پهنای سخت‌کننده را مساوی ۱۲ سانتی‌متر در نظر می‌گیریم.

حداقل ضخامت سخت‌کننده با استفاده از رابطه ۱۱ ـ ۳۲:

$$\text{حداقل}\quad t_s = \frac{t_b}{2} = \frac{1.35}{2} = 0.675\ \text{cm}$$

ضخامت سخت‌کننده را مساوی ۱۵ میلی‌متر در نظر می‌گیریم.

کنترل حداقل ضخامت برای جلوگیری از کمانش موضعی

برحسب نوع طراحی ممکن است یکی از حالات زیر موجود باشد:

۱. روش تنش‌های مجاز ـ مقطع غیرفشرده

$$\frac{b_s}{t_s} \le \frac{795}{\sqrt{F_y}} = \frac{795}{\sqrt{2400}} = 16.2$$

$$t_s \ge \frac{b_s}{16.2} = \frac{12}{16.2} = 0.74\ \text{cm}$$

۲. روش تنش‌های مجاز ـ مقطع فشرده

$$\frac{b_s}{t_s} \le \frac{545}{\sqrt{F_y}} = \frac{545}{\sqrt{2400}} = 11.1$$

$$t_s \ge \frac{b_s}{11.1} = \frac{12}{11.1} = 1.08\ \text{cm}$$

ضخامت انتخابی ۱۵ میلی‌متر جوابگوی هر دو مورد بالا می‌باشد.

$$\text{موجود}\quad A_{st} = 2\times 12\times 1.5 = 36\ \text{cm}^2 > 8.35$$

از دو ورق ۱۵× ۱۲۰ × ۲۶۲ میلی‌متر استفاده می‌کنیم.

ب) ناحیه کششی

با استفاده از رابطه ۱۱ ـ ۳۶ داریم:

$$t_f \ge 0.4\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yc}}} = 0.4\sqrt{\frac{85.05\times 10^3}{3500}} = 1.97\ \text{cm}$$

ضخامت بال ستون ۱/۴ سانتی‌متر است که از مقدار فوق کمتر می‌باشد. بنابراین در ناحیه کششی نیز احتیاج به‌سخت‌کننده داریم. با اینکه در ناحیه کششی هیچ‌گونه خطر کمانش موضعی برای سخت‌کننده‌ها وجود ندارد، لیکن باید تمام دستورات آیین‌نامه را که به‌دنبال رابطه ۱۱ ـ ۳۰ آورده‌ایم، رعایت نماییم. بنابراین در ناحیه کششی نیز از دو ورق ۱۵× ۱۲۰ × ۲۶۲ میلی‌متر استفاده می‌کنیم.

پ) کنترل چشمهٔ اتصال

جهت کنترل چشمهٔ اتصال نیروی محوری ستون را ۱۵۰ تن فرض می‌کنیم.

کنترل برش در چشمهٔ اتصال (فرض می‌شود که تأثیر تغییرشکل چشمهٔ اتصال در تحلیل سازه منظور نمی‌شود):

$$V_p = 2\times 0.66 A_f . F_y = 2\times 0.66(18\times 1.35)\times 3500\times 10^{-3} = 112.3 \text{ ton}$$

محاسبهٔ تنش برشی مجاز F_v (با فرض $f_a / F_y \le 0.5$):

$$F_v = 0.4F_y\left[1+\frac{3b_{cf}\ t_{cf}^2}{d_b d_c t_{cw}}\right]$$

$$F_v = 0.4(3500)\left[1+\frac{3(30)(1.4)^2}{(40)(29)(0.85)}\right] = 1400(1.18) = 1652 \text{kg/cm}^2$$

$$V_a = 1652\times d_c t_w = 1652\times 29\times 0.85\times 10^{-3} = 40.7 \text{ ton}$$

چون نیروی برشی مؤثر بر اتصال بیش از مقدار محاسبه شده می‌باشد، استفاده از ورق مضاعف و یا سخت‌کنندهٔ قطری برای تحمل اختلاف برش موجود و برش مقاوم لازم است.

$$\Delta V = V_p - V_a = 112.3 - 40.7 = 71.6 \text{ ton}$$

تعیین ضخامت ورق مضاعف:

ورق مضاعف $h = 29 - 1.4\times 2 = 26.2$ cm

$$t\times 26.2\times 0.4\times 3500 = 71.6\times 10^3 \Rightarrow t = 1.95 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow t = 20 \text{ mm}$$

(از جملهٔ افزایش مقاومت برشی صرف‌نظر شده است)

می‌توان از دو ورق مضاعف ۱۰ میلی‌متر در دو طرف جان استفاده نمود.

پایداری ورق‌های چشمهٔ اتصال

حداقل ضخامت هر یک از ورق‌های چشمهٔ اتصال برابر است با:

$$t_z \ge \frac{(d_z + w_z)}{90}$$

d_z = عمق چشمهٔ اتصال $= 40 - 2\times 1.5 = 37$ cm

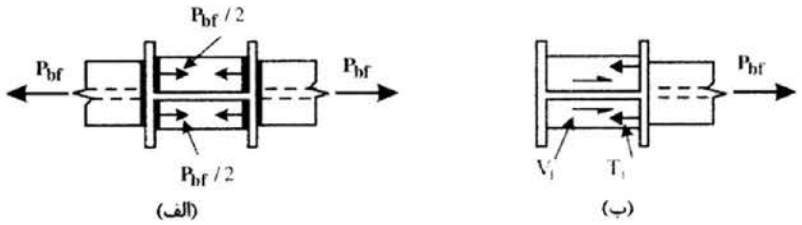
w_z = عرض چشمهٔ اتصال $= 30 - 2\times 4.1 = 21.8$ cm

$$t_z \ge \frac{(37 + 21.80)}{90} = 0.65 \text{ cm}$$

در طرح حاضر ضخامت جان چشمهٔ اتصال شامل جان ستون و ورق مضاعف بیش از مقدار t_z بوده و چشمهٔ اتصال پایدار است.

ت) اتصال ورق‌های سخت‌کننده به‌ستون

در شکل ۱۱ ـ ۲۵ نیروهایی که جوش سخت‌کننده‌ها باید برای آنها طرح شوند، نشان داده شده است. وقتی که تیرها از هر دو طرف به‌بال ستون متصل گردند و نیروهای بال هر دوی آنها نیز P_{bf} باشد، جوش هر دو انتهای ورق سخت‌کننده باید برای انتقال آن قسمت از نیروی P_{bf} که به‌طور مستقیم توسط جان ستون گرفته نمی‌شود، طراحی گردد. در این حالت جوش اتصالی سخت‌کننده به‌جان ستون هیچ‌گونه نقشی در انتقال نیرو ندارد و جوش حداقل اسمی برای آن کافی می‌باشد.



شکل ۱۱ ـ ۲۵ نیروهای لازم برای طراحی جوش سخت‌کننده‌ها.

ث) تعیین اندازه جوش دو انتهای سخت‌کننده

یک راه منطقی برای تعیین جوش این است که مقاومت جوش برابر مقاومت ورق شود. با استفاده از تنش‌های مجاز آیین‌نامه داریم:

$$0.6F_y t_s = 2(650)D$$

D اندازه ساق جوش می‌باشد.

$$0.6(2400)1.2 = 2(650)D$$
$$D = 1.33\ \text{cm}$$

D را مساوی ۱۵ میلی‌متر در نظر می‌گیریم. می‌توان از جوش شیاری تمام نفوذی نیز استفاده نمود.

حداقل D نیز ۶ میلی‌متر می‌باشد که از آن در امتداد اتصال سخت‌کننده به‌جان استفاده می‌نماییم.

وقتی که تیر فقط از یک طرف به ستون متصل می‌شود، مثل شکل ۱۱ ـ ۲۵ ـ ب، در جوش اتصالی سخت‌کننده به‌جان ستون، نیروی برشی V_1 تولید می‌شود که مساوی نیروی کششی T_1 می‌باشد.

۱۱ ـ ۵ ـ ۴ استفاده از سخت‌کننده‌های قائم و سخت‌کننده‌های T

گاهی مواقع لازم می‌گردد که در اتصالات صلب تیر به‌ستون همانند شکل ۱۱ ـ ۱۸، از ورق قائم و یا نیمرخ T استفاده نماییم. این کار بخصوص در سیستم‌های چهارطرفه که در آن تیرها به‌جان ستون متصل می‌شوند، بسیار مفید خواهد بود. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که یک سخت‌کننده قائم که به‌لبه‌های بال ستون جوش شده است، به‌اندازه نصف جان مؤثر است.

بنابراین با فرض دو سخت‌کننده قائم (هر یک در یکی از لبه‌های بال) که هر یک به‌اندازه نصف ظرفیت جان (رابطه ۱۱ ـ ۲۷)، دارای ظرفیت باربری می‌باشند، رابطه‌ای معادل رابطه ۱۱ ـ ۲۷ برای این حالت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

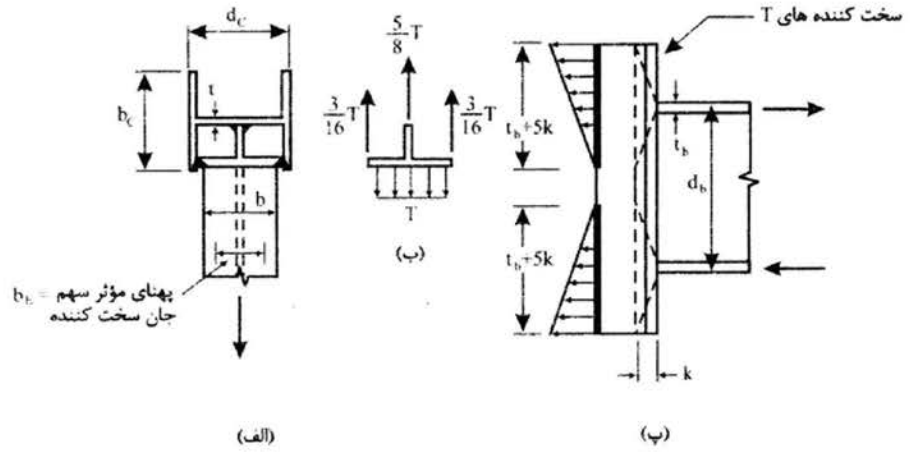
$$P_{bf} = F_{yc}(t_b + 5K)t + 2\left(\frac{F_{yst}}{2}\right)(t_b + 5K)t_s \qquad (۱۱ ـ ۳۷)$$

که از حل آن برای ضخامت سخت‌کننده t_s به‌دست می‌آوریم:

$$t_s \geq \frac{P_{bf}}{(t_b + 5K)F_{yst}} - t\frac{F_{yc}}{F_{yst}} \qquad (۱۱ ـ ۳۸)$$

اگر سخت‌کننده قائم فقط یک ورق باشد، کمانش کلی آن باید توسط رابطه ۱۱ ـ ۲۹ کنترل گردد. وقتی که از نیمرخ‌های T استفاده می‌نماییم، اتصال ساق آن به‌جان ستون از کمانش کلی آن جلوگیری می‌کند.

برای طراحی سخت‌کننده‌های T و اتصال آن وقتی که تیری به‌آن متصل می‌شود، همانند شکل ۱۱ ـ ۱۸، نکات مخصوصی را باید در نظر گرفت. اگر پهنای بال تیر مساوی پهنای سخت‌کننده T باشد، عمل آن مطابق شکل ۱۱ ـ ۲۶ ـ الف، خواهد بود. برای تحلیل، نیروی کششی ناشی از بال را به‌صورت بار گسترده یکنواختی در روی سخت‌کننده درنظرمی‌گیریم که خود سخت‌کننده نیز به‌صورت تیر یکسره دو دهانه عمل می‌نماید (شکل ۱۱ ـ ۲۶ ـ ب). در این تیر یکسره $\frac{5}{8}$ نیروی T به‌تکیه‌گاه وسطی و $\frac{3}{16}$ آن به‌دو تکیه‌گاه کناری منتقل می‌شود. بلاجت[5] پیشنهاد می‌کند که وقتی پهنای تیر به‌اندازه پهنای سخت‌کننده T می‌باشد، می‌توان فرض نمود که پهنای مؤثر بال b_E (شکل ۱۱ ـ ۲۶ ـ الف) که نیروی خود را به‌جان سخت‌کننده می‌دهد، $\frac{3}{4}$ پهنای بال تیر می‌باشد.



شکل ۱۱ ـ ۲۶ سخت‌کننده T.

5. *Blodgett*

وقتی که پهنای بال تیر تقریباً مساوی پهنای بال سخت‌کننده T باشد، روش طرح این‌گونه اتصالات را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱ ـ ضخامت جان سخت‌کننده T باید رابطه ۱۱ ـ ۲۸ را اقناع نماید، یعنی:

$$t_w \geq \frac{0.75P_{bf}}{(t_b + 5K)F_{yst}} \qquad (۱۱ - ۳۹)$$

که در آن:

$0.75P_{bf}$ = سهمی از نیروی بال تیر (که ضریب بار در آن اعمال شده است) که وارد جان سخت‌کننده می‌شود.

K= فاصله ریشه اتصال بال به‌جان تا سطح خارجی بال در سخت‌کننده T

t_b = ضخامت بال تیر

۲ ـ ضخامت بال سخت‌کننده T یعنی t_s باید قادر به‌حمل نیروی کششی بال بدون هرگونه تغییرشکل بیش از حد باشد، بنابراین رابطه ۱۱ ـ ۳۶ باید اقناع شود. البته این رابطه در این مورد مقداری محافظه‌کارانه است، زیرا رابطه مزبور در اصل برای شرایط آزاد لبه‌های بال تنظیم شده است، در حالی که در حالت اخیر لبه‌های بال جوش شده است. همانند بند ۱ با استفاده از P_{bf} ۰/۷۵ به‌دست می‌آوریم:

$$t_s \geq 0.4\sqrt{\frac{0.75P_{bf}}{F_{yst}}} = 0.35\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yst}}} \qquad (۱۱ - ۴۰)$$

۳ ـ پهنای بال سخت‌کننده T یعنی d_s باید فاصله تودلی بین بال‌های ستون را کاملاً پُر نماید.

که در آن:

d_c= ارتفاع کل نیمرخ ستون

t_f= ضخامت بال نیمرخ ستون

$$b_s = d_c - 2t_f \qquad (۱ - ۴۱ - الف)$$

۴ ـ ارتفاع نیمرخ سخت‌کننده T یعنی d_s باید آنقدر باشد تا سطح خارجی بال سخت‌کننده، همباد لبه‌های ستون قرار گیرد:

$$d_s = \frac{b_c - t}{2} \qquad (۱ - ۴۱ - ب)$$

که در آن:

b_c= پهنای بال ستون

t_f= ضخامت جان ستون

وقتی که پهنای بال تیر به‌طور محسوسی کمتر از پهنای بال سخت‌کننده T باشد (حدود ۲ تا ۴ سانتی‌متر)، در روابط ۱۱ ـ ۳۹ و ۱۱ ـ ۴۰ به‌جای $0.75P_{bf}$ از P_{bf} استفاده می‌نماییم.

در محاسبه جوش‌های سخت‌کننده در حالتی که پهنای بال تیر تقریباً مساوی پهنای بال سخت‌کننده می‌باشد، جوشی که جان سخت‌کننده را به‌جان ستون متصل می‌نماید (دو قطعه جوش در بالا و پایین که هرکدام دارای دو رشته جوش گوشه می‌باشد) باید قادر به‌حمل لنگر خمشی ناشی از $0.75P_{bf}$ باشد. جوش‌هایی که لبه بال سخت‌کننده را به‌لبه بال ستون متصل می‌نمایند، پیشنهاد می‌شود که برای $\frac{۱}{۳}$ نیروی بال تیر طراحی شوند ($\frac{۱}{۳}$ ، مقداری بزرگتر از $\frac{۳}{۱۶}$ می‌باشد که در شکل ۱۱ ـ ۲۶ ـ ب نشان داده شده است).

مثال ۱۱ ـ ۷

مطلوب است طراحی اتصال صلب تیر به‌ستون با استفاده از سخت‌کننده T از نوعی که در شکل ۱۱ ـ ۲۶ نشان داده شده است. تیر از نیمرخ IPB۲۴۰ و ستون از نیمرخ IPB۳۰۰ می‌باشد. فولاد تیر و ستون از نوع ST۳۷ با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند.

حل:

مشخصات، IPB۲۴۰ و IPB۳۰۰ به‌شرح زیر است (ابعاد برحسب سانتی‌متر):

	ارتفاع	پهنای بال	ضخامت بال	ضخامت جان	K
IPB۲۴۰	۲۴	۲۴	۱/۷	۱/۰	۳/۸
IPB۳۰۰	۳۰	۳۰	۱/۹	۱/۱	۴/۶

چون پهنای بال تیر (۲۴ سانتی‌متر)، تقریباً مساوی فاصله تودلی بین بال‌های ستون $(30-1.9\times2=26.2)$ است، روابط ۱۱ ـ ۳۹ و ۱۱ ـ ۴۰ قابل استفاده می‌باشند.

الف) تعیین ضخامت جان سخت‌کننده برای جلوگیری از لهیدگی جان

حداکثر نیروی بال P_{bf} برابر است با:

$$P_{bf} = A_f F_y = (24)(1.7)2400(10^{-3}) = 97.92 \text{ ton}$$

با استفاده از رابطه ۱۱ ـ ۳۹ و تخمین K=۲/۶ cm برای سخت‌کننده:

$$\text{لازم } t_w = \frac{0.75P_{bf}}{(t_b + 5K)F_{yst}} = \frac{0.75(97.92)(1000)}{(1.7+5(2.6))2400} = 2.08 \text{ cm}$$

ب) تعیین ضخامت بال سخت‌کننده به‌منظور جلوگیری از تغییرشکل آن در مقابل نیروهای کششی

با استفاده از رابطه ۱۱ ـ ۴۰ داریم:

$$\text{لازم}\quad t_s = 0.35\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yst}}} = 0.35\sqrt{\frac{97.92(10^3)}{2400}} = 2.24\ \text{cm}$$

پ) تعیین نیمرخ T مناسب

$$\text{حداکثر}\quad b_s = d_c - 2t_f = 30 - 2(1.9) = 26.2\ \text{cm}$$

$$\text{حداکثر}\quad d_s = 0.5(30 - 1.1) = 14.45\ \text{cm}$$

نیمرخ T مورد نظر را با برش یک نیمرخ IPB۳۶۰ به‌دست می‌آوریم:

$$\text{ضخامت بال} = t_s = 2.25\ \text{cm}$$

$$\text{ضخامت جان} = t_w = 1.25\ \text{cm}$$

$$K = 4.95\ \text{cm}$$

کنترل ضخامت جان:

$$t_w = \frac{0.75(97.92)(1000)}{(1.7 + 5(4.95))2400} = 1.16\ \text{cm} < 1.25$$

ت) جوش جان سخت‌کننده

با مراجعه به‌شکل ۱۱ ـ ۲۴ ـ پ، طول لازم سخت‌کننده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

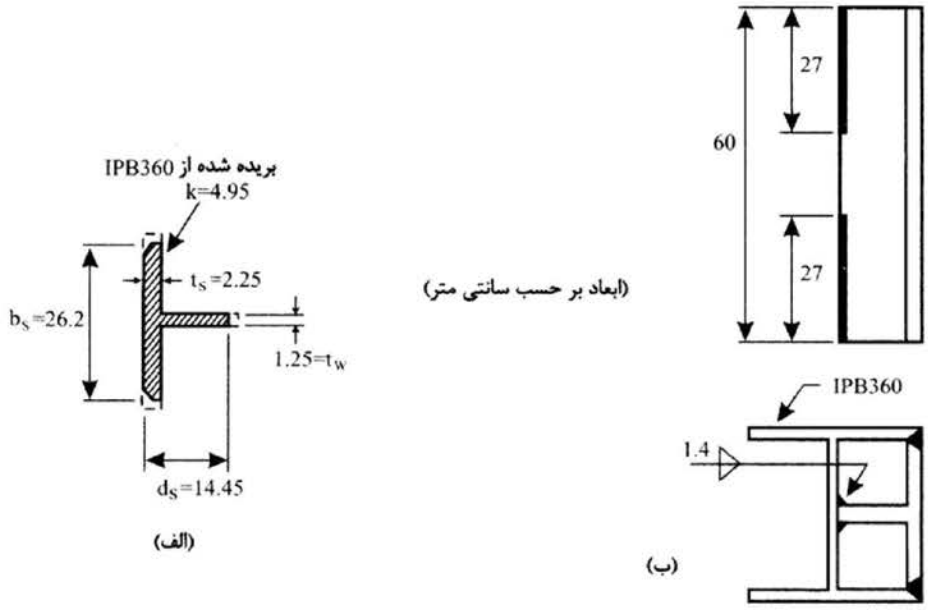
$$\text{طول لازم} = d_b + 5K = 24 + 5(4.95) = 48.75\ \text{cm}$$

طول سخت‌کننده را مساوی ۶۰ سانتی‌متر فرض می‌نماییم.
طول جوش در بالا و پایین:

$$t_b + 5K = 1.7 + 5(4.95) = 26.45\ \text{cm}$$

طول جوش را در هر طرف مساوی ۲۷ سانتی‌متر در نظر می‌گیریم.
فرض می‌شود که ۷۵ درصد لنگر خمشی تیر به‌جان سخت‌کننده انتقال پیدا می‌کند.

$$0.75M = 0.75F_bS = 0.75(1400)(938)(10^{-5}) = 9.85\ \text{ton.m}$$



شکل ۱۱ ـ ۲۷ مشخصات هندسی نیمرخ T.

محاسبه اساس مقطع جوش (با فرض پهنای واحد):

$$S = 2\left(\frac{1}{30}\right)\left[\frac{60^3}{12} - \frac{6^3}{12}\right] = 1199\ \text{cm}^3/\text{cm}$$

$$R_w = \frac{9.85(10^5)}{1199} = 822\ \text{kg/cm}^2$$ موجود

ارزش مجاز جوش = 650D

$650\ D = 822$

$D = 1.26\ \text{cm}$

از جوش گوشه ۱۴ میلی‌متر در هر طرف استفاده می‌کنیم.

کنترل تنش خمشی در جان سخت‌کننده:

$$f = \frac{M}{S}$$

$$S = 1.25\frac{60^2}{6} = 750\ \text{cm}^3$$

$$f = \frac{9.85(10^5)}{750} = 1313\ \text{kg/cm}^2 < 1400\ \text{kg/cm}^2$$

ث) جوش لبه‌های سخت‌کننده

به‌طور محافظه‌کارانه فرض می‌کنیم که جوش لبه‌های سخت‌کننده T به‌لبه‌های ستون، $\frac{1}{3}$ نیروی بال را حمل می‌کند (شکل‌های ۱۱ ـ ۲۶ ـ الف و ب). همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۲۸ نشان داده شده است، می‌توان فرض نمود که نیروی متمرکز بال در فاصله‌ای برابر $t_b+5\ t_s$ توزیع شده است.

با فرض اینکه بال تا تنش ۱۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بارگذاری شده است، نیروی کششی (شکل ۱۱ـ۲۸) برابر است با:

$$T = F.t_b.\left(\frac{b}{3}\right) = 1400(1.7)\left(\frac{24}{3}\right)10^{-3} = 19.04 \text{ ton}$$

$$t_b + 5t_s = 1.7 + 5(2.25) = 12.95 \text{ cm}$$

$$\text{نیروی وارد بر واحد طول جوش} = \frac{19.04(10^3)}{12.95} = 1470 \text{ kg/cm}$$

اگر بخواهیم از جوش شیاری با نفوذ نسبی استفاده نماییم، ضخامت مؤثر گلو برابر است با:

$$\text{تنش برشی مجاز در جوش شیاری} = 900 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_e = \frac{1470}{900} = 1.63 \text{ cm}$$

از جوش شیاری نیم‌جناغی (V) با ضخامت گلوی ۱۸ میلی‌متر استفاده می‌کنیم. اگر از جوش شیاری با نفوذ کامل استفاده نماییم، نیاز به‌محاسبه نداریم.

ج) اثر نیروی برشی تیر

معمولاً طول جوش سخت‌کننده به‌ستون آنقدر زیاد است که بتوان از ظرفیت اضافی لازم برای حمل نیروی برشی انتهایی مطمئن شد.

$$\text{حداکثر ظرفیت برشی مجاز IPB240} = 24(1)(960)(10^{-3}) = 23.04 \text{ ton}$$

البته امکان اینکه از حداکثر ظرفیت خمشی و برشی به‌طور همزمان استفاده شود، بسیار بعید به‌نظر می‌رسد. بنابراین نیروی برشی وارد بر اتصال را در حدود ۱۵ تن در نظر می‌گیریم.

طول جوش شیاری در بال+ طول جوش گوشه در جان = طول کل جوش موجود

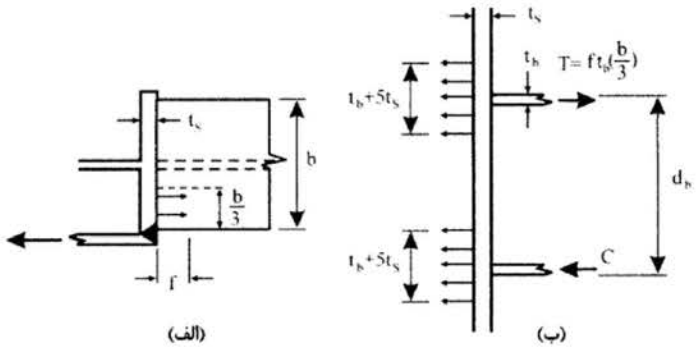
$$= 4(25) + 2(60) = 220 \text{ cm}$$

$$\text{ظرفیت لازم جوش} = \frac{15(1000)}{220} = 68.2 \text{ kg/cm}$$

$$\text{افزایش اندازهٔ ساق جوش گوشه} = \frac{68.2}{650} = 0.1 \text{ cm}$$

$$\text{افزایش گلوی جوش شیاری} = \frac{68.2}{900} = 0.08 \text{ cm}$$

با توجه به‌اندازه‌های انتخابی که بزرگتر از اندازه‌های محاسبه‌شده در نظر گرفته شده‌اند، لزومی به‌تصحیح اندازه جوش نداریم. البته لازم به‌تذکر است که تنش‌های ناشی از خمش و برش با هم زاویه ۹۰ درجه می‌سازند و جمع جبری انجام‌شده در فوق همیشه از جمع برداری محافظه‌کارانه‌تر می‌باشد.



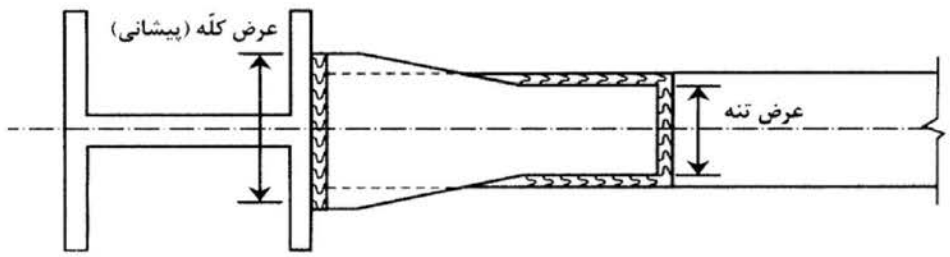
شکل ۱۱ ـ ۲۸ گسترش نیروی متمرکز بال در جوش سخت‌کننده.

۱۱ ـ ۵ ـ ۵ ورق‌های روسری و زیرسری

یک وسیله ساده برای انتقال لنگر از تیر به‌ستون استفاده از ورق کششی در بالای تیر (ورق روسری) و ورق فشاری در پایین تیر (ورق زیرسری) می‌باشد. (شکل‌های ۱۱ ـ ۱۷ و ۱۱ ـ ۱۹).

ورق روسری

اگر جوش شیاری اتصال‌دهنده ورق کششی به‌ستون بدون انجام آزمایش غیرمخرب در نظر گرفته شود، تنش کششی مجاز آن ۱۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باید در نظر گرفته شود که از تنش کششی مجاز ورق کمتر است. در این موارد لازم است که پهنای ورق در ناحیه جوش بزرگتر انتخاب شود که در این صورت ورق به‌شکل ۱۱ ـ ۲۹ (کله‌گاوی) در می‌آید.



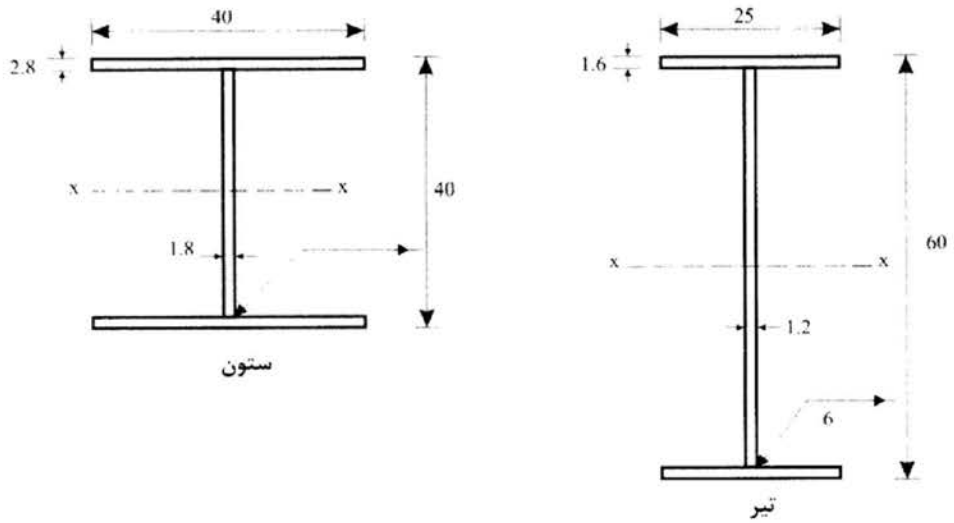
شکل ۱۱ ـ ۲۹ ورق روسری کله‌گاوی.

مثال ۱۱ ـ ۸

مطابق شکل ۱۱ ـ ۳۱ طراحی اتصال صلب یک‌تیر ورق به‌ستون ساخته‌شده از ورق مورد نظر می‌باشد. از ضوابط مبحث دهم و الکترود E60 (با $F_u = 4200\ kg/cm^2$) و $\phi = 0.75$ و فولاد ST۳۷ باتنش تسلیم $F_y = 2400\ kg/cm^2$ استفاده نمایید.

ترکیب بار	برش (تن)	لنگر (تن. متر)
DL	۱۰	۱۴/۰
LL	۳/۸	۷/۰
DL+LL	۱۳/۸	۲۱/۰
EQ	۱۱/۲	۳۲/۳۳
DL+LL+EQ	۲۵	۵۳/۳۳
۰/۷۵ (DL+LL+EQ)	۱۸/۷۵	۴۰/۰

حاکم



$C_t = C_b = 20cm$

$A = 285.92cm^2$

$I_x = 83747.52cm^4$

$r_x = 17.1cm$

$S_t = S_b = 4187.38cm^3$

$C_t = C_b = 30cm$

$A = 148.16cm^2$

$I_x = 86553.31cm^4$

$r_x = 24.17cm$

$S_t = S_b = 2885.1cm^3$

شکل ۱۱ ـ ۳۰

حل:

طراحی ورق‌های فوقانی و تحتانی (روسری و زیرسری)

$$\text{نیروی کششی ورق} = T = \frac{40}{0.6} = 66.67 \text{ ton}$$

$$\text{تنش کششی مجاز ورق} = 0.6 \times 2400 = 1440 \text{ kg/cm}^2$$

جوش شیاری اتصال‌دهنده ورق فوق به‌ستون در کارگاه تحت نظر بازرسی‌های چشمی انجام می‌شود. لذا مقدار ϕ برای آن مساوی ۰/۷۵ اختیاری می‌شود.

$$\text{تنش کششی مجاز جوش شیاری} = 0.75 \times 1440 = 1080 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{عرض ورق فوقانی} = 20\text{cm}$$

$$\text{ضخامت ورق فوقانی} = \frac{66.67 \times 10^3}{1440 \times 20} = 2.3 \text{ cm}$$

$$\text{عرض پیشانی} = \frac{1440}{1080} \times 20 = 26.7 \Rightarrow 30 \text{ cm}$$

بنابراین برای ورق فوقانی از ورق ۲۵ × ۲۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.

$$\text{عرض ورق تحتانی} = 30 \text{ cm}$$

$$\text{ضخامت ورق تحتانی} = \frac{66.67 \times 10^3}{1440 \times 30} = 1.54 \text{ cm}$$

از ورق ۱۵ × ۳۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.

جوش گوشه اتصال‌دهنده ورق فوقانی

$$D = 15\text{mm}$$

$$\text{ارزش جوش} = (0.3 \times 4200) \times 0.75 \times \cos 45 D \approx 650D$$

$$\text{طول جوش لازم} = \frac{66.67 \times 10^3}{650 \times 1.5} \cong 68 \text{ cm}$$

جوش گوشه اتصال‌دهنده ورق تحتانی

$$D = 15\text{mm}$$

$$\text{طول جوش لازم} = 68\text{cm}$$

$$\text{طول جوش لازم در هر طرف} = \frac{68}{2} + 2D = 34 + 2 \times 1.5 = 37\text{cm}$$

طراحی ورق برشگیر جان به‌منظور انتقال برش*

$V = 18.75$ ton

برای اتصال برشی جان از ورق ۱۲×۱۲۰×۵۳۰ میلی‌متر استفاده می‌شود:

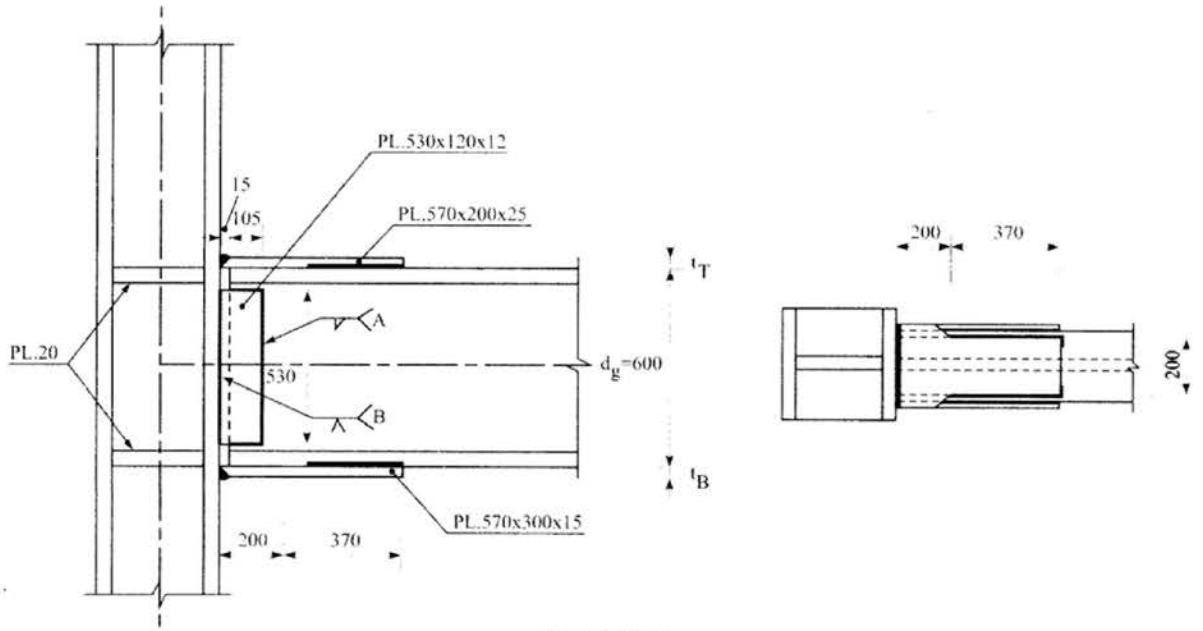
$t_w = 12$mm

D_{max} = حداکثر ضخامت مؤثر جوش A

$650 \times D_{max} = 0.4 \times 2400 \times 1.2$

$D_{max} = 1.77$ cm

$D = 10$mm انتخاب می‌شود.



شکل ۱۱ ـ ۳۱

کنترل جوش A:

$$I_p = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d}$$

$$\bar{X} = \frac{b^2}{2b + d}$$

$b = 10.5$ cm ، $d = 53$ cm

$$I_p = \frac{8 \times 10.5^3 + 6 \times 10.5 \times 53^2 + 53^3}{12} - \frac{10.5^4}{2 \times 10.5 + 53} = 27761 \text{ cm}^3$$

$$\bar{x} = \frac{10.5^2}{2(10.5) + 53} = 1.49 \text{ cm}$$

$e_1 = 12 - 1.49 = 10.51$ cm

* به‌توضیح آخر مسئله رجوع کنید.

برش مستقیم = P

لنگر = $Pe_1 = 10.51\ P$

برش مستقیم $f'_y = \dfrac{P}{(2\times 10.5+53)} = 0.0135P\ kg/cm$

$f''_y = \dfrac{T.X}{I_p} = \dfrac{10.51P(10.5-1.49)}{27761} = 0.0034P\ kg/cm$

$f''_x = \dfrac{T.y}{I_p} = \dfrac{10.51P(26.5)}{27761} = 0.01P\ kg/cm$

$f_r = P\sqrt{(0.0135+0.0034)^2+(0.01)^2} = 0.0196P\ kg/cm$

$650D = 0.0196P \rightarrow 650\times 1 = 0.0196P\ kg/cm$

(ظرفیت جوش A) $P = 33.16 > 18.75\ ton$

کنترل جوش B:

$$f_r = \frac{P}{2L^2}\sqrt{L^2+36e_1^2}$$

$$f_r = \frac{18.75\times 10^3}{53^2}\sqrt{53^2+36\times 10.51^2} = 550\ kg/cm$$

$650D_b = 550$

$D_b = 0.85\ cm$

$D_b = 10\ mm$ انتخاب می‌شود

این جوش بهتر است به‌صورت شیاری انجام شود.

طراحی سخت‌کننده‌های ستون در ناحیهٔ اتصال (ورق‌های پیوستگی)

کنترل ضخامت بال ستون در مقابل نیروی کششی

$P_{bf} = A_f F_y = (25\times 1.6)\times 2.4 = 96\ ton$ (حاکم است)

$\dfrac{\text{عرض بال تیر}}{\text{عرض بال ستون}} = \dfrac{25}{40} = 0.63 > 0.15$

$$t_f = 0.4\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yc}}} = 0.4\sqrt{\frac{96\times 10^3}{2400}} = 2.53\ cm$$

که این مقدار در حدود ضخامت بال ستون یعنی ۲/۸ سانتی‌متر است. از لحاظ نظری احتیاجی به‌تقویت‌کننده در مقابل بال کششی نیست، لیکن قرار دادن آن همواره توصیه می‌شود.

کنترل تسلیم موضعی جان ستون (رابطهٔ ۱۱ ـ ۲۸)

$$\frac{R}{t_w(N+5K)}=\frac{66.67\times10^3}{1.80(2+5\times2.8)}=2314.9\,kg/cm^2>0.66\times2400=1584\ kg/cm^2$$

احتیاج به‌ورق سخت‌کننده می‌باشد.

کنترل لهیدگی در جان ستون

$$R=566t_w^2\left[1+3\left(\frac{N}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{F_{yw}\frac{t_f}{t_w}}$$

$$R=566\times1.8^2\left[1+3\left(\frac{2}{40}\right)\left(\frac{1.8}{2.8}\right)^{1.5}\right]\sqrt{2400\times\frac{2.8}{1.8}}\times10^{-3}$$

$$R=120.71\ ton>66.67\ ton$$

کنترل کمانش فشاری جان (رابطهٔ ۱۱ ـ ۲۹)

$$h_{1\,max}=\frac{34.5\times10^3\,t_{wc}^3\sqrt{F_{yc}}}{P_{bf}}$$

$$h_{1\,max}=\frac{34.5\times10^3\times1.8^3\sqrt{2400}}{96\times10^3}=102.68\ cm>>34.4\ cm$$

سطح مقطع ورق سخت‌کننده در مقابل بال فشاری (رابطهٔ ۱۱ ـ ۳۰)

$$A_{st}=\frac{P_{bf}-F_{yc}t_{wc}(t_b+5K)}{F_{yst}}$$

$$A_{st}=\frac{96\times10^3-2400\times1.8(2+5\times2.8)}{2400}=11.2\ cm^2$$

از دو ورق ۲۰×۱۸۰ میلی‌متر در ارتفاع کامل جان ستون در مقابل بال فشاری (و همچنین بال کششی تیر) استفاده شود.

توضیح در مورد نیروی برشی طرح

در قاب‌ها با شکل‌پذیری زیاد، به‌منظور دستیابی به‌مقاومت خمشی کامل اتصال، آیین‌نامه‌های زلزله توصیه می‌کنند که نیروی نهایی برشی طرح اتصال از رابطهٔ زیر به‌دست آید:

$$V_D = V_{(D+L)} + \frac{2M}{L} \qquad (۴۲ - ۱۱)$$

که در آن:

M = ظرفیت خمشی مجاز تیر مساوی $0.66SF_y$

L = طول دهانه

V_E = برش ناشی از نیروهای زلزله

$V_{(D+L)}$ = برش ناشی از بار مرده و زنده

مقاومت برشی چشمهٔ اتصال

$$V_P = 0.4F_y d_c t\left[1+\frac{3b_c t_{cf}^2}{d_b d_c t}\right]$$

$t = 1.8 \qquad d_b = 60 \qquad d_c = 40 \qquad b_c = 40 \qquad t_{cf} = 2.8$ (برحسب سانتی‌متر)

$$V_p = 0.4\times 2400\times 40\times 1.8\left[1+\frac{3\times 40\times 2.8^2}{60\times 40\times 1.8}\right]\times 10^{-3} = 69.12\times 1.218 = 84.19 \text{ ton}$$

$$\text{نیروی برشی موجود} = 2\times 0.6\times 2400(1.6\times 25)\times 10^{-3} = 115.2 \text{ ton}$$

$$\Delta V = 115.2 - 84.19 = 31 \text{ ton}$$

محاسبات نشان می‌دهد که ضخامت جان ستون در چشمهٔ اتصال کم است و باید افزایش یابد. ضخامت ورق تقویتی مضاعف برابر است با:

$$t(40-2\times 2.8)0.4\times 2400 = 31\times 10^3 \Rightarrow t = 0.94 \text{ cm} \rightarrow t = 10 \text{ mm}$$

۱۱ ـ ۵ ـ ۶ مفاهیم طرح لرزه‌ای اتصالات صلب

قاب‌های خمشی که برای تحمل بار جانبی زلزله به‌کار گرفته می‌شوند باید طوری طراحی شوند که اعضا و اتصالات آنها بتوانند شکل‌پذیری لازم را در سیستم باربر جانبی تأمین نمایند. این قاب‌ها بر حسب شکل‌پذیری مورد انتظار از آنها، ویژه، متوسط و کم، باید الزامات مندرج در آیین‌نامهٔ سازه‌های فولادی (مبحث دهم) را ارضا نمایند.

قاب خمشی فولادی ویژه

قاب خمشی ویژه، به‌قابی اطلاق می‌شود که در برابر نیروی جانبی زلزله بتواند تغییرشکل‌های فراارتجاعی قابل ملاحظه‌ای تحمل کند. در طراحی این قاب‌ها سعی بر آن است که در یک یا دو انتهای تیر، خارج از محدودهٔ اتصال تیر به‌ستون، مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده و ظرفیت دورانی آنها به‌حدی باشد که دوران نظیر تغییرمکان جانبی نسبی طبقه در سازه حداقل به ۰/۰۴ رادیان برسد که حدود ۰/۰۳ رادیان آن در ناحیهٔ فراارتجاعی باشد.

در طراحی اعضا و اتصالات قاب‌های خمشی ویژه باید علاوه بر ضوابط عمومی، الزامات خاص طراحی رعایت شوند. در این بخش خلاصه‌ای از این ضوابط ارایه می‌گردد.

تیرها در قاب‌های خمشی ویژه

تیرها در این قاب‌ها نقش اصلی تأمین شکل‌پذیری لازم را از طریق ایجاد مفصل پلاستیک در نزدیکی دو انتهای خود ایفا می‌نمایند. برای دستیابی به‌این عملکرد، تیرها باید شرایط زیر را برآورده نمایند:

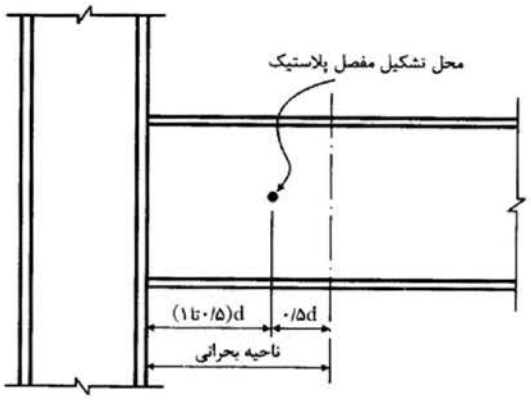
الف ـ مقاطع تیرها باید از نوع فشردهٔ لرزه‌ای در نظر گرفته شوند.

ب ـ محل تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتهای تیرها باید در فاصله‌ای به‌اندازهٔ ۰/۵d تا ۱/۰d از بر ستون در نظر گرفته شود.

پ ـ در دو انتهای تیر، فاصلهٔ بین بر ستون تا ۰/۵d از محل مفصل پلاستیک به‌سمت داخل دهانه، ناحیهٔ بحرانی تلقی می‌شود.

ناحیهٔ بحرانی در یک عضو از سازه، عمدتاً در تیرها، به‌ناحیه‌ای عنوان می‌شود که انتظار می‌رود در آن مفصل پلاستیک تشکیل شود. نظر به‌اهمیت این ناحیه و رفتار حساس آن در حرکات رفت و برگشتی سازه، این محل باید عاری از هرگونه عملیاتی که در رفتار آن اثر ناخواسته ایجاد کند، باشد. در این ناحیه ضوابط ویژهٔ زیر باید رعایت شوند:

- هرگونه ناپیوستگی ناشی از عملیات ساخت و نصب مانند جوش‌های موضعی، وسایل کمکی برای نصب، ناصافی‌های ناشی از برش‌های حرارتی باید به‌طور مناسبی برطرف شده و تعمیر گردد.
- برشگیرها که برای مرکب کردن دال بتن آرمه و تیرها به‌کار گرفته می‌شود، نباید در این ناحیه به‌کار برده شود.
- قطعات الحاقی که برای نگهداری نماها، تیغه‌ها، لوله‌های تأسیساتی و غیره به‌کار گرفته می‌شود، نباید در این ناحیه مورد استفاده قرار گیرد.
- خال جوش کردن ورق‌های ذوزنقه‌ای کف به‌این محل مجاز است.



شکل ۱۱ ـ ۳۲ ناحیهٔ بحرانی در دو انتهای تیر.

در طراحی تیرها برای خمش، ضابطهٔ اضافی خاصی در قاب‌های خمشی ویژه وجود ندارد ولی در طراحی آنها برای برش باید نیروی برشی اضافی ناشی از ایجاد لنگرهای خمشی قابل انتظار در مفصل‌های پلاستیک دو انتهای تیر در نظر گرفته شود. جزییات این روابط در متن آیین‌نامهٔ فولاد ایران (مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان) آمده است.

اتصال تیر به‌ستون در قاب‌های خمشی ویژه

کلیهٔ اتصالات تیر به‌ستون در این قاب‌ها باید شرایط زیر را دارا باشند:

الف ـ اتصالات تیر به‌ستون باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک را در مقطعی به‌فاصلهٔ L_1 از بر ستون در داخل تیر و خارج از اجزای اتصال فراهم نمایند. این امر یا از طریق تقویت تیر در محل اتصال به‌بر ستون انجام می‌شود، و یا با تضعیف مقطع تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک عملی می‌گردد.

ب ـ در اتصالات جوشی تیر به‌ستون، اتصال بال تیر یا ورق پوششی آن، به‌وجه ستون یا به‌ورق پیشانی، (فلنج) که به‌ستون پیچ می‌شود، باید منحصراً از نوع نفوذی کامل باشد. برای اتصال جان تیر یا ورق اتصال جان، به‌وجه ستون یا ورق انتهایی، استفاده از جوش نفوذی نسبی یا جوش گوشه مجاز است.

۱ ـ طراحی برای خمش

اتصال تیر به‌ستون باید برای لنگر خمشی قابل انتظار که در بر ستون ایجاد می‌شود، طراحی گردد. این لنگر مطابق رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد (شکل ۱۱ ـ ۳۳):

$$M_{ES} = 0.6 \times 1.1 M_{exp} + V_0 L_1 + M_W \qquad (۴۳ - ۱۱)$$

که در آن:

M_W = لنگر ناشی از بار قائم بدون ضریب موجود در بازوی L_1

۲ ـ طراحی برای برش

اتصال تیر به‌ستون باید برای برش مورد انتظار که در بر ستون ایجاد می‌شود، طراحی گردد. این برش مطابق روابط ارایه شده در زیر تعیین می‌شود (شکل ۱۱ ـ ۳۳).

نیروی برشی حاصل از تشکیل مفصل پلاستیک در مقطعی به‌فاصلهٔ L_1 از بر ستون مطابق عبارت زیر می‌باشد:

$$V_{ES} = \frac{2\times 0.6\times 1.1\times M_{exp}}{L_h} + V + W = V_o + W \qquad (۴۴ ـ ۱۱)$$

$$M_{exp} = Z_b F_{ye}$$

W= کل بار قائم در بازوی L_1

M_{exp}= لنگر پلاستیک مورد انتظار تیر مساوی Z_bF_{ye}

V= نیروی برشی موجود در محل مفصل پلاستیک به‌علت بار قائم در طول L_h

V_o= نیروی برشی کل موجود در محل مفصل پلاستیک

Z_h= اساس مقطع پلاستیک تیر

F_{ye}= تنش تسلیم مورد انتظار فولاد معادل ۱/۱۵ F_y

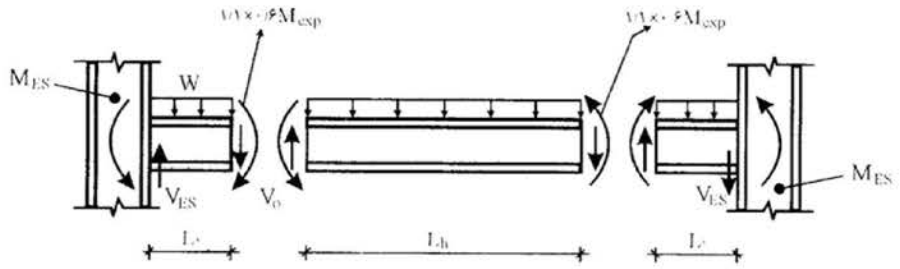
L_1= فاصلهٔ محل نظری تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون

L_h= فاصلهٔ بین مقاطع تشکیل مفصل پلاستیک در تیر

V_{ES}= نیروی برشی مورد انتظار در بر ستون

۳ ـ چشمهٔ اتصال

چشمهٔ اتصال، ناحیه‌ای از جان یا جان‌های ستون است که محصور بین امتداد بال‌های بالایی و پایینی تیرهای دو وجه ستون و بال‌های ستون می‌باشد. ناحیهٔ چشمهٔ اتصال در قاب‌های خمشی ویژه، باید براساس ضوابط زیر طراحی شوند:



شکل ۱۱ ـ ۳۳ برش طراحی تیرها در قاب‌های خمشی ویژه، در طراحی به‌روش تنش مجاز.

الف ـ طراحی برای برش

چشمهٔ اتصال باید برای برش ناشی از نیروهای کششی و فشاری موجود در بال‌های تیرهای سمت چپ و راست ستون، طراحی شود. این برش به‌شرح زیر محاسبه می‌شود:

ـ طراحی به‌روش تنش مجاز

$$V_{pa,s} = \sum \frac{M_{ES}}{d_b} - V_{col} \qquad (۴۵ - ۱۱)$$

در این رابطه V_{col} برش موجود در ستون فوقانی زیر اثر بار جانبی زلزله، در حالت بدون ضریب می‌باشد.

۴ ـ ورق‌های پیوستگی

ورق‌های پیوستگی باید در مقابل بال‌های تیر یا ورق‌های پوششی اتصال بال بالایی و پایینی تیرهای متصل‌شونده به‌ستون و به‌صورت متقارن نسبت به‌محور ستون، قرار داده شوند. این ورق‌ها برای انتقال نیروهای درون صفحه‌ای حاصل از لنگر تیر به‌چشمهٔ اتصال در ستون به‌کار برده می‌شوند و باید شرایط زیر را برآورده نمایند.

الف. طول ورق‌ها باید برابر با فاصلهٔ خالص دو بال ستون باشد.

ب. ضخامت ورق‌ها باید از ضخامت بال یا ورق پوششی اتصال بال تیرهای دو طرف کمتر نباشد.

پ. پهنای ورق‌ها باید در ستون‌های با مقطع قوطی‌شکل، برابر فاصلهٔ خالص دو جان ستون بوده، و در ستون‌های با مقطع H شکل از مجموع پهنای عرض تیر یا عرض ورق پوششی اتصال در دو طرف جان کمتر نباشد.

ت. نسبت عرض به‌ضخامت در ورق‌های با یک لبهٔ متکی، نظیر ورق‌های پیوستگی ستون‌های H شکل، نباید از $0.55\sqrt{\frac{E}{F_{ys}}}$ و در ورق‌های با دو لبهٔ متکی، نظیر ورق‌های پیوستگی ستون‌های با مقطع قوطی‌شکل، نباید از $1.4\sqrt{\frac{E}{F_{ys}}}$ کوچکتر باشد. در این روابط F_{ys} مقاومت تسلیم ورق‌های پیوستگی است.

۵ ـ مهاربندی جانبی اتصال تیر به‌ستون

به‌منظور جلوگیری از کمانش پیچشی ستون، لازم است اتصال در صفحهٔ افقی در مقابل پیچش ستون مهار گردد.

وقتی که جان تیرها و ستون‌ها هم‌صفحه باشد و نسبت به‌دست آمده از رابطهٔ (۱۱ ـ ۴۶) بیش از ۲ باشد، وجود مهار در تراز بال فوقانی تیر کافی است. دال بتن مسلح می‌تواند جایگزین عضو مهاری گردد. در صورت نبود شرایط فوق، وجود مهار در تراز هر دو بال تحتانی و فوقانی لازم است.

نیروی لازم برای مهاری مساوی ۲ درصد ظرفیت مجاز بال تیر می‌باشد.

اساس مقطع خمیری نیمرخ‌ها

نیمرخ INP		نیمرخ IPE		نیمرخ IPB	
نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$	نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$	نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$
100	40	100	39	100	104.2
120	63	120	60	120	165.2
140	95	140	88	140	246
160	136	160	123	160	354
180	186	180	166	180	482
200	250	200	220	200	642
220	324	220	286	220	828
240	412	240	366	240	1054
260	514	270	484	260	1282
280	632	300	628	280	1534
300	762	330	804	300	1868
320	914	360	1020	320	2140
340	1080	400	1308	340	2400
360	1276	450	1702	360	2680
380	1482	500	2200	400	3240
400	1714	550	2780	450	3980
450	2400	600	3520	500	4820
500	3240			550	5600
550	4240			600	6420
600	5460			650	7320

آن طبقه و مجموع مقاومت برشی آنهایی که بر روی یک محور قرار دارند کمتر از ۳۳٪ کل مقاومت برشی ستون‌های آن محور باشد. در این بند محور ستون به‌محور یا محورهای موازی اطلاق می‌شود که در فاصلهٔ کمتر از ۱۰ درصد بعد پلان طبقه، در جهت عمود بر محور، از یکدیگر قرار گرفته باشند.

در عبارت فوق:

P_c = مساوی $0/6\ F_{ye}\ A_g$ در طراحی به‌روش تنش‌های مجاز.

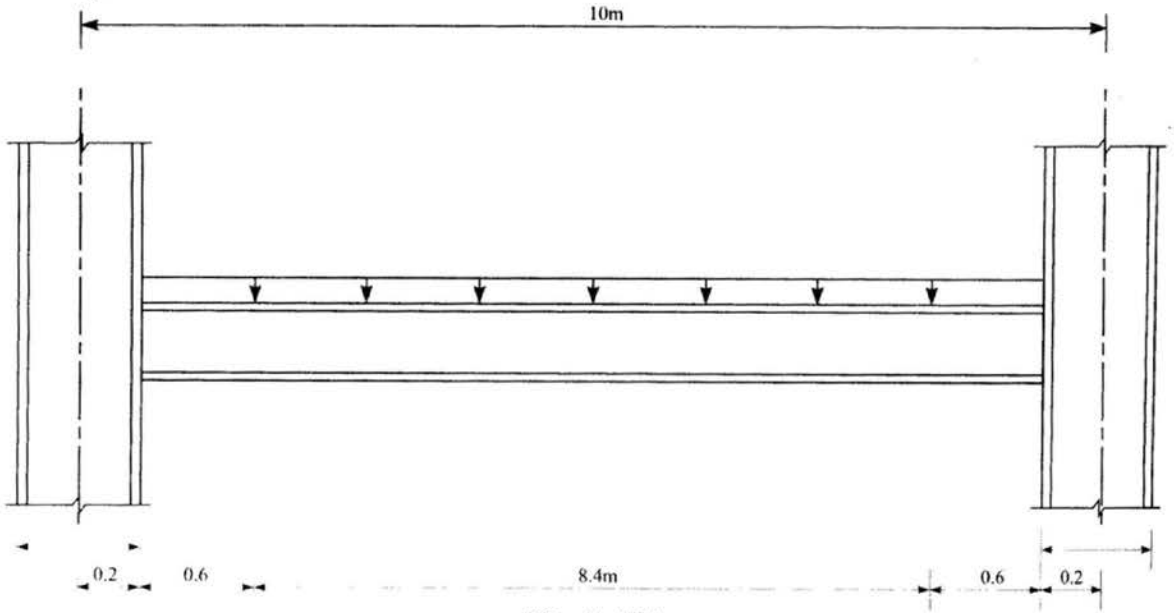
P_{ac} = نیروی محوری فشاری بدون ضریب در طراحی به‌روش تنش‌های مجاز

۲ ـ ستون‌های هر طبقه که در آن نسبت مقاومت برشی ستون‌ها به برش وارده در آن طبقه ۵۰ درصد بیشتر از این نسبت در طبقهٔ فوقانی آن باشد.

مثال ۱۱ ـ ۹

تیر IPE600 را طبق شکل زیر تحت اثر بار گسترده 4ton/m با دهانهٔ ۱۰ متر در نظر بگیرید. با فرض تشکیل مفصل پلاستیک به‌فاصلهٔ d از بر ستون، اتصال تیر به‌ستون را در شرایط شکل‌پذیری ویژه کنترل کنید.

IPE600 $\begin{cases} S = 3070\ cm^3 \\ Z = 3520\ cm^3 \\ I = 92080\ cm^4 \end{cases}$



شکل ۱۱ ـ ۳۴

الف ـ نیروی برشی مورد انتظار (V_{ES}) در بر ستون:

نیروی برشی V_{ES} به‌صورت زیر تعیین می‌شود. طبق اطلاعات صورت مسئله، مفصل پلاستیک به‌فاصلهٔ d= 60 cm از بر ستون تشکیل می‌شود.

$$V_{ES} = V_0 + W$$

$$V_0 = \frac{2\times0.6\times1.1\times M_{exp}}{L_h} + V$$

$$M_{exp} = Z_b\ F_{ye} = 3520\times(1.15\times2400)\times10^{-5} = 97.2\ (\text{ton.m})$$

$$V = 4\times8.4/2 = 16.8(\text{ton})$$

$$V_0 = (2\times0.6\times1.1\times97.2)/8.4 + 16.8 = 15.3 + 16.8 = 32.1$$

$$W = w\times L_l = 4\times0.6 = 2.4\ (\text{ton})$$

$$V_{ES} = V_0 + W = 32.1 + 2.4 = 34.5\ \text{ton}$$

ب ـ طراحی برای خمش

اتصال تیر به‌ستون باید برای لنگر قابل انتظار در بر ستون طراحی شود؛

$$M_{ES} = 0.6\times1.1M_{exp} + V_oL_l + M_w$$

$$M_{exp} = 97.2\ (\text{ton.m})$$

$$M_w = w\times L_l^2/2 = 4\times0.6^{\,2}/2 = 0.72\ (\text{ton.m})$$

$$V_0 = 32.1$$

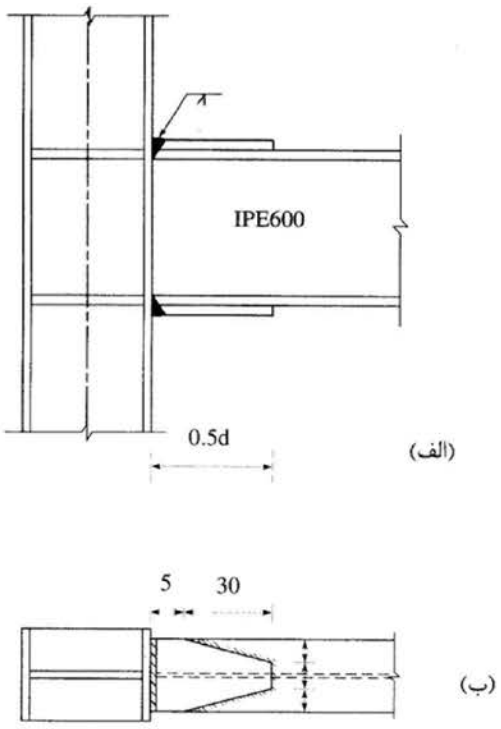
$$M_{ES} = 0.6\times1.1\times97.2 + 32.1\times0.6 + 0.72 = 84.1\ (\text{ton.m})$$

این لنگر در حدود ۱/۶۷ برابر ظرفیت خمشی مجاز مقطع تیر است.

پ ـ طراحی ورق تقویت در اتصال مستقیم تیر به‌ستون (توصیهٔ بلاجت)*

در قاب خمشی ویژه، اتصال تیر به‌ستون باید به‌گونه‌ای باشد که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک را در مقطعی به‌فاصلهٔ L_l از بر ستون در داخل تیر و خارج از اجزای اتصال را فراهم نماید. این امر یا از طریق تقویت تیر در محل اتصال به‌بر ستون و یا با تضعیف تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک عملی می‌گردد. بلاجت توصیه می‌نماید تیر در محل اتصال به‌ستون تقویت شود.

* O.Blodgett (از کارشناسان برجسته که در خصوص اتصالات حادثه دیده در زلزله نورتریج اظهارنظر نمود)



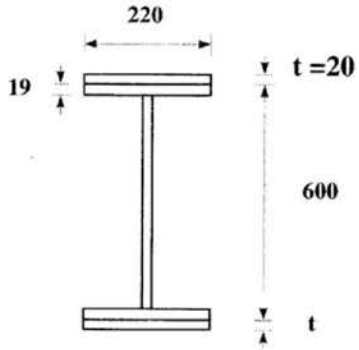
شکل ۱۱ ـ ۳۵ مربوط به مثال ۱۱ ـ ۹.

اساس مقطع لازم در محل اتصال تیر به‌ستون (با ورق تقویت):

$$S_x \text{ لازم} = \frac{M_{ES}}{0.66F_y} = \frac{84.1\times10^5}{0.66\times2400} = 5309.3(cm^3)$$

$$t = 2(cm) \rightarrow I_x = 92080 + 2\times(22\times2\times31^2) = 176648\ (cm^4)$$

$$S_x = \frac{I_x}{C} = \frac{176648}{32} = 5520.3(cm^3) > 5309.3 \text{ o.k.}$$



شکل ۱۱ ـ ۳۵ ـ پ مربوط به مثال ۱۱ ـ ۹.

طول جوش لازم برای ورق‌های تقویتی:

جوش در کارخانه با شرایط بازرسی چشمی می‌باشد:

$\phi = 0.85$, E60 الکترود

$$R_w = t_e\phi(0.3F_u) = 0.707a \times 0.85 \times 0.3 \times 4200 = 757a$$
$$R_w \times l = 0.6F_y \times b_f \times t$$
$$757a \times 75 = 0.6 \times 2400 \times 22 \times 2 \qquad a = 1.1cm \rightarrow a = 12\ mm$$

کنترل برشی اتصال تیر به‌ستون:

با در نظر گرفتن اتصال مستقیم جان تیر به‌ستون داریم:

$$h_w = 51.4\ (cm)$$
$$R_w \times 2h_w = V_{ES}$$
$$757a_{min} \times 2 \times 51.4 = 34.5 \times 10^3$$
$$a_{min} = \frac{34.5 \times 10^3}{757 \times 2 \times 51.4} = 0.44\ (cm)$$

$a = 6mm > 4.4mm$ انتخاب

ت ـ طراحی اتصال در صورتی‌که در نظر باشد از ورق‌های زیرسری و روسری استفاده نماییم:

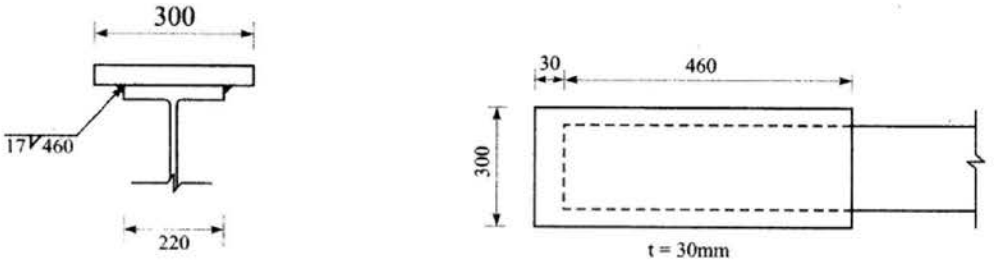
$$F = \frac{84.1}{0.6} = 140\ ton$$ نیروی طراحی

$$A = \frac{140 \times 10^3}{0.66 \times 2400} = 88.38\ cm^2$$
$$t = 30\ mm \rightarrow b = \frac{88.38}{3} = 29.46 \Rightarrow b = 30\ cm$$

طول جوش برای اتصال ورق روسری به‌تیر:

$$D = 17\ mm \Rightarrow L_w = \frac{140 \times 10^3}{0.3F_u(\cos 45)D} = \frac{140 \times 10^3}{0.3 \times 4200 \times 0.707 \times 1.7} = 93\ cm$$

از طول ۴۶ سانتی‌متر در دوران استفاده می‌شود. شکل ورق فوقانی به‌صورت زیر در می‌آید. توجه شود که جوش بال تیر به‌ورق روسری باید در حالت سقفی انجام شود.



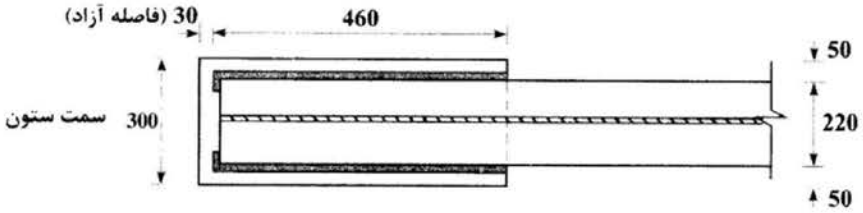
شکل ۱۱ ـ ۳۵ ـ ت مربوط به مثال ۱۱ ـ ۹.

ضخامت ورق تحتانی : $t = 30\ mm \Rightarrow b = \frac{88.38}{3} = 29.46 \Rightarrow b = 30\ cm$

طول جوش برای اتصال ورق تحتانی

$$D = 17mm \Rightarrow L_w = \frac{140\times10^3}{890\times1.7} = 93\ cm$$

از دو خط ۴۶ سانتی‌متر در دو طرف استفاده می‌شود.



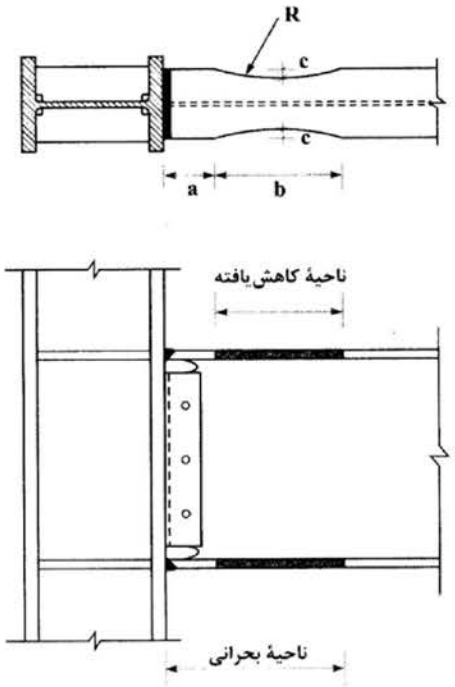
شکل ۱۱ ـ ۳۵ ـ ث مربوط به مثال ۱۱ ـ ۹.

باید سعی شود که ورق‌های زیرسری و روسری وارد ناحیهٔ تسلیم نشوند. برای اتصال جان از ورق برش‌گیر استفاده می‌شود. محاسبات در قبل ارائه شده است.

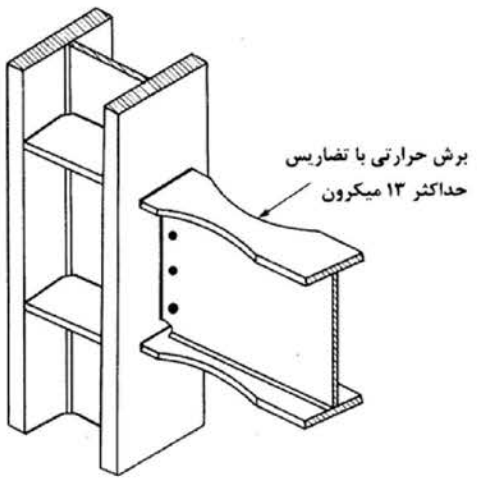
۱۱ ـ ۵ ـ ۷ اتصال صلب تیر به‌ستون با استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)[6]

از بحث قبل متوجه شدیم که فلسفهٔ اصلی در طراحی اتصالات صلب تیر به‌ستون به‌گونه‌ای است که مفصل خمیری در محدوده‌ای در فاصلهٔ ۰/۵d تا ۱/۰d از بر ستون تشکیل گردد و ملاحظه نمودیم که با این فلسفه نیروی برشی و لنگر خمشی برای طراحی اتصال به‌مقدار قابل توجهی نسبت به‌مقادیر نظیر در تیر افزایش می‌یابد. برای عینیت بخشیدن به‌این فلسفه طراحی و همچنین اجتناب از طراحی اتصال برای نیروهای بزرگ، ایدهٔ اتصالات با مقطع کاهش یافته نیز مطرح گردید. در این روش مطابق شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ الف در مقطعی از تیر در محدودهٔ مورد نظر عرض بال‌ها به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که تشکیل مفصل پلاستیک در آن قطعی گردد.

6. *Reduced Beam Section (RBS) Moment Connection*



شعاع برش $R = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$



شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ الف اتصال صلب با تیر با مقطع کاهش‌یافته.

روش گام به‌گام برای طراحی اتصالات با مقطع کاهش‌یافته

گام ۱ ـ انتخاب مقطع اولیه برای تیر و ستون و مقادیر a ، b و c مطابق شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ الف.

$$0.5b_{bf} \le a \le 0.75b_{bf}$$
$$0.65d \le b \le 0.85d \qquad (۴۹ ـ ۱۱)$$
$$0.1b_{bf} \le c \le 0.25b_{bf}$$

b_{bf} = عرض بال تیر

d = ارتفاع کل مقطع تیر

c ، b، a= مطابق شکل ۱ ـ ۳۶ ـ الف

گام ۲ ـ محاسبهٔ اساس مقطع خمیری در مرکز ناحیهٔ کاهش‌یافته

$$Z_e = Z_b - 2ct_{bf}(d - t_{bf}) \qquad (۵۰ ـ ۱۱)$$

Z_e = اساس مقطع خمیری کاهش‌یافته

Z_b = اساس مقطع خمیری مقطع کل

t_{bf} = ضخامت بال تیر

گام ۳ ـ محاسبهٔ لنگر خمشی حداکثر مورد انتظار در مرکز مقطع کاهش‌یافته:

$$M_{Pr} = 0.6 \times 1.1 R_y F_y Z_e \qquad (۵۱ - ۱۱)$$
$$R_y = 1.15$$

گام ۴ ـ محاسبهٔ نیروی برشی در مرکز مقطع کاهش یافته (V_{RBS})

این کار مطابق نمودار آزاد شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ب انجام می‌شود.

گام ۵ ـ محاسبهٔ لنگر حداکثر محتمل در بر ستون

بر پایهٔ نمودار آزاد شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ پ داریم:

$$M_f = M_{pr} + V_{RBS}(a + \frac{b}{2}) \qquad (۵۲ - ۱۱)$$

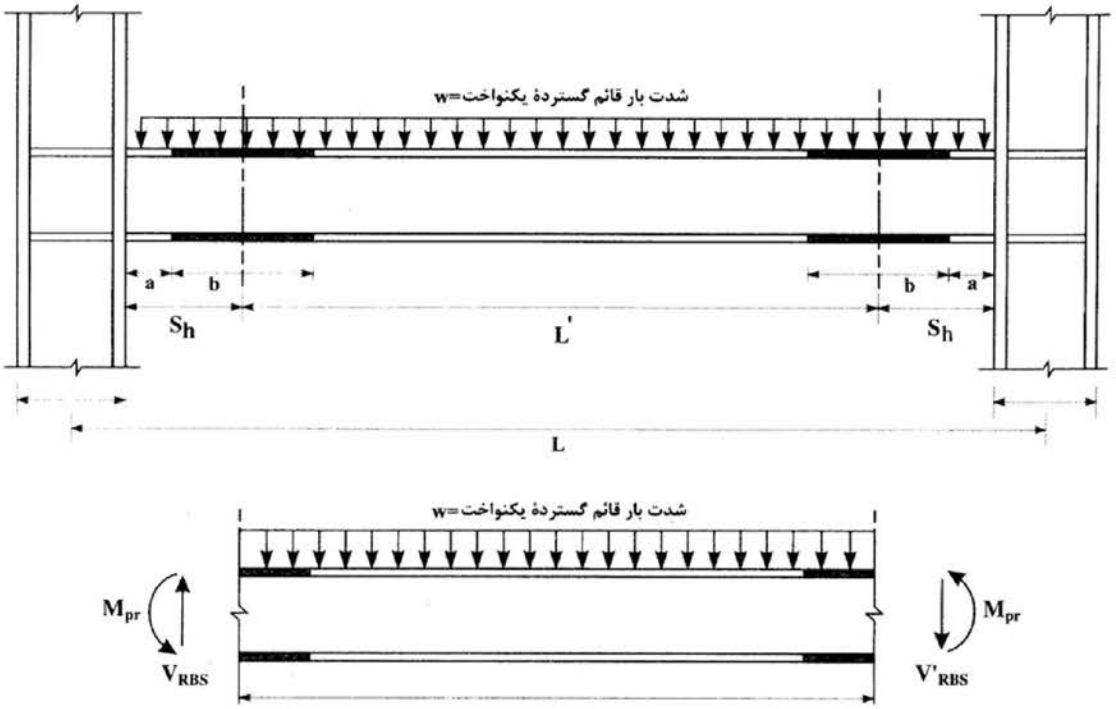
M_f = لنگر حداکثر محتمل تیر در بر ستون

V_{RBS} = نیروی برشی حداکثر در مرکز ناحیهٔ کاهش یافته

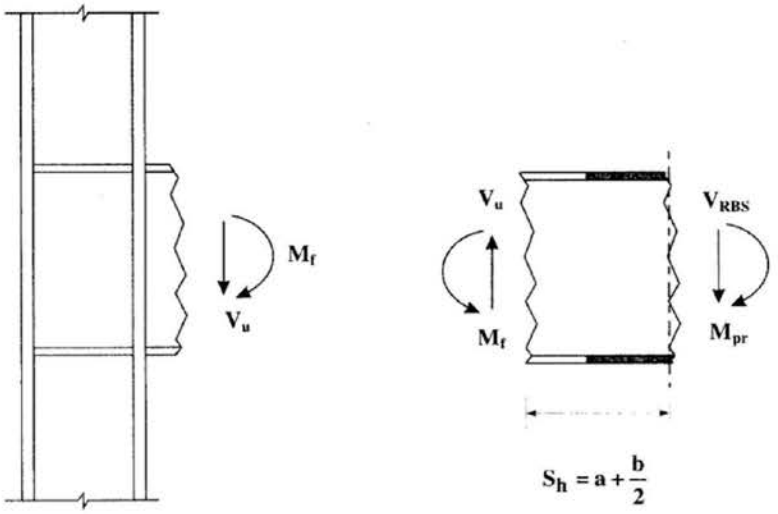
(با ساده‌سازی از بار قائم موجود در فاصلهٔ مفصل پلاستیک و بر ستون صرف‌نظر شده است)

گام ۶ ـ محاسبهٔ لنگر حداکثر مورد انتظار تیر

$$M_{pe} = 0.6 Z_b R_y F_y \qquad (۵۳ - ۱۱)$$
$$R_y = 1.15$$



شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ب نمودار آزاد تیر با مقطع کاهش یافته.



شکل ۱۱ ـ ۳۶ـ پ نمودار آزاد دستک خمیری.

در رابطهٔ فوق:

M_{pc} = لنگر خمیری مورد انتظار تیر

گام ۷ ـ کنترل رابطهٔ شرطی زیر:

$$M_f \leq \phi_d \, M_{pc} \qquad (۵۴ - ۱۱)$$

ϕ_d = عددی بین ۰/۸۵ تا ۱

در صورت عدم اقناع رابطهٔ فوق با افزایش مقدار c و یا کاهش مقادیر a و b باید محاسبات گام‌های ۲ تا ۷ را تکرار نمود.

گام ۸ ـ تعیین نیروی برشی داخلی در محل اتصال تیر به‌ستون

$$V = \frac{2M_{pr}}{L'} + V_{\text{ثقلی}} \qquad (۵۵ - ۱۱)$$

L' = فاصلهٔ بین دو مفصل پلاستیک (شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ب)

$V_{\text{ثقلی}}$ = نیروی برشی تیر فقط به‌علت بار قائم

گام ۹ ـ طراحی اتصال برشی جان تیر به‌ستون

گام ۱۰ ـ کنترل مقررات ورق پیوستگی

گام ۱۱ ـ کنترل چشمهٔ اتصال

گام ۱۲ ـ کنترل رابطهٔ ستون قوی ـ تیر ضعیف

مثال ۱۱ ـ ۱۰

مطلوب است طراحی اتصال با مقطع کاهش‌یافتهٔ تیر از نیمرخ IPB600 با مشخصات زیر.

$d_b = 60\text{cm} \quad b_f = 30\text{ cm} \quad t_f = 3\text{cm} \quad t_w = 1.55\text{ cm} \quad S_b = 5700\text{ cm}^3 \quad Z_b = 6420\text{cm}^3$

دهانهٔ آزاد تیر (L_n) ۶/۵ متر و بار ثقلی وارد بر آن ۳ تن بر متر می‌باشد.

گام ۱:

انتخاب مقادیر کاهش یافته:

$$a = (0.5 \text{ تا } 0.75)b_f \Rightarrow a = 17.5\text{ cm}$$
$$b = (0.65 \text{ تا } 0.85)d_b \Rightarrow b = 47.5\text{ cm}$$
$$c \cong 0.2\, b_f \Rightarrow c = 6.85\text{ cm}$$

گام ۲ ـ محاسبهٔ اساس مقطع کاهش یافته

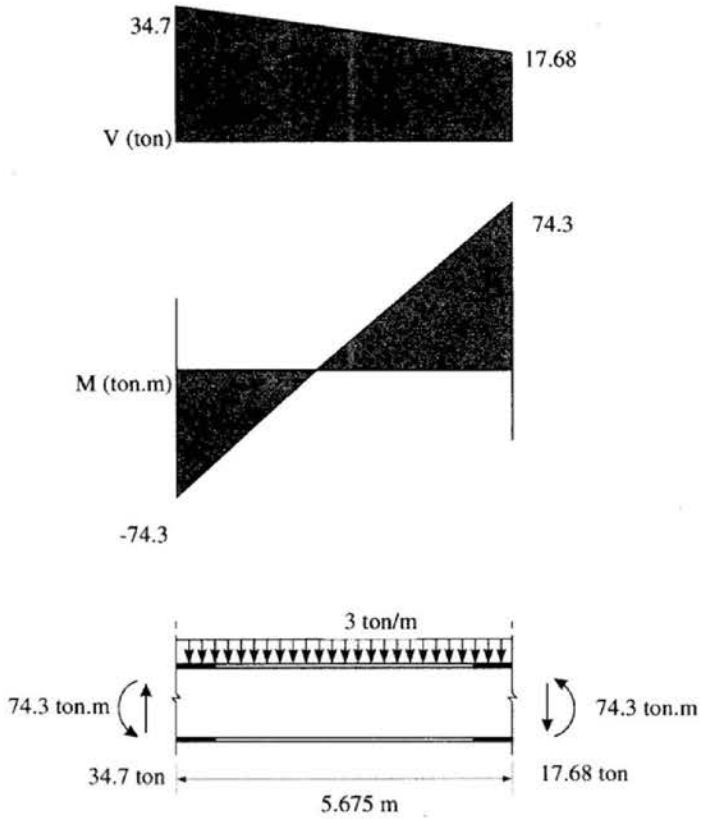
$$Z_e = Z_b - 2ct_{bf}\,(d - t_{bf})$$
$$= 6420 - 2\times 6.85\times 3(60-3)$$
$$= 6420 - 2343 = 4077\text{ cm}^3$$

گام ۳ ـ محاسبهٔ لنگر خمشی حداکثر مورد انتظار در مرکز ناحیهٔ کاهش یافته

$$M_{pr} = 0.6\times 1.1\times 1.15\times 2400\times 4077\times 10^{-5} = 74.3\text{ton.m}$$

گام ۴ ـ محاسبهٔ نیروی برشی در مرکز مقطع کاهش‌یافته

$$L' = L_n - 2(a + \frac{b}{2})$$
$$= 6.5 - 2(0.175 + \frac{0.475}{2}) = 6.5 - 0.825 = 5.675\text{ m}$$
$$V_{RBS} = \frac{2M_{pr}}{L'} + \frac{WL'}{2} = \frac{2\times 74.3}{5.675} + \frac{3\times 5.675}{2}$$
$$= 26.19 + 8.51 = 34.7\text{ ton}$$
$$V'_{RBS} = 26.19 - 8.51 = 17.68\text{ ton}$$



شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ت.

گام ۵ ـ محاسبهٔ لنگر حداکثر محتمل در بر ستون

$$M_f = M_{pr} + V_{RBS}(a + \frac{b}{2})$$
$$= 74.3 + 34.7(0.175 + 0.475 \times 0.5)$$
$$= 88.62 \text{ ton}$$

گام ۶ ـ محاسبهٔ لنگر حداکثر مورد انتظار تیر

$$M_{pe} = 0.6 Z_b R_y F_y = 0.6 \times 6420 \times 1.15 \times 2400 \times 10^{-5} = 106.32 \text{ ton.m}$$

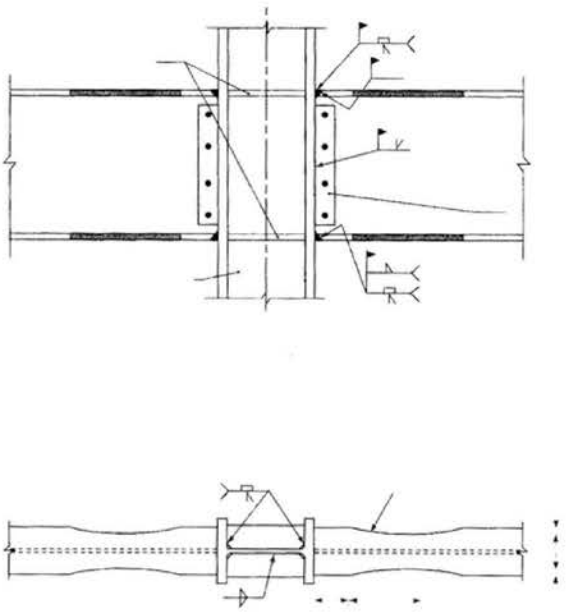
گام ۷ ـ کنترل رابطهٔ شرطی

$$\frac{M_f}{M_{pe}} = \frac{88.62}{106.32} = 0.83$$ قابل قبول است

گام ۸ ـ تعیین نیروی برشی در محل اتصال تیر به‌ستون

$$V = \frac{2M_{pr}}{L'} + V_{\text{ثقلی}}$$
$$= \frac{2\times 74.3}{5.675} + \frac{3\times 6.5}{2} = 26.19 + 9.75 \cong 36 \text{ ton}$$

انجام گام‌های ۹ تا ۱۲ با توجه به‌مثال‌های قبلی برعهدهٔ دانشجو می‌باشد. در شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ث جزییات نهایی اتصال نشان داده شده است.



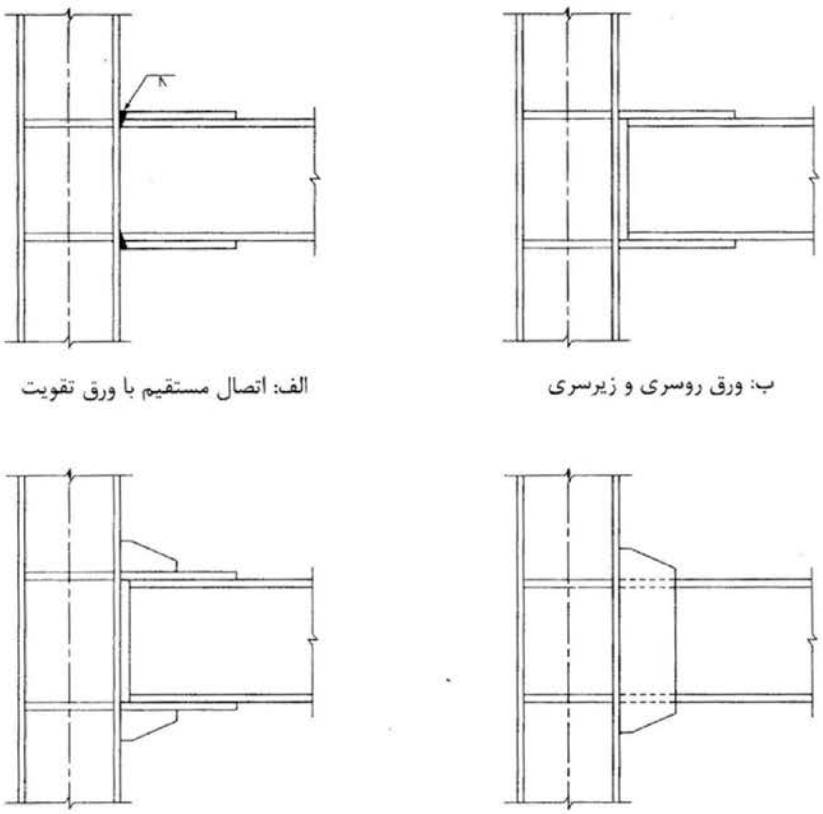
شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ ث

۱۱ ـ ۵ ـ ۸ نتیجه‌گیری

همان‌طور که ملاحظه گردید ضوابط جدید طرح لرزه‌ای اتصالات صلب تیر به‌ستون، تشکیل مفصل خمیری را به‌فاصلهٔ d از بر ستون ایجاب می‌نماید. حال برای رسیدن به‌این مقصود دو راه حل در مقابل طراح وجود دارد.

۱ ـ ضعیف کردن تیر در محل تشکیل مفصل خمیری (اتصال RBS شکل ۱۱ ـ ۳۶ ـ الف)

۲ ـ قوی کردن محل اتصال با استفاده از یکی از روش‌های ورق تقویت، ورق لچکی، ورق کناری، ورق زیرسری و روسری قوی.



الف: اتصال مستقیم با ورق تقویت

ب: ورق روسری و زیرسری

پ: تقویت با ورق لچکی

ت: تقویت با ورق کناری

شکل ۱۱ ـ ۳۷.

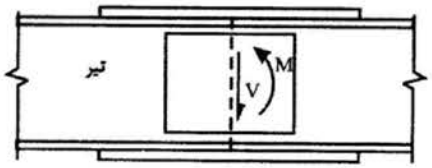
۱۱ ـ ۶ وصلهٔ تیرها

به‌دلایل متعددی مجبور هستیم که نیمرخ‌های نورد شده و یا تیر ورق‌ها را وصله نماییم. بعضی از این دلایل به‌قرار زیر می‌باشد:

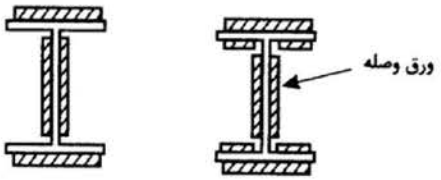
- طول استاندارد نیمرخ‌های نورد شده که در کارخانه تولید می‌شود، ممکن است کافی نباشد.
- گاهی مواقع از لحاظ اجرا اقتصادی‌تر است که تیرها در طول‌های کوتاه به‌محل کار حمل شوند و در محل کار به‌یکدیگر وصله شوند.
- به‌علت کاهش ضایعات تیرآهن ممکن است که مجبور به‌وصلهٔ کارگاهی باشیم.

شکل ۱۱ ـ ۳۸ ـ الف وصلهٔ استاندارد را نشان می‌دهد که از چهار ورق تشکیل یافته است، به‌همین مناسبت به‌چنین وصله‌ای، وصلهٔ چهار ورقی می‌گوییم. در مواقعی که بال تیر ضخیم باشد، ممکن است که مجبور شویم همانند شکل ۱۱ ـ ۳۸ ـ ب از هشت ورق استفاده نماییم.

به‌عنوان قانون طراحی، هر قطعه از وصله باید برای نیروی قسمتی که جایگزین آن می‌شود، محاسبه گردد. از آنجایی که سهم بیشتر نیروی برشی توسط جان و سهم بیشتر لنگر خمشی توسط بال نیمرخ حمل می‌شود، بنابراین وصله‌های جان عهده‌دار تحمل نیروی برشی و وصله‌های بال عهده‌دار تحمل لنگر خمشی می‌باشند.



(الف)

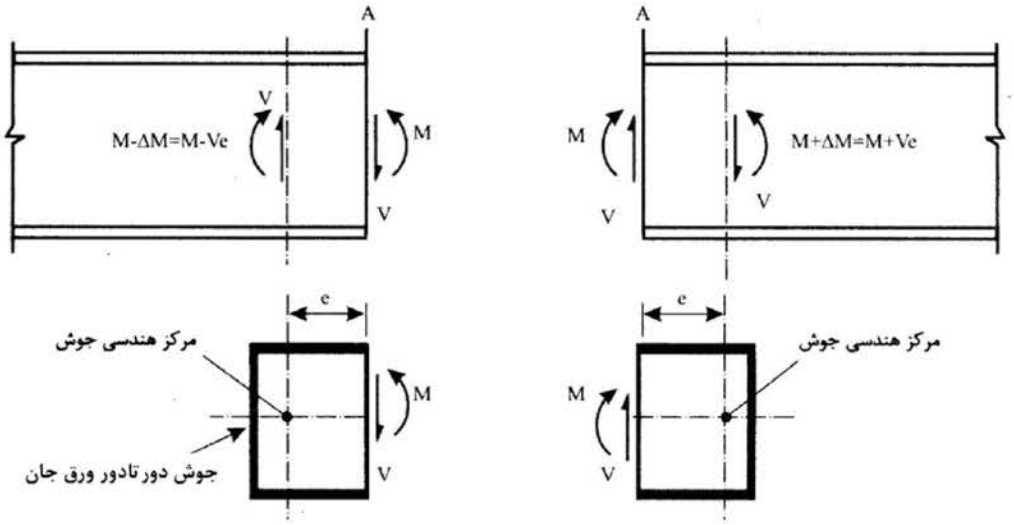


(ب)

شکل ۱۱ ـ ۳۸

وصله‌ها را معمولاً برای نیروهای داخلی موجود در نقطهٔ قطع که از روی نمودار تغییرات نیروی برشی و لنگر خمشی به‌دست می‌آید، طراحی می‌نمایند. لیکن آیین‌نامه‌ها مقدار این نیروها را به‌حداقلی محدود می‌کنند. مثلاً مبحث دهم مقرر می‌دارد که نیروهای طراحی یک وصله نباید از ۵۰ درصد ظرفیت نیمرخ کامل کمتر باشند. آیین‌نامهٔ پل‌سازی آشتو این مقدار را به ۷۵ درصد ظرفیت نیمرخ محدود می‌کند. البته اگر برای وصلهٔ تیرها بخواهیم از اتصال لب به‌لب با جوش شیاری استفاده نماییم، طبق مفاد آیین‌نامه جوش شیاری را باید برای تمام ظرفیت تیر طراحی نماییم.

در هنگام تعیین نیروهای طراحی وصله، به‌این نکته باید توجه داشته باشیم که وصله دارای طول مشخصی می‌باشد (بین ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر). در این طول، مقدار لنگر خمشی و نیروی برشی تغییر می‌نماید. طبق اصل مورد استفاده در طراحی اتصالات جوشی، گروه جوش باید برای نیروهایی طراحی شوند که در مرکز هندسی آنها وجود دارد. از شکل ۱۱ ـ ۳۳ پیداست که از لحاظ تئوری، لنگر موجود در مرکز هندسی جوش‌ها در یک طرف وصله با لنگر موجود در طرف دیگر متفاوت می‌باشد. بنابراین بعضی از طراحان، اتصال هر دو طرف وصله را برای لنگر $M_1 = M + Ve$ طراحی می‌نمایند. در وضعیت‌های نادری که وصله در محلی که نیروی برشی و لنگر خمشی هر دو بزرگ هستند، قرار دارد، چنین طرز عملی به‌جا به‌نظر می‌رسد. اما از آنجایی که در اغلب موارد وصله در محلی قرار دارد که یکی از مقادیر نیروی برشی و یا لنگر خمشی کوچک می‌باشد و نیروهای حداقل آیین‌نامه‌ای کنترل‌کنندهٔ طرح هستند، استفاده از $M_1 = M + Ve$ منطقی به‌نظر نمی‌رسد.



شکل ۱۱ ـ ۳۹

بنابراین در اکثر مواقع توصیه می‌شود که اتصال برای نیروهای واقعی در محل قطع و یا حداقل آیین‌نامه‌ای طراحی گردد و هیچ گونه خروج از مرکزیتی در نظر گرفته نشود. اگر نیروهای برشی و لنگرهای خمشی سازه با استفاده از تئوری سازه‌های نامعین بدون هیچ گونه مفصل داخلی، به‌دست آمده باشند، طراح نباید وصله‌ای طرح کند که به‌علت نرمی زیاد همانند یک مفصل عمل نماید.

مثال ۱۱ ـ ۱۱

مطلوب است طراحی وصلهٔ چهار ورقی تیر IPE600 از فولاد نرمه با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع. در محل وصله مقدار لنگر خمشی ۳۷ تن متر و نیروی برشی ۳۲ تن می‌باشد. ورق‌های وصله از فولاد نرمه و الکترود مصرفی از نوع E60 می‌باشد. ظرفیت وصله نباید از ۵۰ درصد ظرفیت نیمرخ کمتر در نظر گرفته شود.

حل: مشخصات IPE600

$$h = 60 \quad , \quad b = 22 \quad , \quad t_w = 1/2 \quad , \quad t_f = 1/9 \text{ cm} \quad , \quad h - 2c = 51.4 \text{ cm}$$

$$A = 156 \text{cm}^2 \quad , \quad I_x = 92080 \text{ cm}^4 \quad , \quad S_x = 3070 \text{ cm}^3$$

الف) ظرفیت IPE600 (با فرض مقطع فشرده)

$$M = F_b S_x = 0.66 \, F_y S_x = 0.66(2400)(3070)\times 10^{-5} = 48.63 \text{ ton.m}$$

$$V = F_v dt_w = 0.4 F_y dt_w = 0.40(2400)(60)(1.2)10^{-3} = 69.12 \text{ ton}$$

ب) شرایط طراحی

واقعی $M = 37 \text{ ton.m} > 0.50 \times 48.63 = 24.32 \text{ ton.m}$

پس:

طراحی $M = 37 \text{ ton.m}$

واقعی $V = 32 \text{ ton} < 0.50 \times 69.12 = 34.56 \text{ ton}$

پس:

طراحی $V = 34.56 \text{ ton}$

پ) طراحی ورق‌های وصلهٔ جان

ورق‌های وصلهٔ جان باید قادر باشند که کل نیروی برشی را تحمل نمایند.

لازم $A_g = \dfrac{V}{0.4F_y} = \dfrac{34.56 \times 10^3}{0.4(2400)} = 36 \text{cm}^2$

حداکثر ارتفاع ممکن $= h - 2c = 51.4 \text{ cm}$

لازم $t = \dfrac{A_g}{2 \text{ (ارتفاع)}} = \dfrac{36}{2(51.4)} = 0.35 \text{ cm}$

از ورق ۶ میلی‌متری به‌عنوان حداقل عملی استفاده می‌شود. پس از دو ورق ۶×۵۳۰ میلی‌متر استفاده شود.

ت) طراحی ورق‌های وصلهٔ بال

برای طراحی ورق‌های وصلهٔ بال از این فلسفه استفاده می‌کنیم که چون این ورق‌ها باید نقش بال را در محل وصله انجام دهند، سطح مقطع آنها باید مساوی سطح مقطع بال (به‌نسبت لنگر طراحی به‌ظرفیت خمشی تیر) باشد.

سطح مقطع بال IPB600 = $(22)(1.9) = 41.8 \text{ cm}^2$

درصد لنگر طراحی به‌ظرفیت کامل = $\dfrac{37}{48.63}(100) = \%76$

سطح مقطع لازم برای وصلهٔ بال $> 0.76 \times (41.8) = 31.77 \text{ cm}^2$

لازم $t = \dfrac{31.77}{(22-2)} = 1.59 \text{ cm}$

برای وصلهٔ بار از ورق ۱۶×۲۰۰ میلی‌متر با سطح مقطع ۳۲ سانتی‌متر مربع استفاده می‌شود.

البته سطح مقطع ورق وصلهٔ بال را می‌توان به‌نسبت فاصلهٔ مرکز به‌مرکز ورق‌های بال به‌فاصلهٔ مرکز به مرکز ورق‌های وصله کاهش داد.

درصد کاهش $= \left[1 - \dfrac{(60-1.9)}{(60+1.6)}\right] \times 100 = \%5.681$

در طراحی از این کاهش صرف‌نظر می‌شود.

ث) کنترل ورق وصلهٔ بال با استفاده از رابطهٔ $f = \frac{MC}{I}$

$$I = I_w + I_f = \left[2 \times \frac{1}{12}(0.6)(53)^3\right] + \left[2(1.6 \times 20)\left(30 + \frac{1.6}{2}\right)^2\right]$$

$$I = 14887.7 + 60712.96 = 75601\ cm^4$$

$$f = \frac{37(10^5)(31.8)}{75601} = 1556\ kg/cm^2 < 0.66F_y = 1584 kg/cm^2$$ (با فرض مقطع فشرده)

ج) طراحی طول ورق‌های وصلهٔ بال و جوش‌های آن

ابتدا نیروی موجود در ورق‌های وصلهٔ بال را به‌دست می‌آوریم. لازم به‌توضیح است که لنگر به‌نسبت ممان اینرسی بین بال و جان تقسیم می‌شود.

سهم ورق‌های وصلهٔ بال $M = \frac{I_f}{I}(M) = \frac{60713}{75601}(37) = 0.80(37) = 29.71\ ton.m$

نیرو در وصلهٔ بال $F = \frac{M}{d} = \frac{(29.71)10^2}{(60+1.6)} = 48.23 ton$

نیرو در وصلهٔ بال را به‌طریق زیر نیز می‌توان به‌دست آورد:

$$F = \sigma_f . A_f = \frac{37\left(10^5\right)\left(30 + \frac{1.6}{2}\right)}{75601} \times (1.6 \times 20)10^{-3} = 48.23 ton$$

A_f ,σ_f به‌ترتیب تنش ناشی از خمش در مرکز سطح و مساحت ورق وصلهٔ بال می‌باشند.

طول لازم جوش وصلهٔ بال $L_{wf} = \frac{F}{650D}$

اگر از جوش به‌اندازهٔ D= ۸ mm استفاده کنیم:

$$L_{wf} = \frac{48.23 \times 10^3}{650(0.8)} = 92.8\ cm$$

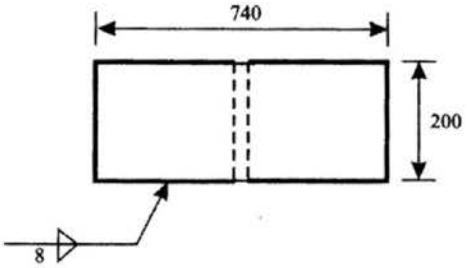
طول لازم ورق وصلهٔ بال در یک طرف درز:

$$L_1 = \frac{1}{2}(92.8 - 20) = 36.4 cm$$

طول کل لازم ورق وصلهٔ بال:

$$2 \times (36.4) = 72.8\ cm$$

بنابراین از ورق‌های ۷۴۰ × ۲۰۰ × ۱۶ میلی‌متر در بالا و پایین تیر و جوش ۸ میلی‌متر استفاده می‌کنیم.



شکل ۱۱ ـ ۴۰ پلان جوش‌های وصلهٔ بال.

چ) طراحی طول ورق‌های وصلهٔ جان و جوش‌های آن

لنگر پیچشی وارد بر مجموعهٔ جوش جان عبارت است از سهم جان از لنگر خمشی طرح به‌علاوه لنگر پیچشی ناشی از انتقال نیروی برشی به‌مرکز هندسی مجموعهٔ جوش.

برای جان از دو ورق وصلهٔ ۶×۵۳۰×۶۰۰ میلی‌متر استفاده می‌نماییم.

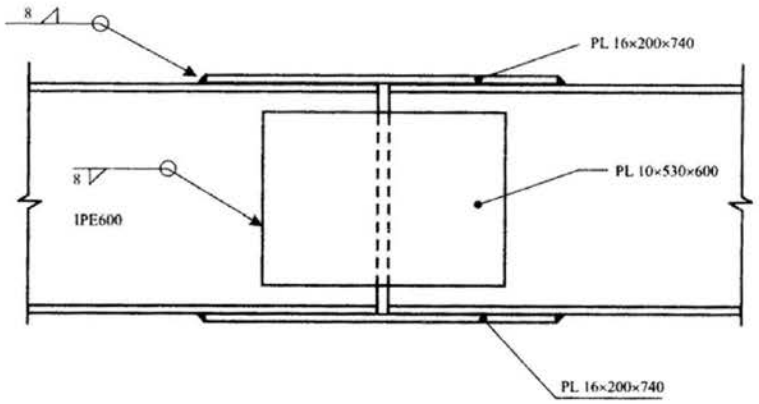
$$b = \frac{60}{2} = 30 \quad , \quad d = 53 \text{ cm}$$

$$\bar{X} = \frac{30^2}{2(30)+53} = 7.96 \text{ cm}$$

$$I_p = 2\left[\frac{8(30)^3 + 6(30)(53)^2 + (53)^3}{12} - \frac{(30)^4}{2(30)+53}\right] = 130746.6 \text{ cm}^3$$

$$M_T = \frac{I_w}{I} M + Ve = \frac{14887.7}{75601}(37) + (34.56)(30 - 7.96)\times 10^{-2}$$

$$M_T = 7.29 + 7.62 = 14.91 \text{ ton.m}$$



شکل ۱۱ ـ ۴۱

$$f'_x = \frac{V}{A} = \frac{34.56\times10^3}{2(2\times30+53)} = 152.92\ kg/cm$$

$$f''_x = \frac{M_T.Y}{I_P} = \frac{(14.91\times10^5)}{130746.6}\times\frac{53}{2} = 302.20\ kg/cm$$

$$f''_y = \frac{M_T.X}{I_p} = \frac{(14.91\times10^5)\times(30-7.96)}{130746.6} = 251.34\ kg/cm$$

$$f_r = \sqrt{(302.20)^2 + (152.92+251.34)^2} = 504.73\ kg/cm$$

$$f_r = 650\ D \quad \rightarrow \quad D = \frac{504.73}{650} = 0.78\ cm$$

از جوش D= ۸ mm استفاده می‌کنیم. چون اندازهٔ جوش از ضخامت ورق جان بیشتر است، بنابراین برای وصلهٔ جان از دو ورق ۶۰۰×۵۳۰×۱۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.

۱۱ ـ ۷ وصلهٔ ستون‌ها

۱۱ ـ ۷ ـ ۱ معرفی

با رفتن به‌طبقات بالاتر، بار محوری ستون‌ها کم می‌شود، در نتیجه می‌توان برای آنها نیمرخ‌های سبک‌تری انتخاب نمود. این موضوع و همچنین محدود بودن طول تیرآهن، استفاده از وصله در ستون‌ها را ایجاب می‌نمایند. هر چند که کاستن از شمارهٔ نیمرخ با کم شدن نیروی محوری، باعث سبک‌تر شدن ستون و کاهش فولاد مصرفی می‌شود، لیکن باید توجه داشت که وصلهٔ نیمرخ جدید به‌نیمرخ قدیم، اضافه مخارجی در بر دارد که ممکن است کاهش مخارج ناشی از سبک‌تر کردن نیمرخ را جبران ننماید. لذا در عمل تا ارتفاعی مساوی طول یک شاخه تیرآهن (۱۲ متر ـ در حدود سه طبقه)، شمارهٔ نیمرخ عوض نمی‌شود و همان نیمرخ پایین‌ترین طبقه، تا ۲ طبقه بعد نیز ادامه می‌یابد.

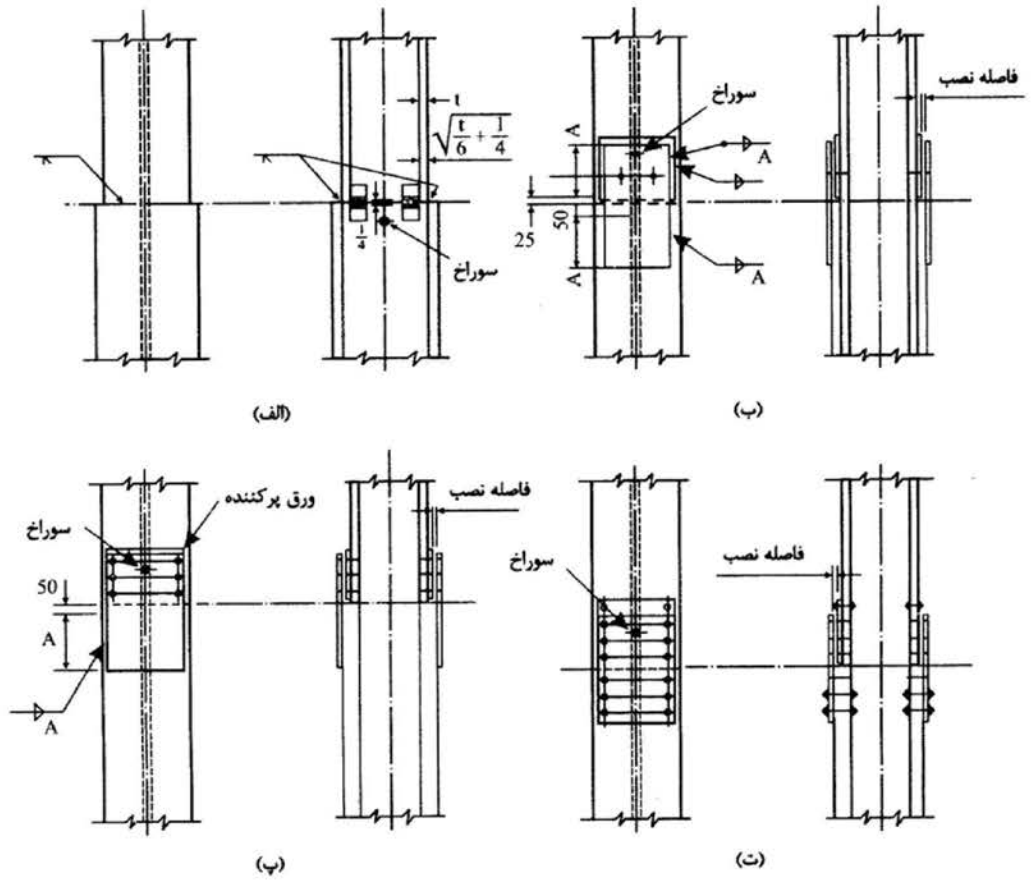
۱۱ ـ ۷ ـ ۲ محل وصله

وقتی که وصلهٔ ستون اجتناب‌ناپذیر شد، بهترین محل برای وصله در حدود ۱۰۰ سانتی‌متری بالای کف طبقه است. چون اولاً در این محل به‌قدر کافی از محل اتصال تیر به‌ستون دور شده‌ایم و ثانیاً از لحاظ انجام عملیات جوشکاری، ارتفاع بسیار مناسبی را در اختیار داریم.

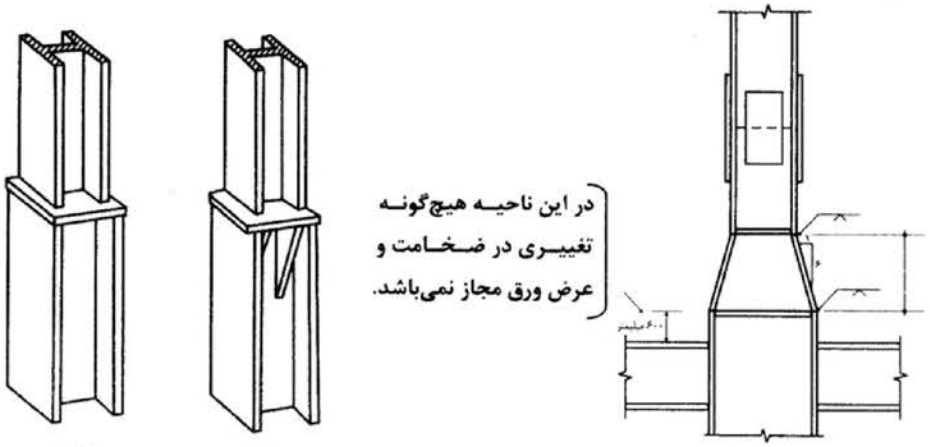
در صورتی که ستون عضوی از قاب خمشی باشد، در اثر بارهای جانبی در آن ایجاد لنگر خمشی می‌گردد که نقطهٔ عطف آن تقریباً در وسط ارتفاع قرار دارد. در این حالت بهترین محل برای وصلهٔ ستون، وسط ارتفاع طبقه است که در آن لنگر خمشی مساوی با صفر می‌باشد. اما در طرف دیگر، انجام عملیات جوشکاری در وسط ارتفاع طبقه، مشکلاتی همراه دارد که ممکن است طراح را به‌انتخاب ارتفاع کمتر برای وصله وا دارد.

۱۱ ـ ۷ ـ ۳ انواع وصله

در شکل ۱۱ ـ ۴۲، مثال‌های متعددی از وصلهٔ ستون‌ها نشان داده شده است. غالباً برای تنظیم و قرارگیری ستون‌ها در محل وصله، زایده‌های کوچکی به‌لبهٔ ستون‌ها جوش می‌شود که از سوراخ‌های موجود در داخل این زایده‌ها، پیچ‌های مونتاژ عبور داده می‌شود. این موضوع در شکل ۱۱ ـ ۴۲ ـ الف، نشان داده شده است. شکل‌های ۱۱ ـ ۴۲ ـ ب و ۱۱ ـ ۴۲ ـ پ، حالاتی را نشان می‌دهند که در آن اتصال ورق اتصال به‌ستون پایینی توسط جوش در کارخانه و یا پای کار قبل از واداشتن ستون انجام شده و اتصال ورق به‌ستون فوقانی توسط جوش یا پیچ به‌صورت درجا صورت پذیرفته است. در هر دو اتصال برای پر کردن فاصلهٔ به‌وجود آمده در اثر اختلاف ابعاد دو ستون، از ورق‌های پرکننده استفاده شده است. در صورتی که اختلاف در ابعاد دو ستون زیاد باشد، اتصال آنها به‌یکدیگر باید مطابق شکل ۱۱ـ۴۳ با استفاده از یک ورق سر ضخیم که تغییرشکل‌پذیری ناچیزی داشته باشد، و یا جزییات کله‌قندی انجام گردد.



شکل ۱۱ ـ ۴۲



شکل ۱۱ ـ ۴۳

۱۱ ـ ۷ ـ ۴ نیروهای وصله

اگر لبه‌های در حال تماس دو ستون گونیا شده و خوب سنگ زده شود، می‌توان درصدی از بار طراحی ستون‌ها را به‌صورت فشار تماسی انتقال داد و در نتیجه از ابعاد ورق‌های اتصال کاست. با توجه به‌اضافه مخارج عمل سنگ زدن و گونیا کردن لبه‌های در حال تماس و عدم اطمینان از نظارت دقیق بر این عمل، استفاده از چنین تمهیداتی برای کاهش نیروهای طرح منطقی به‌نظر نمی‌رسد. لیکن در صورتی که از اجرای دقیق کار مطمئن باشیم، در این صورت طبق توصیهٔ AISC ، ورق وصلهٔ مربوط به‌بال یا جانی که تحت اثر نیروی فشاری و لنگر خمشی به‌فشار کار می‌کند، می‌تواند برای ۵۰ درصد نیروی فشاری طراحی گردد. اگر تحت اثر نیروی محوری و لنگر خمشی در بالی نیروی کششی ایجاد گردد، در این صورت ورق وصلهٔ مربوط به‌این بال باید برای اثر مشترک لنگر ناشی از نیروهای جانبی (باد یا زلزله) و ۷۵ درصد نیروی فشاری ناشی از بار مرده (بدون احتساب بار زنده)، طراحی گردد.

۱۱ ـ ۷ ـ ۵ پُرکننده‌ها

در اتصالات جوشی ساختمان‌ها، پُرکننده‌هایی را که ضخامت‌شان از ۶ میلی‌متر بیشتر باشد باید به اندازهٔ کافی از لبهٔ ورق وصله ادامه داد و قسمت ادامه یافته را با جوش کافی به‌قطعه‌ای که در زیرش قرار دارد متصل نمود. (شکل ۱۱ ـ ۴۲ ـ ت). قدرت جوش باید طوری باشد که تنش‌های ورق وصله را که به‌صورت بار برون‌محور بر روی سطح صفحهٔ پرکننده وارد می‌شود، تحمل نماید. جوشی که ورق وصله را به‌پرکننده متصل می‌نماید باید طوری باشد که بتواند تنش‌های ورق وصله را به‌ورق پرکننده منتقل نموده و خط جوش باید به‌اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا از تنش بیش از حد صفحهٔ پرکننده در ناحیهٔ جوش‌ها جلوگیری به‌عمل آید. لبهٔ پرکننده با ضخامت کمتر از ۶ میلی‌متر باید با لبهٔ ورق وصله هم‌سطح شده و اندازهٔ جوشی که به‌کار برده می‌شود باید برابر مجموع اندازهٔ لازم برای انتقال تنش ورق وصله به‌ورق پرکننده به‌علاوه ضخامت ورق پرکننده باشد. در صورتی‌که ضخامت ورق پرکننده زیاد باشد، توصیه می‌شود از جزییات شکل ۱۱ ـ ۴۳ استفاده نمود.

۱۱ ـ ۷ ـ ۶ اتصالات اعضای فشاری و کششی در خرپاها

اتصالات در دو انتهای اعضای کششی و یا فشاری خرپاها باید نیروی ناشی از باری که در طراحی به‌کار برده شده است را تحمل نماید، ولی این اتصالات نباید مقاومتی کمتر از ۵۰ درصد مقاومت مؤثر قطعات را بر مبنای نوع تنشی که قطعه بر آن اساس انتخاب می‌شود، دارا باشند.

مثال ۱۱ ـ ۱۲

مطلوبست طراحی وصلهٔ یک ستون IPB240 به‌ستون طبقهٔ زیر آن که یک ستون IPB260 می‌باشد.

نیروهای موجود در محل اتصال عبارتند از:

(نیروی محوری) $P = 65\ \text{ton}$

(لنگر) $M_x = 5\ \text{ton.m}$

(برش) $V_x = 4\ \text{ton}$

ارتفاعات طبقه ۳/۸ متر می‌باشد و ضریب K_x = ۱/۱۵ و K_y = ۱ تعیین گردیده است و فولاد مصرفی از نوع ST37 با $F_y = 2400\ \text{kg/cm}^2$ می‌باشد.

حل:

تعیین تنش مجاز برای ستون:

$$\frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{1.15 \times 380}{10.3} = 42.4$$

$$\frac{K_y L_y}{r_y} = \frac{1 \times 380}{6.08} = 63 \quad \rightarrow \quad F_a = 1149\ \text{kg/cm}^2$$

مشخصات هندسی	IPB240	IPB260
ارتفاع (cm)	۲۴	۲۶
پهنای بال (cm)	۲۴	۲۶
ضخامت جان (cm)	۱	۱
ضخامت بال (cm)	۱/۷	۱/۷۵
مساحت (cm^2)	۱۰۶	۱۱۸
ارتفاع جان (cm)	۲۰/۶	۲۲/۵
$I_x(cm^4)$	۱۱۲۶۰	۱۴۹۲۰
r_x (cm)	۱۰/۳	۱۱/۲
r_y (cm)	۶/۰۸	۶/۵۸

نیروی محوری را به‌نسبت مساحت و لنگر خمشی را به‌نسبت ممان اینرسی بین بال و جان IPB240 تقسیم می‌کنیم:

$$I_w = \frac{1\times 20.6^3}{12} = 728\ cm^4$$

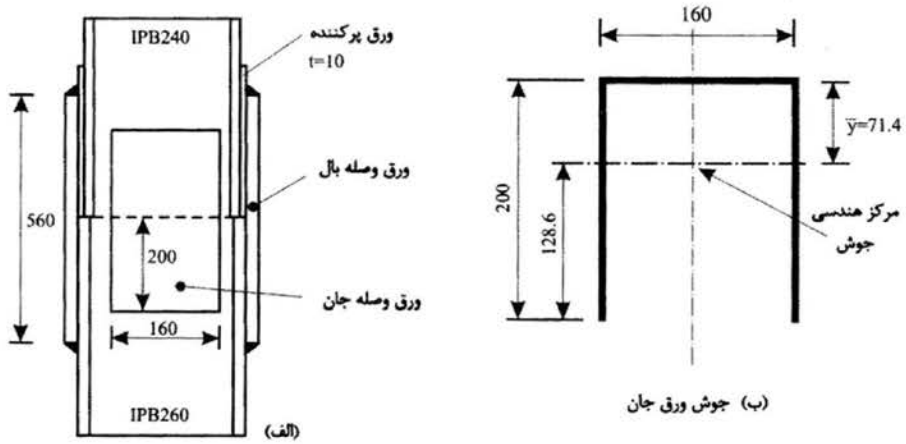
$$A_w = 1\times 20.6 = 20.6\ cm^2$$

$$P_w = 65\times\frac{20.6}{106} = 12.6\ ton$$

$$P_f = \frac{65-12.6}{2} = 26.2\ ton$$

$$M_w = 5\times\frac{728}{11260} = 0.32\ ton.m$$

$$M_f = 5-0.32 = 4.68\ ton.m$$



شکل ۱۱ ـ ۴۴ مربوط به مثال ۱۱ ـ ۱۲ (ابعاد به‌میلی‌متر).

محاسبهٔ وصلهٔ بال

$$\text{نیروی محوری بال} = 26.2 \pm \frac{4.68\times 100}{(24-1.7)} = 26.2 \pm 21$$

$$\text{نیروی حداکثر} = 47.2\ ton$$

$$\text{نیروی حداقل} = 5.2\ ton$$

وصلهٔ بال را برای تمام نیروی موجود در محل مقطع طراحی می‌نماییم.

$$\text{سطح لازم برای وصله} = \frac{47.2\times 1000}{1149} = 41\ cm^2$$

$$\text{پهنای ورق} = 20\ cm$$

$$\text{ضخامت ورق} = \frac{41}{20} = 2.05 \rightarrow t = 2.2\ cm$$

محاسبهٔ جوش

$D = 10\ mm$

$650 \times 1 \times L = 47.2 \times 1000$

$L = 72.6\ cm$

$$\text{طول جوش ران} = \frac{72.6 - 20}{2} = 26.3\ cm$$

طول وصله را در هر طرف ۲۸ سانتی‌متر در نظر می‌گیریم.

$$\text{ارتفاع کل وصلهٔ بال} = 28 \times 2 = 56\ cm$$

ورق پُرکنندهٔ بال

$$\text{ضخامت ورق پُرکننده} = \frac{26 - 24}{2} = 1\ cm$$

$$\text{ارتفاع ورق پُرکننده} = 28 + 4 = 32\ cm$$

$$\text{پهنای ورق پُرکننده} = 20 + 2 = 22\ cm$$

جوش ورق پُرکننده مطابق جوش ورق بال انتخاب می‌گردد، یعنی D= ۱۰mm به‌طور دور تا دور انجام می‌شود.

محاسبهٔ وصلهٔ جان

از دو ورق ۱۶۰×۸ mm استفاده کرده و آن را کنترل می‌کنیم:

$$S = 2 \times \frac{0.8 \times 16^2}{6} = 68.3\ cm^3$$

$$A = 2 \times 16 \times 0.8 = 25.6\ cm^2$$

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{S} = \frac{12.6 \times 1000}{25.6} \pm \frac{0.32 \times 10^5}{68.3} = 492 \pm 469$$

$$\text{تنش حداکثر} = 961\ kg/cm^2 \quad \text{(خوبست)}$$

$$\text{تنش حداقل} = 23\ kg/cm^2 \quad \text{(خوبست)}$$

محاسبهٔ جوش

این جوش تحت اثر لنگر پیچشی و نیروهای محوری و برشی قرار دارد. چون دو ورق وصله داریم، بنابراین نیروی هر یک برابر است با:

$$V = \frac{4}{2} = 2 \text{ ton}$$

$$P = \frac{12.6}{2} = 6.3 \text{ ton}$$

$$M = \frac{0.32}{2} = 0.16 \text{ ton.m}$$

ابعاد جوش را طبق شکل ۱۱ ـ ۴۴ ـ ب، در نظر می‌گیریم:

$$b = 16 \text{ cm} \qquad d = 20 \text{ cm}$$

$$A = 16 + 2\times 20 = 56 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$f'_y = \frac{P}{A} = \frac{6.3\times 1000}{56} = 112.5 \text{ kg/cm}$$

$$f'_x = \frac{V}{A} = \frac{2\times 1000}{56} = 35.7 \text{ kg/cm}$$

$$I_p = \frac{(16)^3 + 6(16)^2(20) + 8(20)^3}{12} - \frac{(20)^4}{2(20)+16} = 5377 \text{ cm}^4/\text{cm}$$

$$\bar{Y} = \frac{d^2}{b+2d} = \frac{20^2}{16+40} = 7.14 \text{ cm}$$

فاصلهٔ نقطهٔ A تا مرکز ثقل $= 20 - 7.14 = 12.86$ cm

$$M_t = 2\times 12.86\times 10^{-2} + 0.16 = 0.42 \text{ ton.m}$$

$$f''_x = \frac{M_t y}{I_p} = \frac{0.42\times 10^5 \times 12.86}{5377} = 100.45 \text{ kg/cm}$$

$$f''_y = \frac{M_t x}{I_p} = \frac{0.42\times 10^5 \times 8}{5377} = 62.49 \text{ kg/cm}$$

$$f_x = 35.7 + 100.45 = 136.15 \text{ kg/cm}$$

$$f_y = 112.5 + 62.49 = 174.99 \text{ kg/cm}$$

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 221.72 \text{ kg/cm}$$

$$650D = 221.72$$

$$D = 0.34 \text{ cm}$$

انتخاب می‌شود: $D = 5\,\text{mm}$

۱۱ ـ ۸ اتصالات مهاربند همگرا

۱۱ ـ ۸ ـ ۱ مقدمه

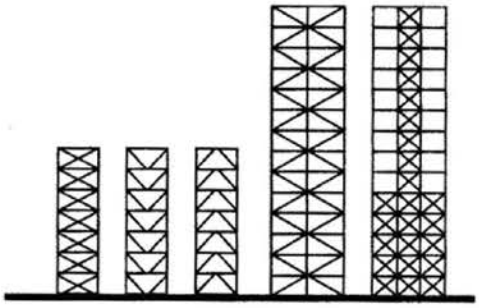
انواع مهاربندهای همگرا و اتصالات آنها در شکل ۱۱ ـ ۴۵ نشان داده شده‌اند. در اتصال این نوع مهاربندها، عضو قطری به‌ورق[۷] اتصال به‌وسیلهٔ جوش و یا پیچ متصل شده و ورق اتصال به‌وسیلهٔ جوش‌های گوشهٔ افقی و قائم به‌تیر و ستون جوش می‌گردد.

۱۱ ـ ۸ ـ ۲ نکات فنی

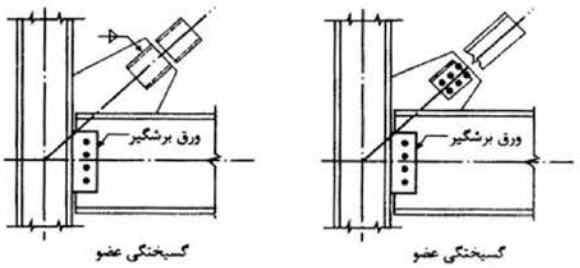
اتصال تیر به‌ستون باید قادر به‌انتقال نیروی قائم و محوری عضو افقی به‌ستون باشد، از این‌رو غالباً آن‌را با جوش مستقیم به‌ستون یکپارچه می‌سازند. اعضای قطری معمولاً از نیمرخ نبشی و یا ناودانی به‌صورت تک و یا زوج انتخاب می‌گردند. هنگام استفاده از نیمرخ‌های زوج به‌منظور کاهش طول‌های افقی و قائم جوش ورق به‌تیر و ستون، می‌توان این جوش را دوطرفه انجام داد.

برای جلوگیری از ایجاد لنگرهای ثانویه در اتصال، حتی‌الامکان باید سعی نمود تا محور هندسی مهاربند از محل برخورد محورهای هندسی تیر و ستون عبور نماید و زاویهٔ اعضای قطری با افق در حدود ۴۵ درجه باشد. در عمل ورق اتصال را با شکل‌ها و برش‌های مختلفی به‌کار می‌برند که شکل ۱۱ ـ ۴۶ یک نمونه از آنها را نشان می‌دهد. هندسهٔ ورق اتصال طوری باید باشد که طول جوش‌های محاسبات L_{wh}، L_{wv} و L_{wd} تأمین شود.

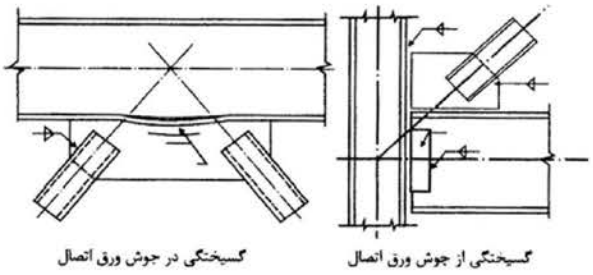
7. *Gusset Plate*

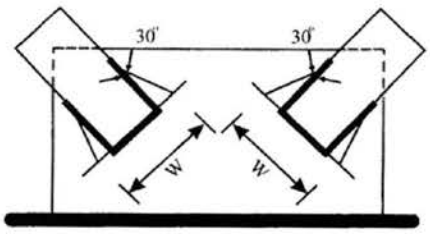


(الف) کاربرد انواع مهاربند
در ساختمان

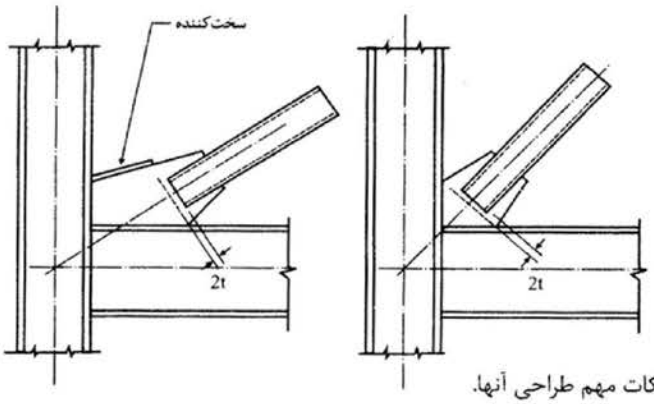


(ب) شکل‌های گسیختی مهاربند



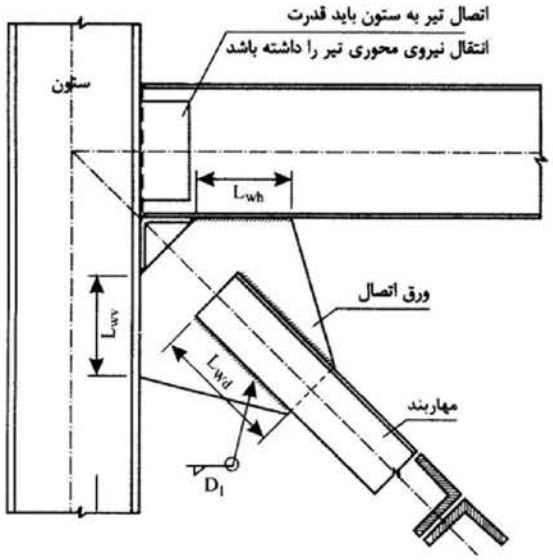


(پ) روش ویتمور برای گسترش
نیرو در ورق مهاربند



(ت) رعایت فاصلهٔ 2t در انتهای عضو
مهاربند به‌منظور شکل‌پذیری
مهاربند

شکل ۱۱ ـ ۴۵ کاربرد مهاربندهای همگرا در ساختمان و نکات مهم طراحی آنها.



شکل ۱۱ ـ ۴۶ یک نمونه از اتصال مهاربندی.

۱۱ ـ ۸ ـ ۳ طرح اتصال مهاربندی

طراحی اتصال عضو قطری مهاربند، شامل طراحی و کنترل موارد زیر می‌باشد:

۱ ـ کنترل ورق اتصال

۲ ـ اتصال عضو مهاربند به‌ورق اتصال

۳ ـ اتصال ورق اتصال به‌تیر و ستون

۴ ـ اتصال تیر به‌ستون

۱۱ ـ ۸ ـ ۳ ـ ۱ کنترل ورق اتصال

ورق اتصال باید جوابگوی ۵ کنترل تنش زیر باشد:

۱. کنترل تنش کششی در عرض مؤثر ویتمور (W)، مطابق شکل ۱۱ ـ ۴۷:

$$f = \frac{P}{Wt} \le 0.6F_y$$

(۵۶ ـ ۱۱)

۲. کمانش ورق اتصال در فشار مطابق شکل ۱۱ ـ ۴۸

$$f_a = \frac{P}{Wt} < F_a$$

(۵۷ ـ ۱۱)

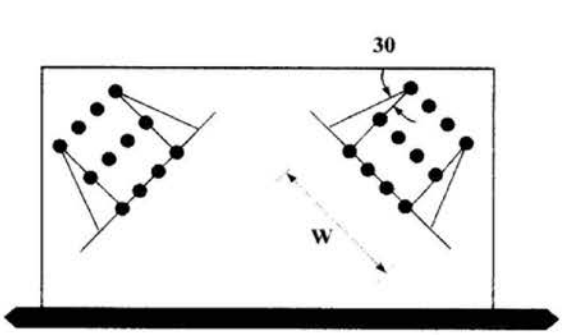
f_a = تنش فشاری در عرض مؤثر ویتمور

P = نیروی محوری فشاری مهاربند

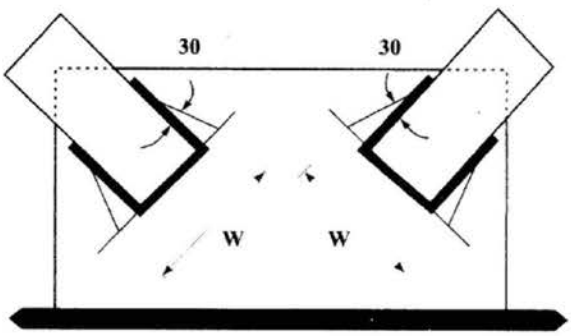
W = عرض مؤثر ویتمور

t = ضخامت ورق اتصال

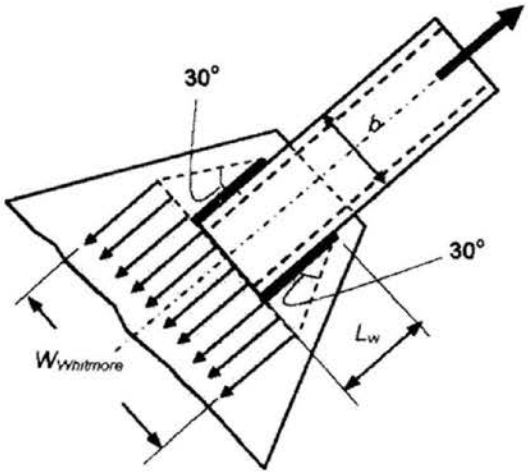
F_a = تنش فشاری مجاز با لاغری $\frac{KL}{r}$



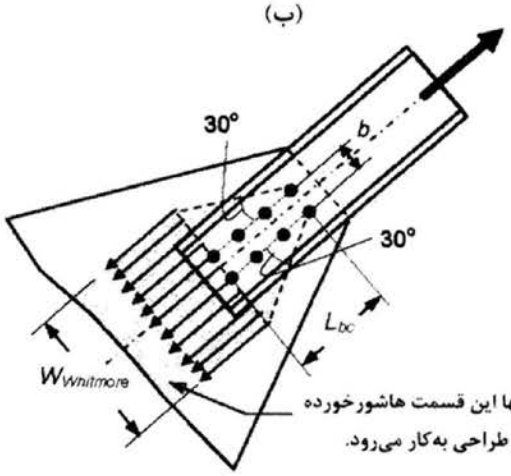
(الف)



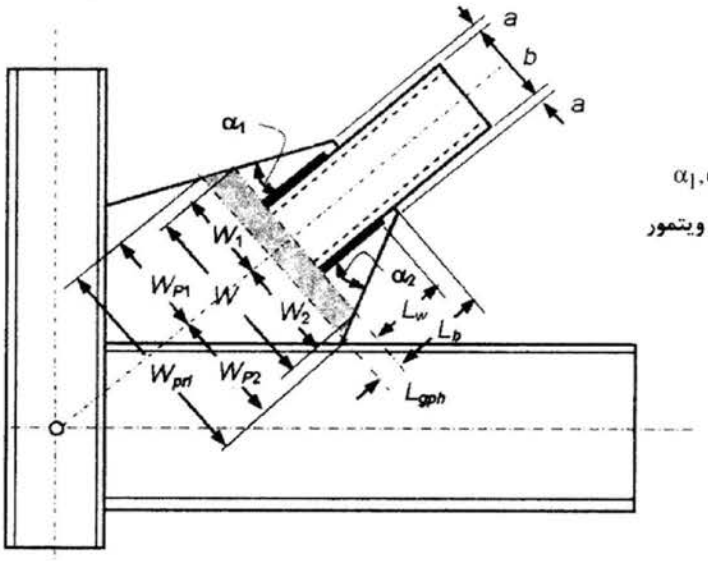
(ب)



(پ) اتصال جوشی



(ت)

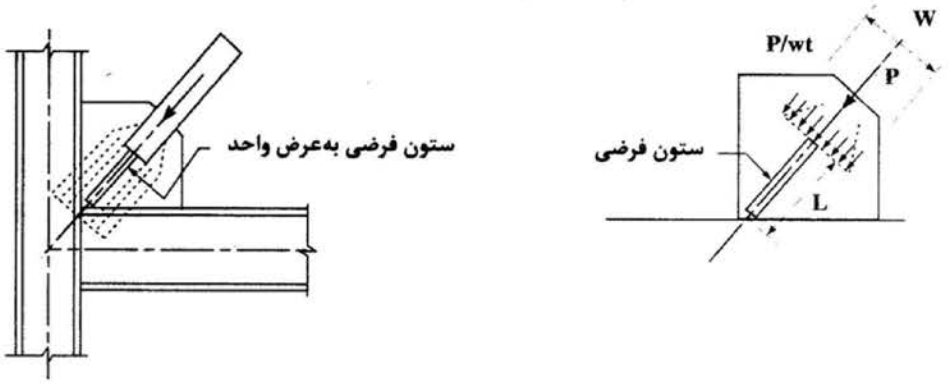


$\alpha_1, \alpha_2 \leq 30^\circ$

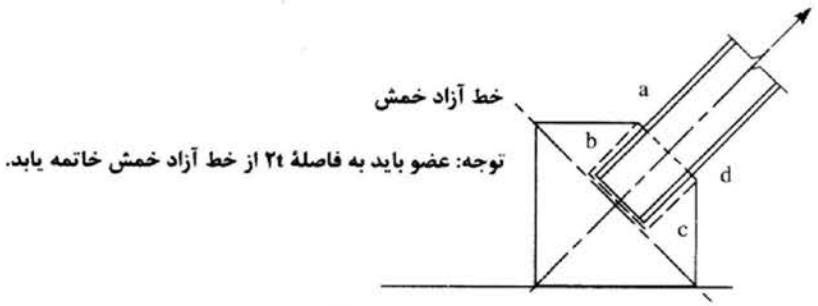
W= عرض ویتمور

(ث) تعیین عرض مؤثر ویتمور در صورتی‌که در یک‌طرف محدودیت در ورق به‌وجود آید.

شکل ۱۱ ـ ۴۷



شکل ۱۱ ـ ۴۸ کمانش ورق اتصال در فشار.



شکل ۱۱ ـ ۴۹ کنترل برش قالبی.

L = طول آزاد ورق اتصال

K = ضریب طول مؤثر مساوی ۱/۲

r = شعاع ژیراسیون ورقی به‌عرض واحد مساوی ۰/۳t

۳. برش قالبی در کشش مطابق شکل ۱۱ ـ ۴۹

$$T \le A_v F_v + A_t F_t \qquad (۵۸ _ ۱۱)$$

A_v = سطح مقطع خالص در برش

F_v = تنش برشی مجاز (مساوی $۰/۳F_u$)

A_t = سطح مقطع خالص کششی

F_t = تنش کششی مجاز (مساوی $۰/۵F_u$)

T = نیروی کششی مهاربند

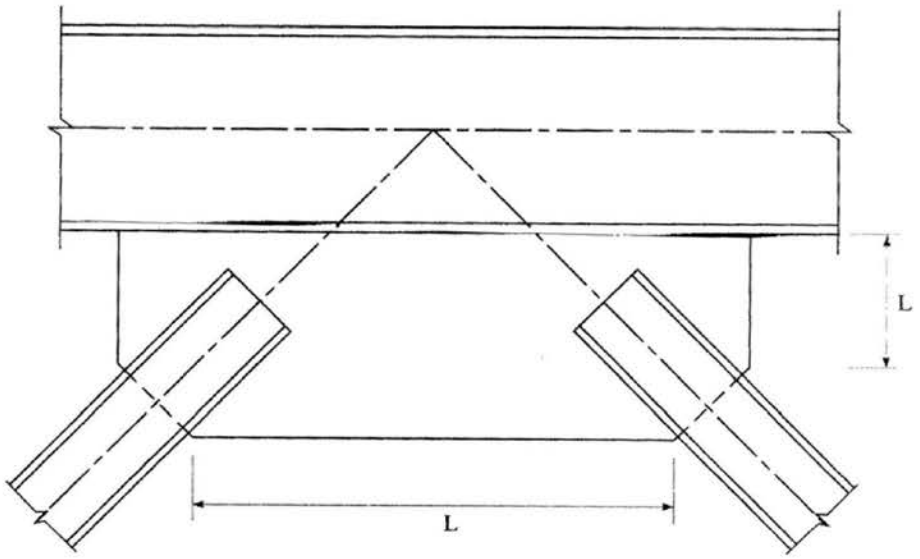
۴. کنترل کمانش لبهٔ آزاد ورق اتصال مطابق شکل ۱۱ ـ ۵۰

$$\frac{L}{t} \le 0.85\sqrt{\frac{E}{F_y}} \qquad (۵۹ _ ۱۱)$$

E = ضریب الاستیسیتهٔ فولاد

F_y = تنش تسلیم فولاد

نسبت فوق برای فولاد نرمه با $F_y = 240\ N/mm^2$ مساوی ۲۵ به‌دست می‌آید.



شکل ۱۱ ـ ۵۰ کمانش لبهٔ آزاد ورق اتصال.

۵ . کنترل تنش ترکیبی در هر مقطع دلخواه از ورق اتصال مطابق شکل ۱۱ ـ ۵۱.

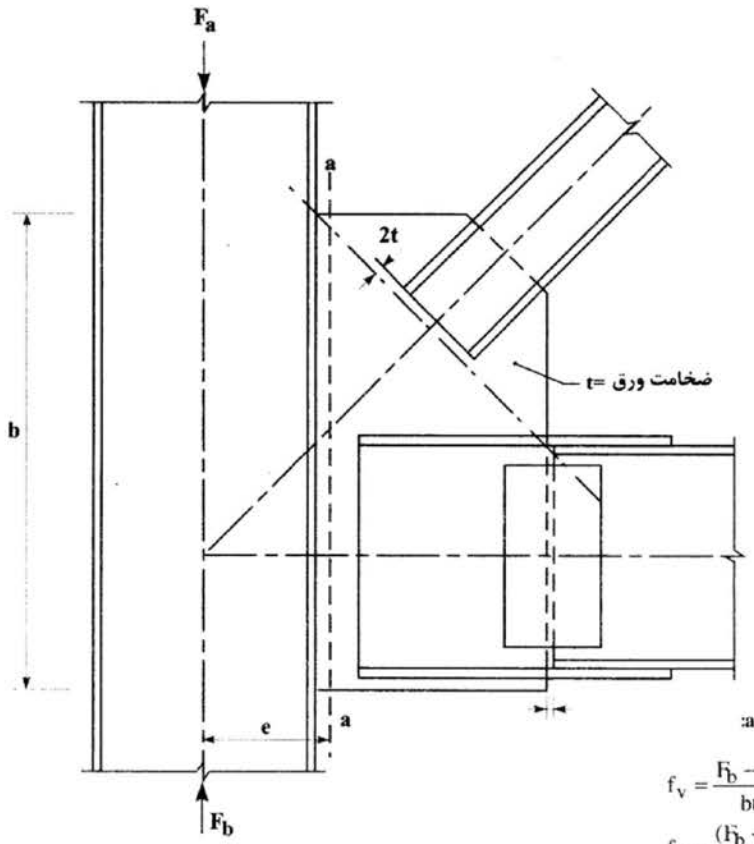
$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_b}{0.6F_y} + \frac{f_v}{0.4F_y} \le 1 \qquad (۶۰ _ ۱۱)$$

که در آن:

f_a = تنش محوری در مقطع مورد مطالعه

f_b = تنش خمشی در مقطع مورد مطالعه

f_v = تنش برشی در مقطع مورد مطالعه



محاسبهٔ تنش در مقطع a-a:

$$f_v = \frac{F_b - F_a}{bt}$$

$$f_b = \frac{(F_b - F_a)e}{t\frac{b^2}{6}}$$

شکل ۱۱ ـ ۵۱ کنترل تنش ترکیبی در مقطع a-a.

۱۱ ـ ۸ ـ ۳ ـ ۲ اتصال عضو قطری مهاربند به‌ورق اتصال

عضو قطری مهاربند که تحت نیروی محوری قرار دارد، باید با وسایل اتصال کافی (پیچ یا جوش) به‌ورق اتصال، متصل گردد. مقاومت مجاز اتصال، کمترین مقدار از مقادیر زیر می‌باشد:

۱ ـ مقاومت کششی عضو مهاربند (مساوی $0/6\ F_y^*\ A$ که A سطح مقطع عضو و F_y^* تنش تسلیم فولاد می‌باشد).

۲ ـ حداکثر نیرویی که از سیستم بر مهاربند اعمال می‌شود.

۱۱ ـ ۸ ـ ۳ ـ ۳ اتصال ورق اتصال به‌تیر و ستون

روش‌های مختلفی جهت کنترل اتصال ورق مهاربندی به‌تیر و ستون ارایه شده و از گذشته مورد استفاده بوده‌اند که

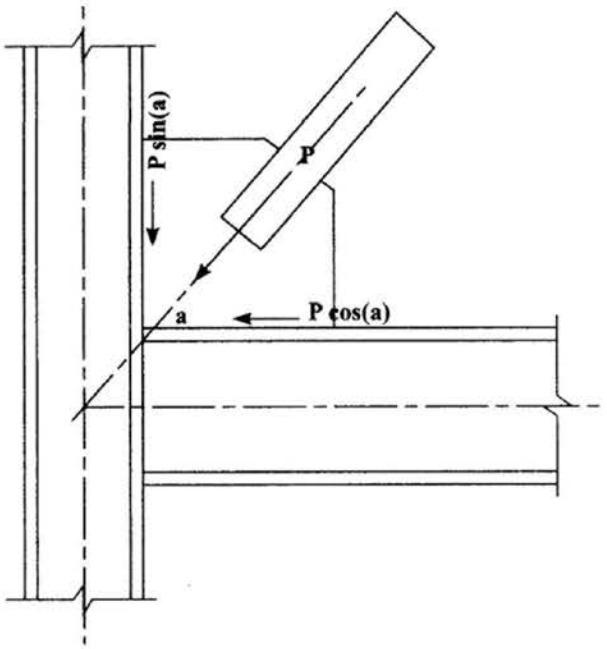
* در طرح لرزه‌ای و در حالت شکل‌پذیری زیاد $F_{ye} = 1.15\ F_y$ جایگزین F_y می‌شود.

تعدادی از آنها براساس اصول کلاسیک تحلیل سازه و برخی براساس نتایج مدل‌سازی‌های عددی و مطالعات آزمایشگاهی ارایه شده‌اند. در این قسمت تعدادی از این روش‌ها به‌شرح زیر معرفی می‌شوند:

۱ ـ روش تجزیهٔ نیروها
۲ ـ روش آستانه
۳ ـ مجموعه روش‌های تورنتون

۱ ـ روش تجزیهٔ نیروها

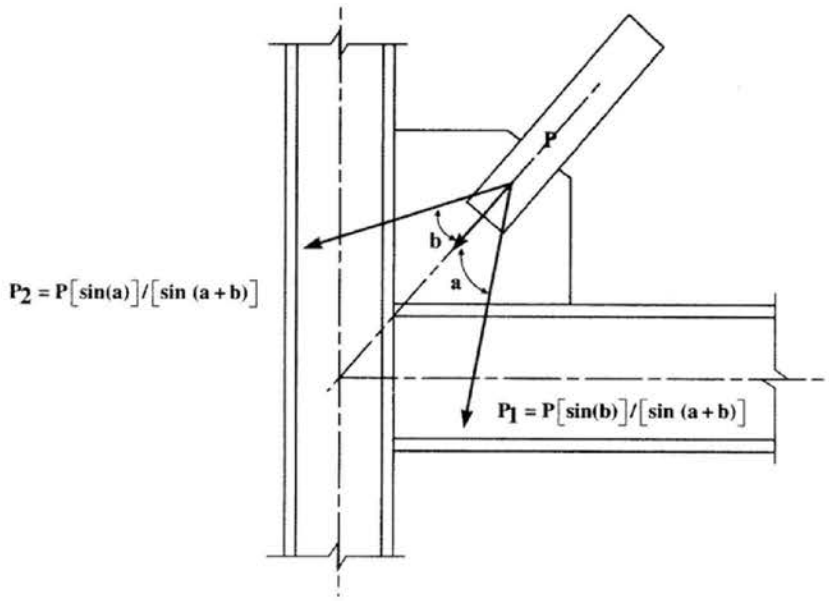
این روش جزو روش‌های قدیمی بوده و در دهه‌های گذشته مورد استفاده بوده است. در این روش، نیروی مهاربندی به‌دو مؤلفهٔ متقاطع یا موازی مطابق شکل تجزیه می‌شود. روش تجزیه به‌دو مؤلفهٔ متعامد بسیار متداول می‌باشد (شکل ۱۱ ـ ۵۲).



شکل ۱۱ ـ ۵۲ روش تجزیهٔ نیروهای مهاربندی.

۲ ـ روش تشبیه به‌خرپا (روش آستانه)

این روش توسط استاد آستانه اصل در سال ۱۹۸۹ ارایه شده است. در این روش با تشبیه ورق اتصال به‌خرپا، نیروی عضو قطری مهاربندی به دو مؤلفهٔ وارد بر مرکز وجوه متصل به تیر و ستون تجزیه و محاسبه می‌گردد. شکل ۱۱ ـ ۵۳ مقادیر نیروهای محاسبه شده در وجوه متصل به‌تیر و ستون را در این روش نشان می‌دهد.



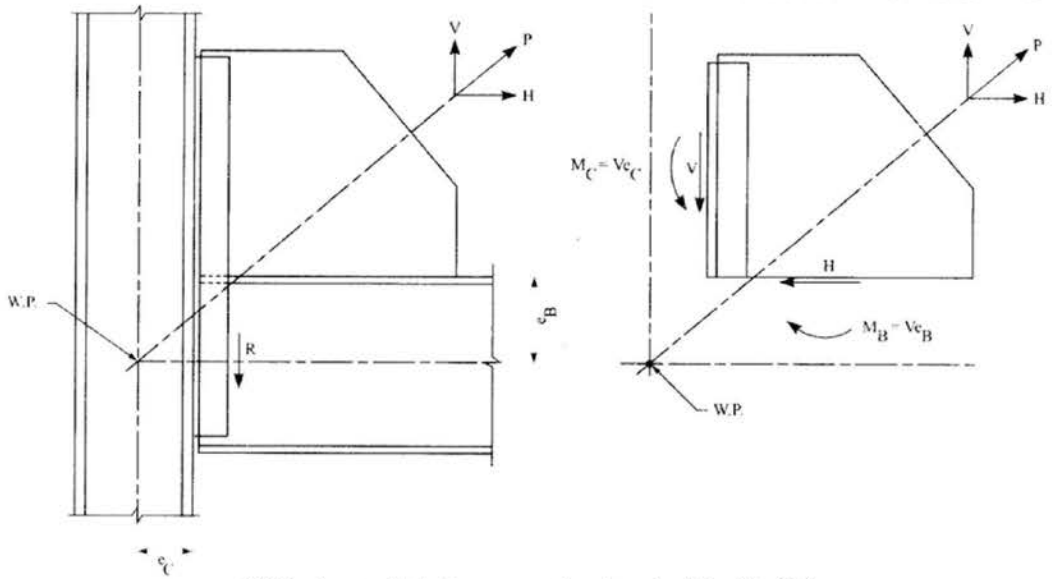
شکل ۱۱ ـ ۵۳ روش آستانه در تعیین نیروهای تکیه‌گاهی ورق اتصال.

۳ ـ مجموعه روش‌های تورنتون

در این قسمت چندین روش مختلف که در قالب مقاله‌ای توسط تورنتون (۱۹۹۱) از طرف کمیتهٔ مشترک انجمن فولاد آمریکا و انجمن مهندسین عمران آمریکا ارایه شده است، معرفی می‌شود. در این روش‌ها بر اساس فرضیات مختلف، نمودار آزاد نیروهای وارد بر ورق مهاربندی تعیین شده و ورق اتصال برای این نیروها کنترل و طراحی می‌شود.

الف ـ روش کیس (KISS)

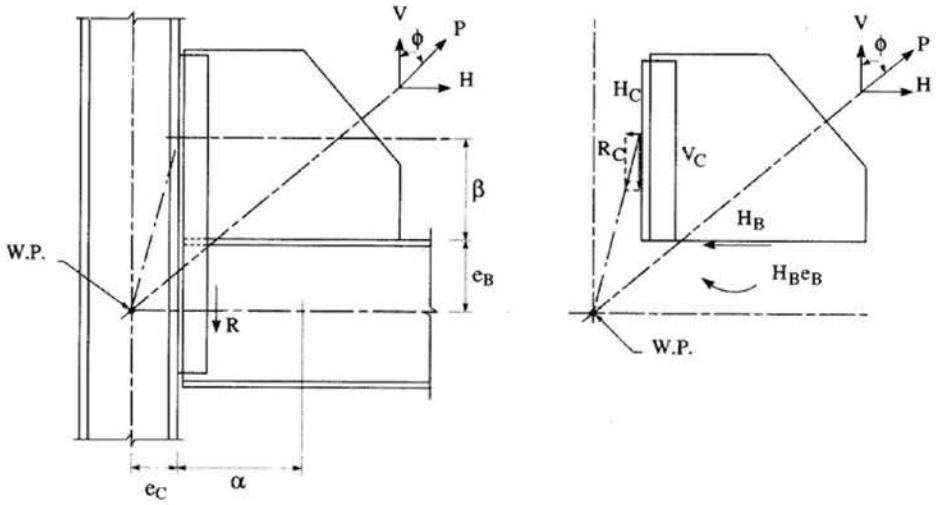
در این روش با تشبیه قاب مهاربندی شده همگرا به‌یک خرپای قائم و با فرض محل تقاطع نیروها در محل تقاطع خط محور تیر، ستون و قطری، نمودار آزاد ورق مهاربندی مطابق شکل ۱۱ ـ ۵۴ به‌دست می‌آید.



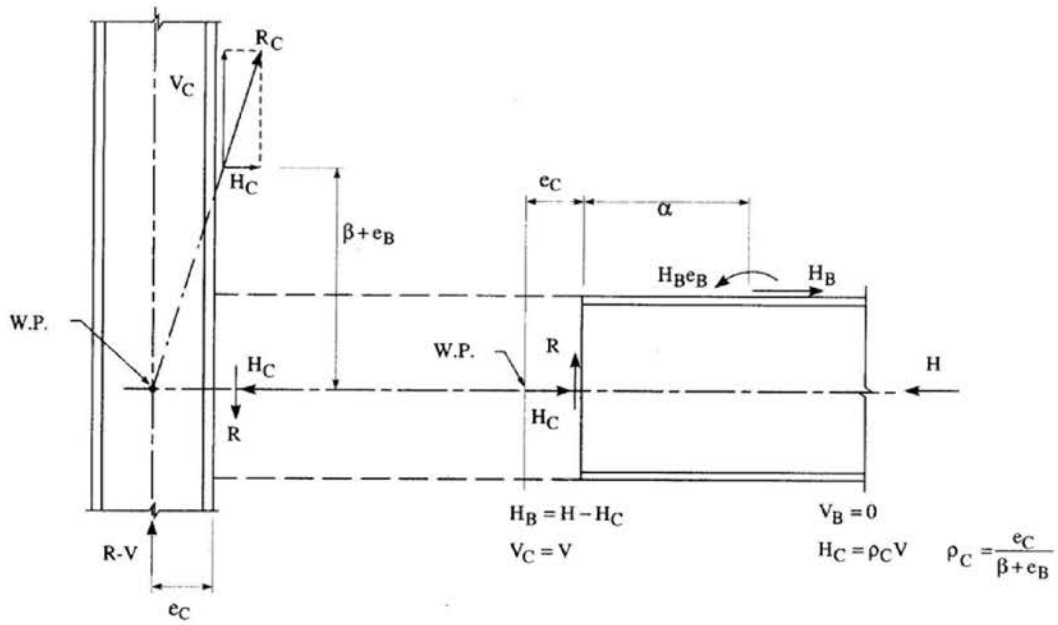
شکل ۱۱ ـ ۵۴ نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال در روش KISS.

ب ـ روش AISC

مطابق شکل ۱۱ ـ ۵۵، در این روش فرض می‌شود که برآیند نیروهای وارد بر وجه جان ستون از نقطهٔ فرضی عملکرد نیروها می‌گذرد و در این روش لنگری بر وجه اتصال ورق به‌جان ستون ایجاد نمی‌شود. شکل ۱۱ ـ ۵۶ فرضیات این روش را نشان می‌دهد.



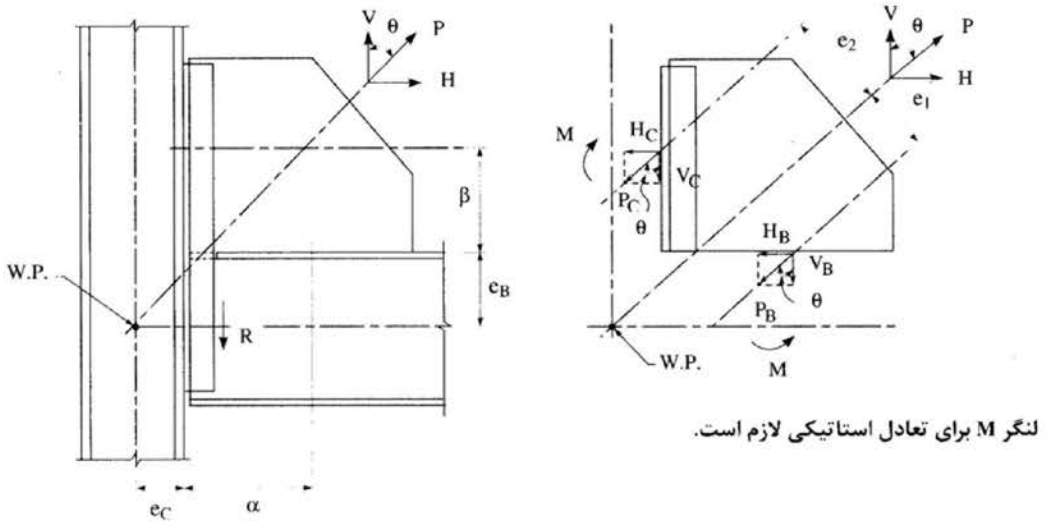
شکل ۱۱ ـ ۵۵ نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال در روش AISC.



شکل ۱۱ ـ ۵۶ نمودار آزاد تیر و ستون در روش AISC.

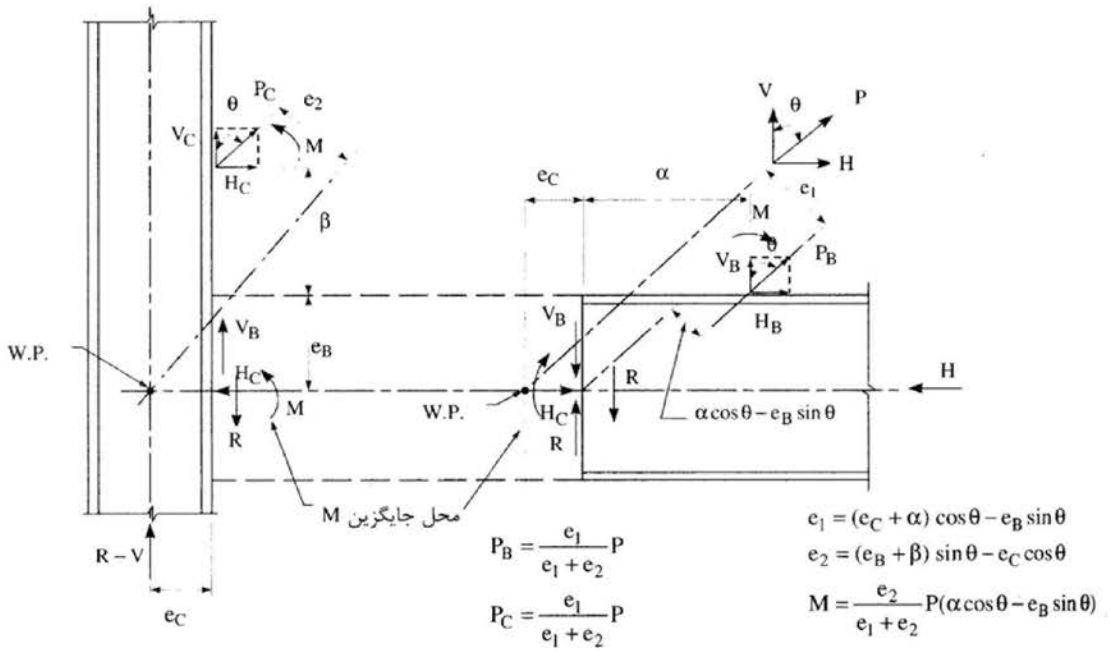
پ ـ روش ریکر[8]

در این روش فرض بر این است که برآیند نیروهای لبهٔ ورق اتصال در هر دو وجه با خط اثر نیروی قطری موازی است. طبق نمودار آزاد نشان داده شده در شکل ۱۱ ـ ۵۷ وجود لنگر خمشی در لبه‌ها لازم است. از آنجا که لنگر مورد نظر به‌صورت بردار آزاد است، موقعیت اثر آن می‌تواند در وجه متصل به‌تیر، وجه متصل به‌ستون یا در محل اتصال تیر و ستون فرض شود. شکل ۱۱ ـ ۵۸ خلاصه‌ای از روابط محاسباتی این روش را نشان می‌دهد.



لنگر M برای تعادل استاتیکی لازم است.

شکل ۱۱ ـ ۵۷ نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال در روش ریکر.

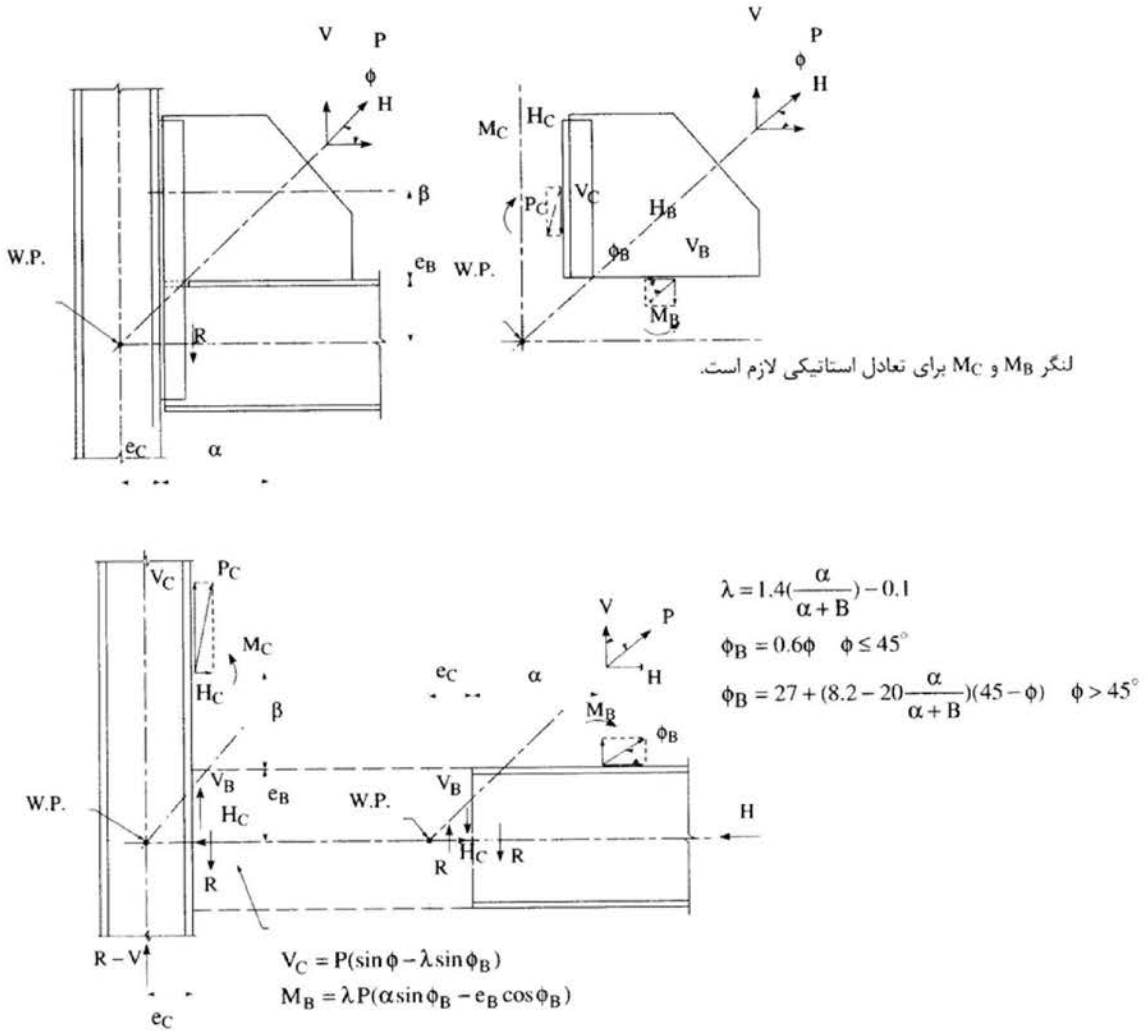


شکل ۱۱ ـ ۵۸ نمودار آزاد تیر و ستون در روش ریکر.

8. *Ricker*

ت ـ روش اصلاح‌شدهٔ ریچارد

در این روش موقعیت برآیند نیروها در وجه اتصال ورق مهاربندی به‌تیر و ستون معرفی نمی‌شود ولی در هر وجه یک لنگر خمشی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۱ ـ ۵۹ روابط محاسباتی جهت تعیین نیروهای وارد بر ورق اتصال را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

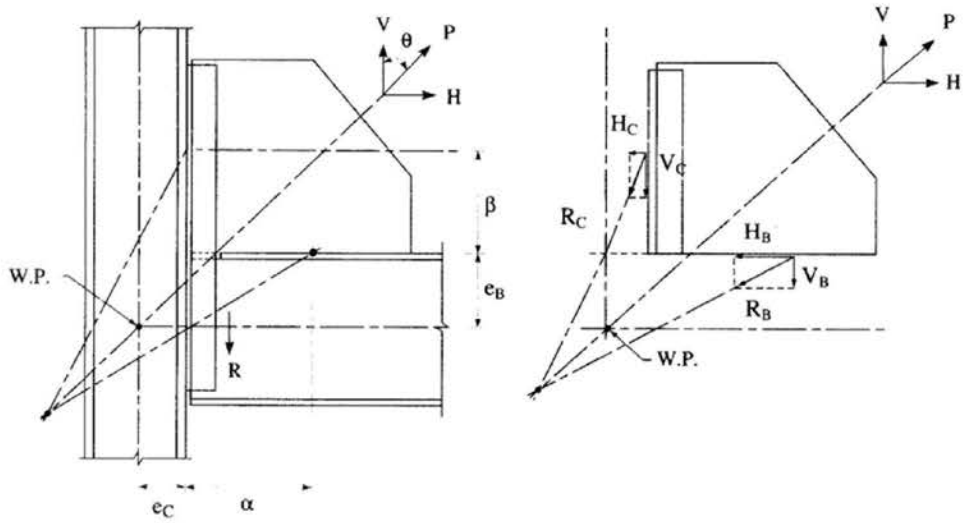


لنگر M_B و M_C برای تعادل استاتیکی لازم است.

شکل ۱۱ ـ ۵۹ نمودار آزاد ورق اتصال و روابط محاسباتی روش اصلاح‌شده ریچارد.

ث ـ روش نیروی یکنواخت

در این روش فرض بر این است که سازه و اجزای آن، به‌همان شکلی که طراح مایل است، رفتار خواهند کرد، به‌شرط آنکه او مسیری با مقاومت کافی برای انتقال نیرو فراهم نماید. کفایت مقاومت این مسیر بر مبنای اصول استاتیک و مقاومت مصالح تعیین می‌گردد. شکل ۱۱ ـ ۶۰ نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال را در روش نیروی یکنواخت نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ ـ ۶۰ نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال در روش نیروی یکنواخت.

مطابق شکل ۱۱ ـ ۶۱، نیروی عضو قطری مهاربند و نیروهای وارد بر وجوه ورق اتصال همه با هم متقاطعند. بنابراین هیچ لنگری برای برقراری تعادل مورد نیاز نخواهد بود. از سوی دیگر برآیند نیروی وجه ستون با محور ستون و مؤلفهٔ افقی نیروی وجه تیر متقاطع است. همچنین نیروی برآیند وجه تیر با محور تیر و مؤلفهٔ عمودی نیروی وجه ستون متقاطع است. بنابراین هیچ لنگری به‌ستون و یا تیر اعمال نمی‌شود.

این روش توانایی ایجاد توزیع تنش یکنواخت در تمام وجوه را دارد لذا آن را روش نیروی یکنواخت یا به‌اختصار UFM می‌خوانند.

براساس نسبت‌های هندسی، محل نقطهٔ تقارب نیروها قابل محاسبه می‌باشد. از انجام این محاسبات رابطهٔ زیر حاصل می‌گردد:

$$\alpha - \beta \tan\theta = e_B \tan\theta - e_c \qquad (۱۱ - ۶۱)$$

که در آن:

e_B = نصف ارتفاع تیر

e_c = نصف ارتفاع ستون

α = فاصلهٔ بین وجه ستون تا مرکز هندسی اتصال ورق به‌تیر

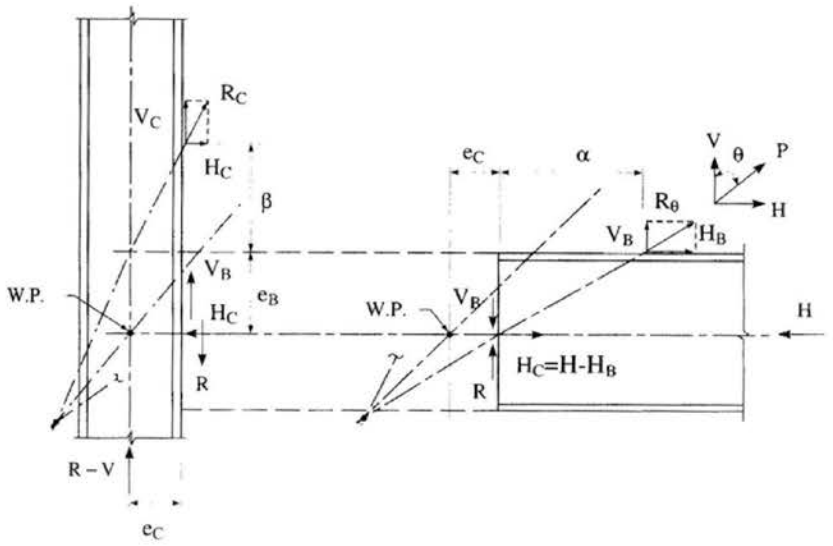
β = فاصلهٔ بین وجه تیر تا مرکز هندسی اتصال ورق به‌ستون

H = مؤلفهٔ افقی نیروی مهاربند

V = مؤلفهٔ قائم نیروی مهاربند

P = نیروی محوری مهاربند

A = نیروی محوری در میانهٔ دهانهٔ تیر



$$H_B = \frac{\alpha}{r}P$$

$$V_B = \frac{e_B}{r}P$$

$$V_C = \frac{\beta}{r}P$$

$$H_C = \frac{e_c}{r}P$$

$$r = \sqrt{(\alpha + e_c)^2 + (\beta + e_B)^2}$$

شکل ۱۱ ـ ۶۱ نمودار آزاد تیر تو ستون در روش نیروی یکنواخت.

مراحل کنترل و طراحی در این روش به‌قرار زیر است:

۱ ـ ابتدا با توجه به‌هندسهٔ اتصال مقادیر فواصل α و β تعیین می‌شوند.

۲ ـ پارامتر r از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

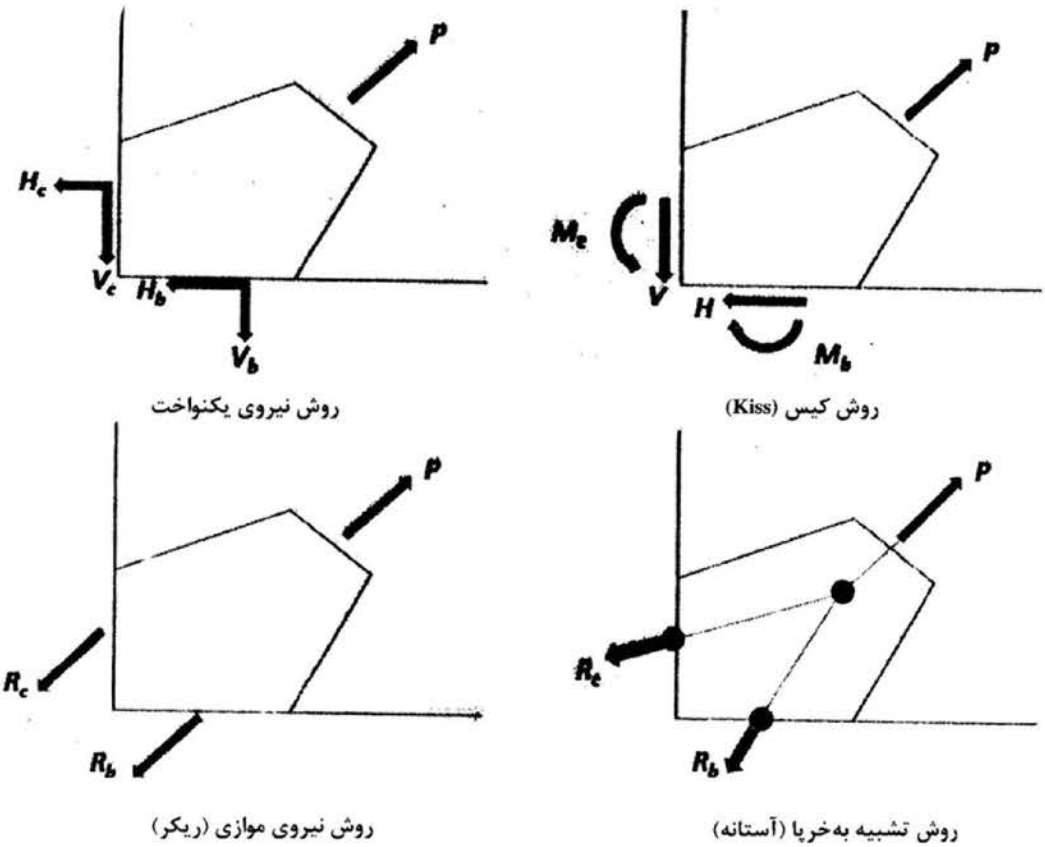
$$r = \sqrt{(\alpha + e_c)^2 + (\beta + e_b)^2} \qquad (۶۲ _ ۱۱)$$

۳ ـ نیروهای بین ورق اتصال و تیر، H_B و V_B تعیین می‌شوند.

۴ ـ نیروهای بین ورق اتصال و ستون، H_C و V_C تعیین می‌شوند.

۵ ـ اتصال تیر به‌ستون باید برای نیروی برشی $R\text{-}V_B$ و نیروی محوری $A \pm (H - H_B)$ کنترل شود که R واکنش انتهای تیر و A نیروی محوری آن است.

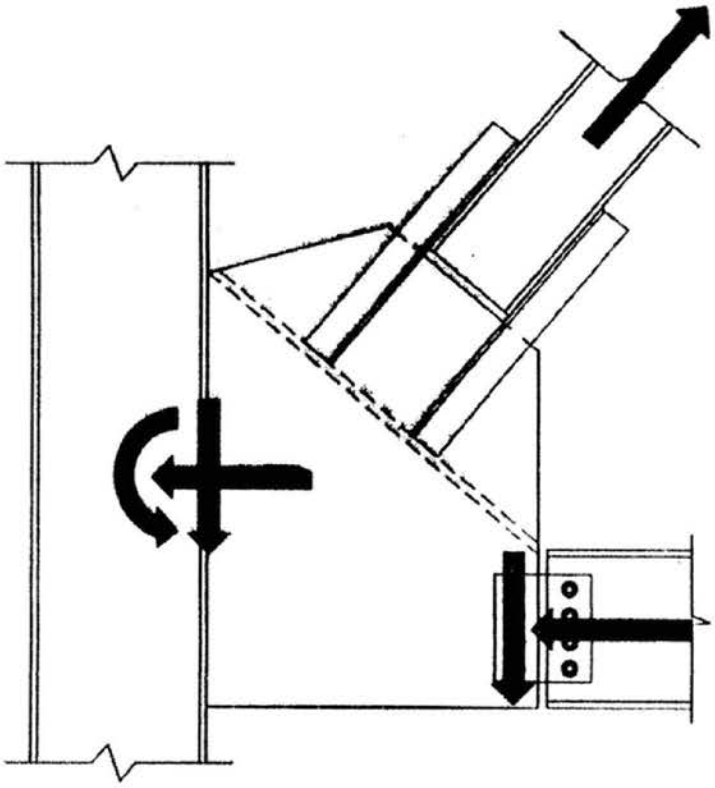
در شکل ۱۱ ـ ۶۲ خلاصه‌ای از روش‌های نوین برای محاسبهٔ نیروهای ورق اتصال به‌تیر و ستون نشان داده شده است.



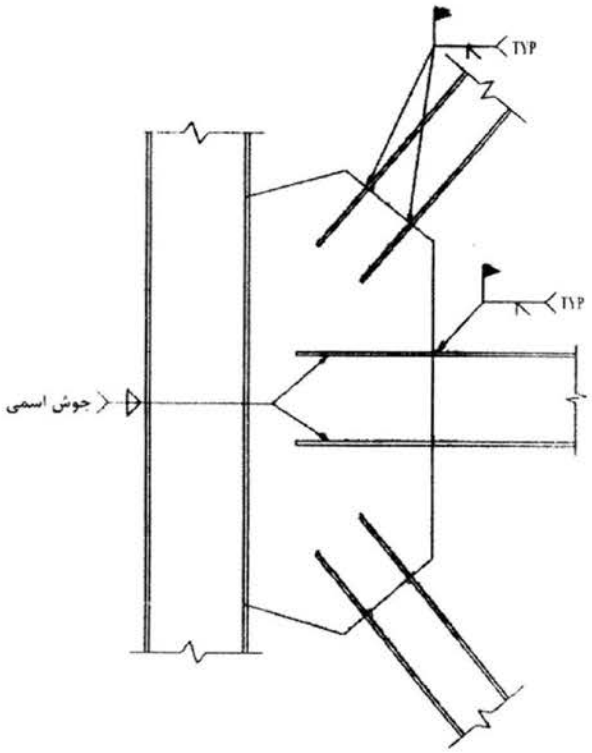
شکل ۱۱ ـ ۶۲ خلاصه‌ای از روش‌های نوین برای تعیین نیروها در فصل مشترک ورق اتصال با تیر و ستون.

به‌طور سنتی، ورق اتصال به‌صورت غیریکپارچه به‌تیر و ستون متصل می‌شود، لیکن ممکن است به‌علت برقراری اتصالات کارگاهی ساده‌تر، ورق اتصال را به‌صورت یکپارچه[9] در نظر گرفت که اعضای قطری و تیر افقی به‌آن متصل شده است. (شکل‌های ۱۱ ـ ۶۳ و ۱۱ ـ ۶۴). در این حالت تعیین نیروهای داخلی در محل اتصال ورق اتصال به‌ستون شامل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی خواهد بود که تعیین آنها نسبتاً ساده است (شکل ۱۱ ـ ۶۳).

9. *Mega gusset plate*



شکل ۱۱ ـ ۶۳ ورق اتصال یکپارچه برای عضو قطری و تیر.



شکل ۱۱ ـ ۶۴ ورق اتصال یکپارچه برای کلیهٔ اعضای قطری و تیر.

مثال ۱۱ ـ ۱۳

اتصال مهاربندی در شکل ۱۱ ـ ۶۵ با هندسه نشان داده شده مفروض است. مقطع مهاربندی از دو عدد UNP240 طراحی شده است. ابعاد مناسبی برای ورق اتصال مهاربندی تعیین کنید و نیروهای وارد بر ورق اتصال را در محل اتکا به‌تیر و ستون براساس ظرفیت حداکثر کششی مقطع مهاربندی به‌روش نیروی یکنواخت محاسبه کنید.

حل:

مقطع مهاربندی $2UNP240$

سطح مقطع کل $A_g = 2\times 42.3 = 84.6\ cm^2$

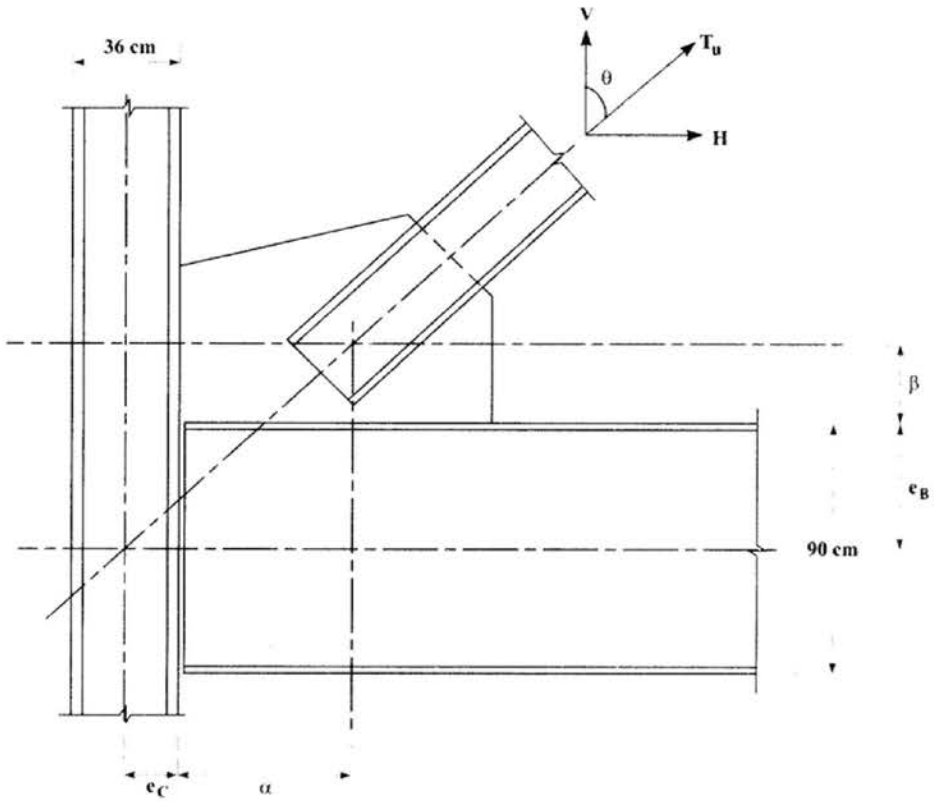
ظرفیت کششی مجاز $T = A_g 0.6F_y = 84.6\times 0.6\times 2400\times 10^{-3} = 122\ ton$

$\theta = 47^\circ$ (طبق طرح هندسه)

$\tan\theta = \tan 47^\circ = 1.07$

$e_B =$ نصف ارتفاع تیر $= 0.5\times 90 = 45cm$

$e_C =$ نصف ارتفاع ستون $= 0.5\times 36 = 18cm$



شکل ۱۱ ـ ۶۵

با انجام چندین نوبت سعی و خطا مقدار β معادل ۳۰ سانتی‌متر انتخاب می‌شود.

$$\alpha = e_B \tan\theta - e_C + \beta \tan\theta$$

$$\alpha = (45)(\tan 47) - 18 + 30(\tan 47)$$

$$\alpha = 62.4 \text{ cm}$$

$$r = \sqrt{(\alpha + e_C)^2 + (\beta + e_B)^2}$$

$$r = \sqrt{(62.4 + 18)^2 + (30 + 45)^2}$$

$$r = 110 \text{ cm}$$

نیروهای وارد بر ورق اتصال در محل اتکا به‌تیر و ستون براساس نیروی T به‌ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

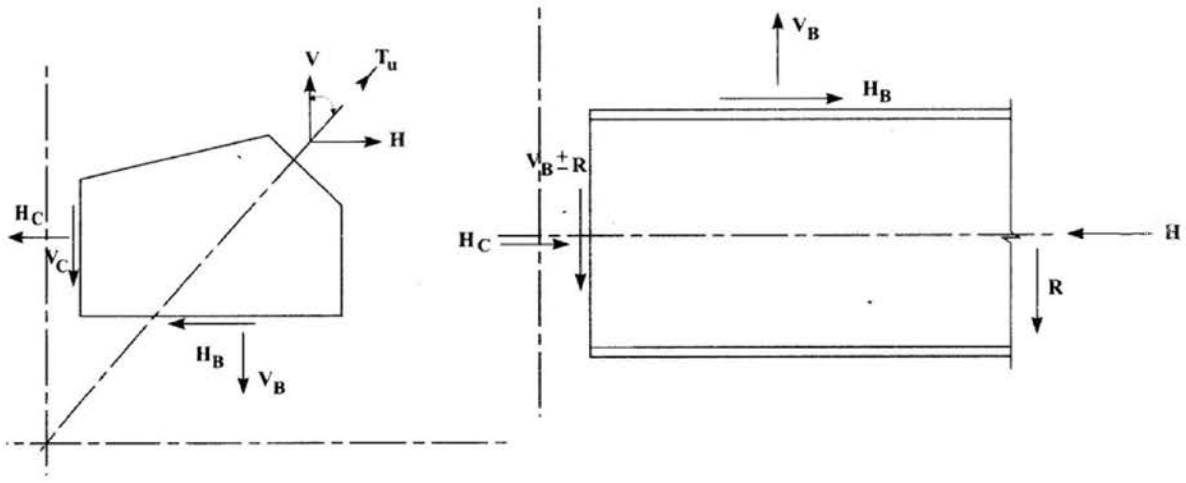
$$V_C = \frac{\beta}{r}(T) = \frac{30}{110}(122) = 33.3 \quad \text{ton}$$

$$H_C = \frac{e_C}{r}(T) = \frac{18}{110}(122) = 20 \quad \text{ton}$$

$$H_B = \frac{\alpha}{r}(T) = \frac{62.4}{110}(122) = 69.2 \text{ ton}$$

$$V_B = \frac{e_B}{r}(T) = \frac{45}{110}(122) = 49.9 \quad \text{ton}$$

نمودار آزاد ورق اتصال و تیر ورق مطابق شکل زیر است:



شکل ۱۱ ـ ۶۶

کنترل جسم آزاد ورق اتصال:

$$\sum H = 0$$
$$H = H_B + H_C$$
$$H = 122 \sin 47^\circ = 89.2 \text{ ton}$$
$$H_B + H_C = 69.2 + 20 = 89.2 \text{ ton}$$

$$\sum V = 0$$
$$V = V_B + V_C$$
$$V = 122 \cos 47^\circ = 83.2 \text{ ton}$$
$$V_B + V_C = 49.9 + 33.3 = 83.2 \text{ ton}$$

اتصال جوشی ورق اتصال در محل اتصال به تیر و ستون براساس نیروهای محاسبه شده کنترل می‌شود. به‌عنوان مثال خط جوش اتصال ورق به تیر برای نیروی V_B و H_B (جوش تحت اثر ترکیب برش و کشش) کنترل و محاسبه خواهد شد.

مثال ۱۱ ـ ۱۴

گرهٔ اتصال اعضای مهاربندی به‌تیر و ستون مطابق شکل ۱۱ ـ ۶۷ مفروض است. فولادهای مصرفی از نوع ST37 و الکترود جوشکاری از نوع E60 است. با توجه به‌مشخصات مقاطع تیر، ستون و مهاربند، اتصال ورق اتصال را به‌تیر و ستون با استفاده از روش AISC طراحی کنید. سازهٔ مورد نظر در منطقهٔ لرزه‌خیز شدید قرار دارد و $\Omega_0 = 2$ است.

مقطع مهاربندی : 2UNP 200

$$A = 2 \times 32.20 = 64.40 \text{ cm}^2$$

مقطع تیر : IPE450 , $d = 45\text{cm}$, $b_f = 19$ cm

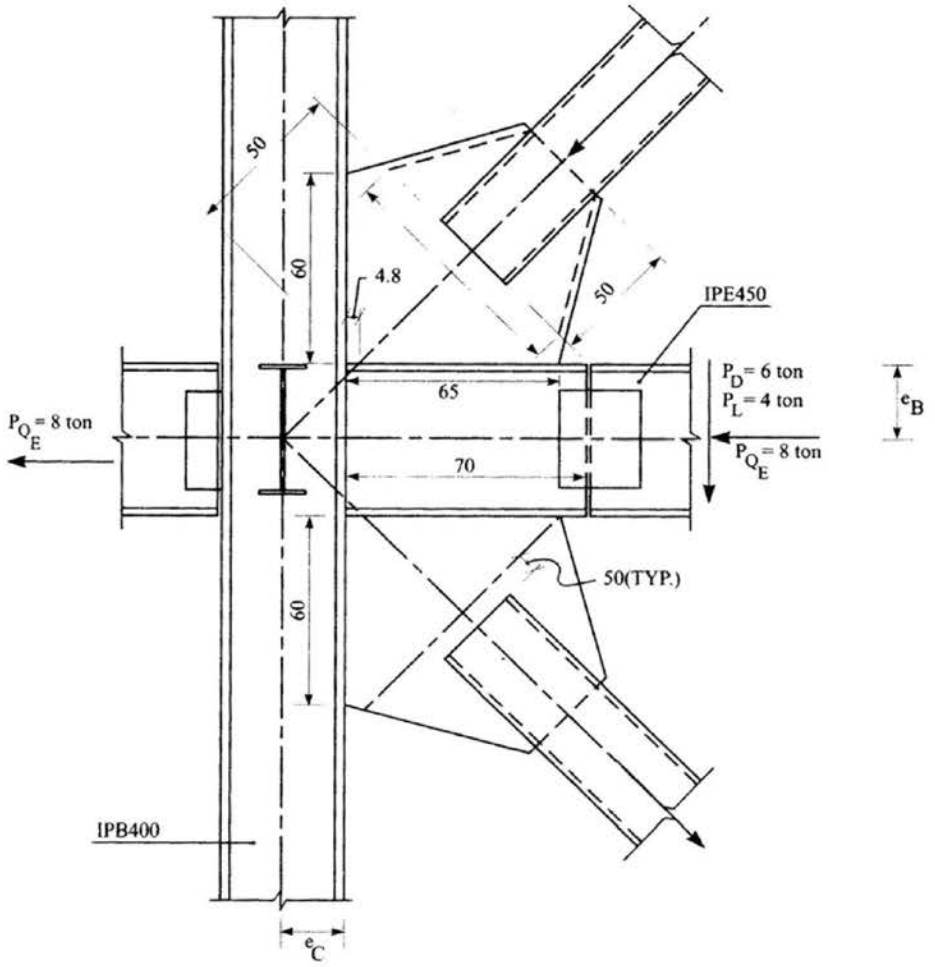
$t_w = 0.94$ $t_f = 1.46$ cm

مقطع ستون : IPB400 , $d = 40\text{cm}$, $b_f = 30$ cm

$t_w = 1.35$ $t_f = 2.4$ cm

حل:

برای حل مسئله ابتدا ظرفیت کششی و فشاری مجاز مقطع مهاربندی را تعیین نموده و سپس اتصال به‌صورت تمام قدرت طراحی می‌شود. از روش تنش مجاز استفاده شده است.



شکل ۱۱ ـ ۶۷

۱ ـ محاسبهٔ ظرفیت مقطع مهاربندی:

$$T_u = \text{ظرفیت کششی مجاز} = 0.6\, F_y A_g$$

$$= 0.6 \times 2400 \times 64.4 \times 10^{-3} = 93 \text{ ton}$$

تنش مجاز فشاری را $1200\ kg/cm^2$ فرض می‌کنیم

$$P_c = 1.25\, F_a . A_g$$

$$= 1.25 \times 1200 \times 64.4 \times 10^{-3} = 97 \text{ ton}$$

نیروی طراحی مهاربند را در فشار و کشش معادل مقادیر به‌دست آمده در نظر می‌گیریم.

ضخامت اولیهٔ ورق اتصال را ۳۰ میلی‌متر فرض می‌کنیم.

۲ ـ محاسبهٔ نیروهای وارد بر ورق اتصال

با فرض عدم وجود لنگر خمشی در ستون و براساس هندسه نشان داده شده در شکل، از روش AISC جهت تعیین نیروهای وارد بر ورق اتصال استفاده می‌شود:

$$e_B = \text{نصف ارتفاع تیر} = \frac{1}{2}\times 45 = 22.5 \text{ cm}$$

$$e_C = \text{نصف ارتفاع ستون} = \frac{1}{2}\times 40 = 20 \text{ cm}$$

$$\theta = \text{طبق شکل} = 45^\circ$$

$$\beta = \text{با سعی و خطا} = 30 \text{ cm}$$

$$\alpha = e_B tg\theta - e_C + \beta tg\theta$$

$$= (22.5)\tan 45 - 20 + 30\tan 45 = 32.5 \text{ cm}$$

نیروهای بدون ضریب ثقلی وارد بر تیر عبارتند از:

$$R = P_D + P_L = 6 + 4 = 10 \text{ ton}$$

فاصلهٔ محل اثر واکنش تیر از ستون برابر ۷۰ سانتی‌متر است. کل نیروی برشی وارد بر لب ستون برابر است با:

$$V_f = (93+97)\times\frac{1}{\sqrt{2}} + 10 = 144 \text{ ton}$$

مقدار لنگر در بر بال ستون برابر است با:

$$M_f = (93+97)\times\frac{1}{\sqrt{2}}e_C - R(70)$$

$$= \left[190\times\frac{1}{\sqrt{2}}\times 20 - 10\times(70)\right]\times 10^{-2} = 19.87 \text{ ton.m}$$

بازوی لنگر جهت تحمل لنگر خمشی فوق برابر است با فاصلهٔ بین مراکز هندسی ناحیهٔ اتصال ورق‌های اتصال بالا و پایین به‌وجه ستون:

$$d_{arm} = d_b + 2\beta = 45 + 2\times 30 = 105 \text{ cm}$$

$$H_{UC} = \frac{M_f}{d_{arm}} = \frac{19.87}{1.05} = 18.92 \text{ ton}$$

نیروی برشی به‌نسبت سطح برشی ورق‌های اتصال و سطح برشی جان تیر توزیع می‌شود. در این مثال سطح برشی ورق‌های اتصال (در بالا و پایین) برابر است با:

$$A_{guss} = 2\times 3\times 60 = 360 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{تیر}} = d_b.t_w = 45\times 0.94 = 42.3 \text{ cm}^2$$

بنابراین سهم ورق اتصال از کل نیروی برشی در بَر ستون برابر است با:

$$V_{UC} = \frac{1}{2} \times (\frac{360}{360 + 42.3}) \times 144 = 64.4 \quad \text{ton}$$

$$R_{UB} = \text{سهم تیر} = 144 - 2 \times 64.4 = 15.20 \text{ ton}$$

برای ورق اتصال مهاربند فشاری:

$$H_{UB} = P_c \, (\frac{1}{\sqrt{2}}) - H_{UC} = 97 \times \frac{1}{\sqrt{2}} - 18.92 = 49.67 \text{ ton}$$

$$V_{UB} = P_c \, (\frac{1}{\sqrt{2}}) - V_{UC} = 97 \times \frac{1}{\sqrt{2}} - 64.4 = 4.20 \text{ ton}$$

بازوی لنگر مؤلفهٔ قائم نیروی مهاربندی برابر است با فاصلهٔ مرکز هندسی اتصال ورق به‌تیر تا محل برخورد محور مهاربندی با خط اتصال ورق با بال تیر. داریم:

$$\text{فاصله} = \alpha - 4.8 = 32.5 - 4.8 = 27.7 \text{ cm}$$

مجموع لنگرها حول مرکز خط اتصال ورق به‌بال تیر برای مهاربند فشاری برابر است با:

$$M_{UB} = 97 (\frac{1}{\sqrt{2}}) \times 27.7 - V_{UC} \alpha - H_{UC} \beta$$

$$= [68.6 \times 27.7 - 64.4 \times 32.5 - 18.92 \times 30] \times 10^{-2} = -7.60 \text{ ton.m}$$

برای مهاربند کششی داریم:

$$H_{UC} = 18.92 \text{ ton}$$

$$V_{UC} = 64.4 \text{ ton}$$

$$H_{UB} = T_r \frac{1}{\sqrt{2}} - H_{UC} = 93 \times \frac{1}{\sqrt{2}} - 18.92 = 46.84 \text{ ton}$$

$$V_{UB} = T_r \frac{1}{\sqrt{2}} - V_{UC} = 93 \times \frac{1}{\sqrt{2}} - 64.4 = 1.4 \text{ ton}$$

مجموع لنگرها حول مرکز اتصال ورق به‌بال تیر برای مهاربند کششی برابر است با:

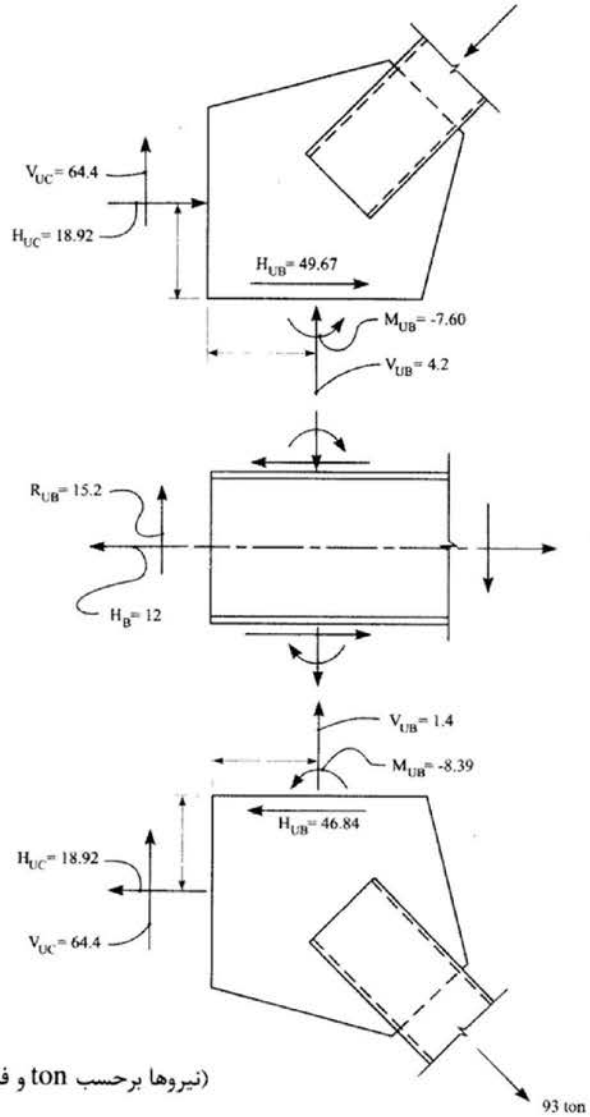
$$M_{UB} = (93 \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times 27.7 - V_{UC} \alpha - H_{UC} \beta) \times 10^{-2}$$

$$= -8.39 \text{ ton.m}$$

$$H_B = 0.75 \Omega_0 P_{Q_E} = 0.75 \times 2 \times 8 = 12 \text{ ton}$$

نیروی محوری موجود در تیر طبق صورت مسئله معادل ۸ تن و به‌دلیل رده‌بندی ساختمان ضریب $\Omega_0 = 2$ انتخاب شده است.

نیروهای وارد بر ورق اتصال در محل اتصال به‌تیر و ستون در شکل زیر نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که ممان وارد بر تیر در بالا و پایینِ غیرمتعادل است که از آن صرف‌نظر می‌شود. این اختلاف به‌دلیل اختلاف نیروی H_C در ورق اتصال بالا و پایین است.



(نیروها برحسب ton و فواصل برحسب سانتی‌متر هستند.)

شکل ۱۱ ـ ۶۸

طرح جوش اتصال ورق به‌ستون

نیروهای وارد بر ورق اتصال در محازات ستون برای مهاربند کششی و فشاری یکسان است. نیروهای وارد بر خط جوش برابرند با:

$$f_v = \frac{V_{UC}}{L_w} = \frac{64.4\times10^3}{60} = 1073 \text{ kg/cm}$$

$$f_a = \frac{H_{UC}}{L_w} = \frac{18.92\times10^3}{60} = 315.33 \quad \text{kg/cm}$$

$$f_r = \sqrt{1073^2 + 315.33^2} = 1118.37 \ \ kg/cm$$

$$F_w = (0.3\phi F_u) \times (\frac{\sqrt{2}}{2} D) = 650D$$

$$D = \frac{f_r}{650} = \frac{1118.37}{650} = 1.72 \text{ cm}$$

انتخاب $D = 18 \ \ mm$

کنترل ضخامت جوش‌ها برحسب ضخامت ورق اتصال معادل ۳۰ میلی‌متر و ضخامت عضو مهاربندی متصل برعهدهٔ خوانندگان است.

طرح جوش اتصال ورق به‌تیر

نیروهای وارد بر اتصال شامل نیروی محوری، برش و لنگر خمشی است.

اساس مقطع جوش $S_w = \frac{L_w^2}{6} = \frac{65^2}{6} = 704 \text{ cm}^2$

برای مهاربند فشاری $f_v = \frac{H_{UB}}{L_w} = \frac{49.67 \times 10^3}{65} = 764.15 \text{ kg/cm}$

$$f_a = \frac{V_{UB}}{L_w} = \frac{4.20 \times 10^3}{65} = 64.6 \text{ kg/cm}$$

$$f_b = \frac{M_{UB}}{S_w} = \frac{7.60 \times 10^5}{704} = 1079.55 \text{ kg/cm}$$

$$f_{max} = \sqrt{f_v^2 + (f_a + f_b)^2} = 1375.86 \text{ kg/cm}$$

$$D \geq \frac{1375.86}{650} = 2.12 \text{ cm}$$

ورق اتصال $t = 30 \text{ mm}$

بال تیر $t_f = 14.6 \text{ mm}$

$$\rightarrow \begin{cases} t_{min} = 6 \text{ mm} \\ t_{max} = 30 - 2 = 28 \text{ mm} \end{cases}$$

انتخاب $t = 25mm$

مثال ۱۱ ـ ۱۵

در این مثال طراحی مهاربند ضربدری همگرا[10] برای ساختمان‌های کوتاه (مثلاً مسکونی) مورد توجه قرار می‌گیرد. مهاربند یک دهانه و دو طبقه شکل ۱۱ ـ ۶۹ را در نظر بگیرید. برش طبقهٔ اول مساوی ۹۰ تن می‌باشد که فرض می‌شود به‌طور مساوی بین قطری‌های فشاری و کششی تقسیم می‌گردد. فولاد مصرفی از نوع ST37 با $F_y = 2400$ و $F_u = 3700$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. (مطلوب است طراحی عضو قطری مهاربند و اتصال آن)

$L = \sqrt{3.6^2 + 6^2} = 7 \text{ m}$ (طول محور به‌محور عضو قطری)

10. *Concertric*

$F=\frac{7}{6}\times\frac{90}{2}=52.5\ \text{ton}$ (نیروی مهاربند به‌صورت کششی یا فشاری)

طول آزاد برای کمانش در صفحهٔ مهاربند، نصف طول کل قطری در نظر گرفته می‌شود:

$$L_{x-x}=\frac{L}{2}$$

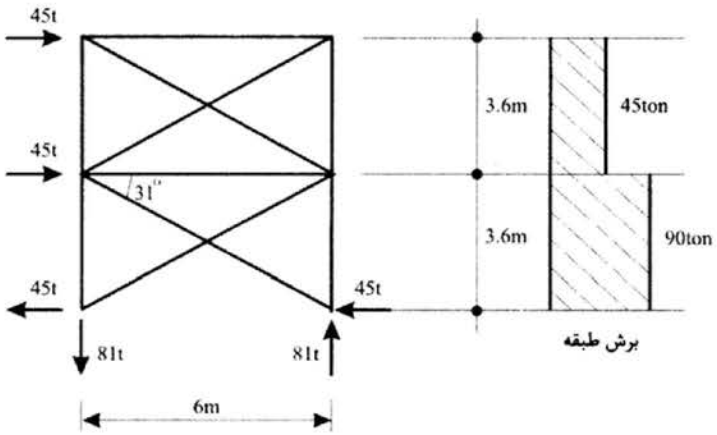
طول آزاد برای کمانش خارج از صفحه، دو سوم طول کل مهاربند منظور می‌گردد:

$$L_{y-y}=\frac{2L}{3}$$

اگر نیمرخ ستون بال پهن IPB300 و نیمرخ تیر از IPE330 باشد، طول آزاد مهاربند برابر است با:

$L=\sqrt{(6-0.3)^2+(3.6-0.33)^2}=6.57\ \text{m}$ (طول آزاد مهاربند)

(البته وجود ورق اتصال نیز از طول آزاد عضو قطری خواهد کاست).



شکل ۱۱ ـ ۶۹

اگر برای مقطع عضو قطری از دو نبشی پشت به‌پشت ۱۲×۱۲۰×۱۲۰ میلی‌متر استفاده شود، مشخصات هندسی آن به‌قرار زیر خواهد بود:

(در تخمین اولیه، ضخامت ورق اتصال ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است).

$A=55\ \text{cm}^2 \qquad r_x=3.65\ \text{cm} \qquad r_y=5.35\ \text{cm}$

الف) کنترل کمانش

$\left(\frac{KL}{r}\right)_x=\frac{1}{2}\times\frac{657}{3.65}=90$ (حاکم است) $<6025/\sqrt{2400}=123$

$\left(\frac{KL}{r}\right)_y=\frac{2}{3}\times\frac{657}{5.35}=82$

$F_y=2400\ \text{kg/cm}^2 \rightarrow F_a=959\ \text{kg/cm}^2$ ، لاغری = ۹۰

تنش موجود در قطری:

$$f_a = \frac{0.75\times 52.5\times 10^3}{55} = 716 < 959$$

ب) کنترل ظرفیت کششی

تنش کششی مجاز برابر است با:

$$F_t = 0.6F_y = 0.6\times 2400 = 1440\ kg/cm^2$$

تنش موجود در مهاربند همان‌طور که در بند (الف)، محاسبه شد:

$f_a = 716 < 1440\ kg/cm^2$ (خوبست)

پ) طراحی جوش نبشی به‌ورق

مبحث دهم مقرر می‌دارد: «به‌جز در مورد اعضایی که تحت بارهای خستگی قرار دارند، اتصال متعادل شده برای نبشی تک نبشی دوتا دوتا و اعضای مشابه ضرورتی ندارد».

براساس توصیهٔ فوق، طرح جوش نبشی به‌ورق بر مبنای جوش نامتعادل انجام می‌گیرد:

در انتخاب اول از جوش با اندازه ساق ۷ میلی‌متر استفاده می‌شود. ظرفیت لازم برای اتصال برابر است با:

ظرفیت کششی مجاز $= 0.6\times 2400\times 55\times 10^{-3} = 79.2\ ton$

(ارزش جوش) $R_{w1} = 650\ D_1 = 650\times 0.7 = 455\ kg/cm$

طول جوش لازم برای هر نبشی برابر است با:

$$L_{w1} = \frac{79.2\times 10^3}{2\times (455)} = 87\ cm$$

دو طول ۴۴ سانتی‌متری در کنار نبشی انجام می‌شود.

ت) طراحی جوش ورق اتصال به‌تیر و ستون

(نیروی افقی مهاربند) $F_h = 79.2\times \cos 31^\circ = 67.9\ ton$

(نیروی قائم مهاربند) $F_v = 79.2\times \sin 31^\circ = 40.8\ ton$

در تخمین اول از جوش دو طرفه با اندازهٔ D_2 =۷mm استفاده می‌شود:

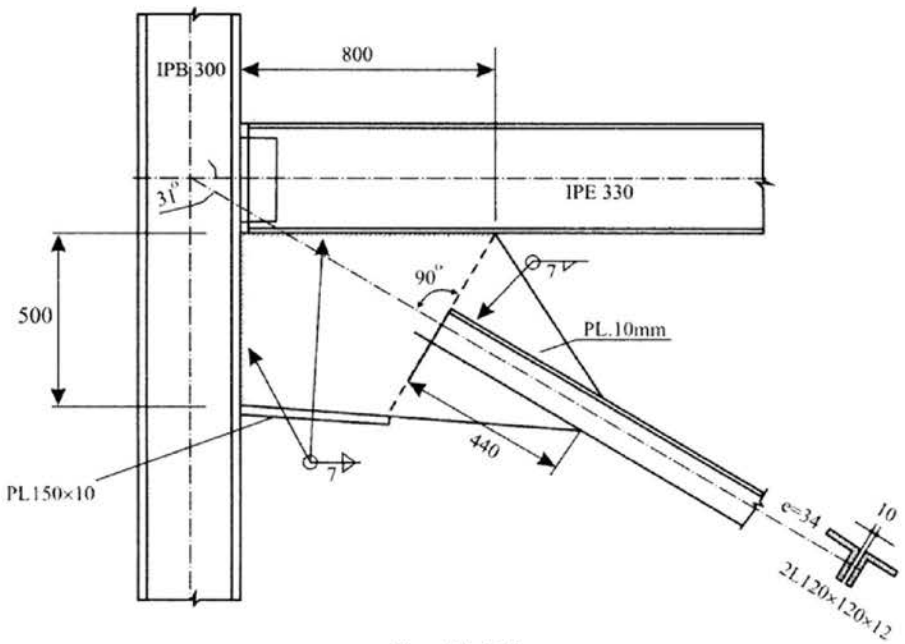
(ارزش جوش) $R_{w2} = 650D_2 = 650\times (2\times 0.7) = 910\ kg/cm$

ارزش ورق اتصال $= (0.4F_y)t = (0.4\times 2400)\times 1 = 960\ kg/cm$

(طول جوش افقی) $$L_{wh} = \frac{F_h}{R_{w2}} = \frac{67.9\times 10^3}{910} = 74.6\ cm$$

$$L_{wv} = \frac{F_v}{R_{w2}} = \frac{40.8\times10^3}{910} = 44.82 \text{ cm}$$ (طول جوش قائم)

با توجه به‌بندهای (پ) و (ت)، جزییات اتصال مانند شکل ۱۱ ـ ۷۰ در نظر گرفته می‌شود.



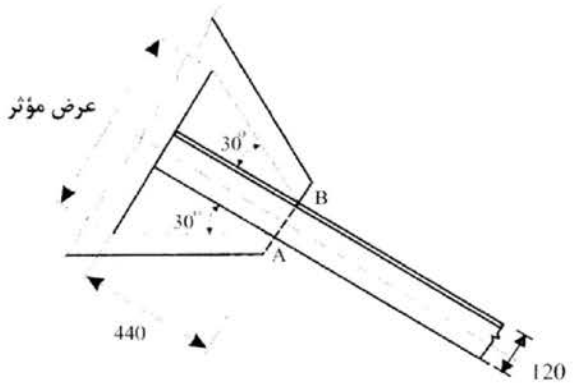
شکل ۱۱ ـ ۷۰

ث) کنترل ورق اتصال

در این روش فرض می‌شود که نیروی عضو قطری با زاویهٔ ۳۰ درجه نسبت به‌امتداد آن، در ورق توزیع می‌شود شکل (۱۱ ـ ۷۱).

عرض مؤثر در انتهای ورق $= 2(44 \tan 30^\circ) + 12 = 62.8$

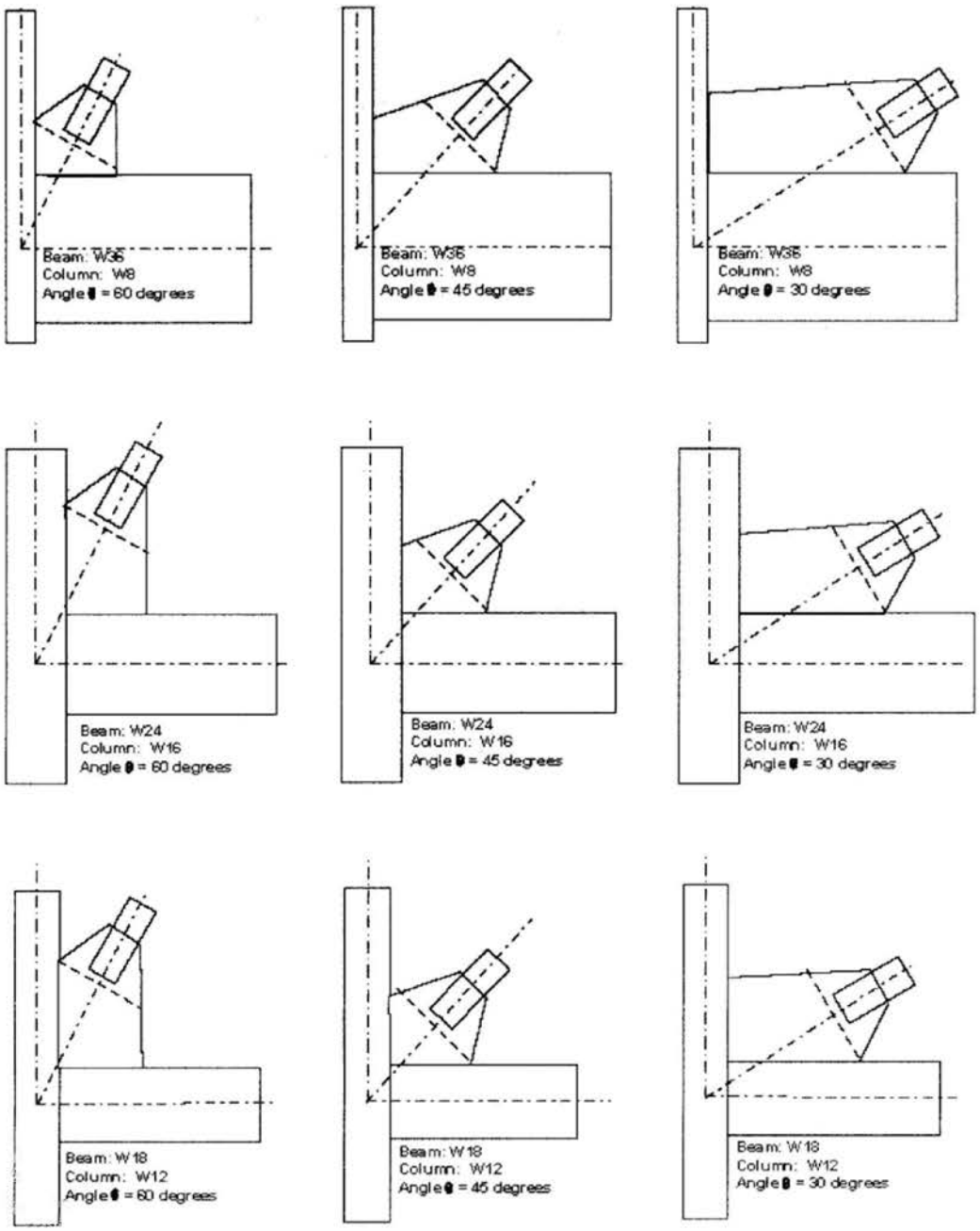
$$t = \frac{79.2\times10^3}{62.8\times1440} = 0.88 \text{ cm} \Rightarrow t = 10 \text{ mm}$$ (ضخامت ورق اتصال)



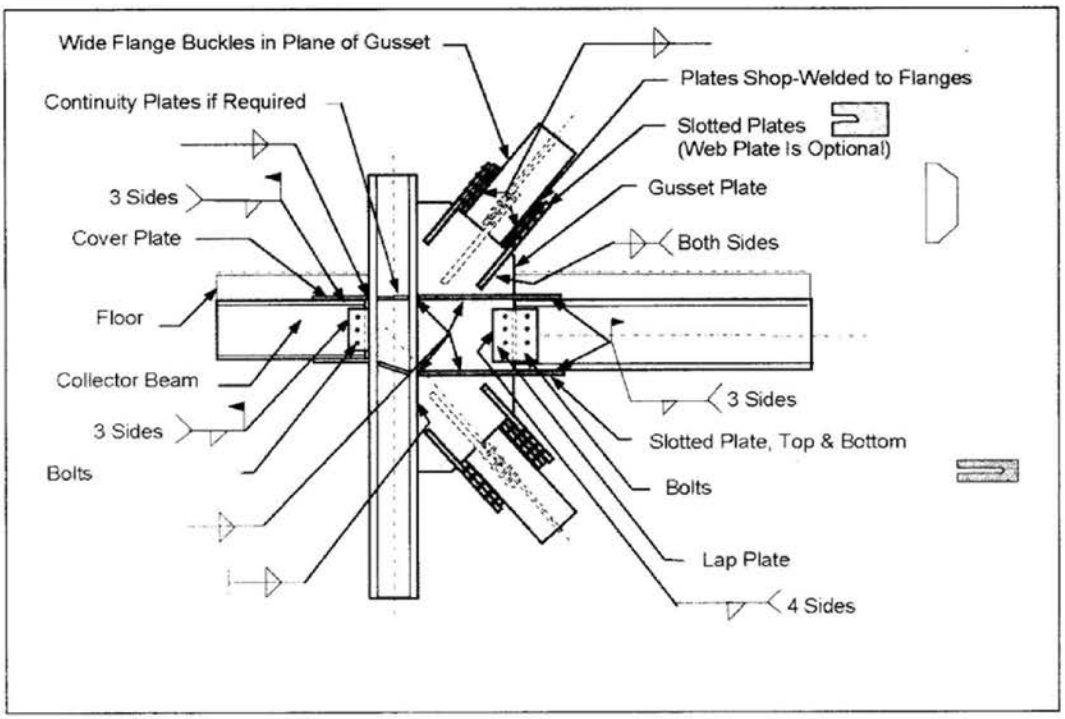
شکل ۱۱ ـ ۷۱

مثال‌هایی از اتصالات مهاربندها

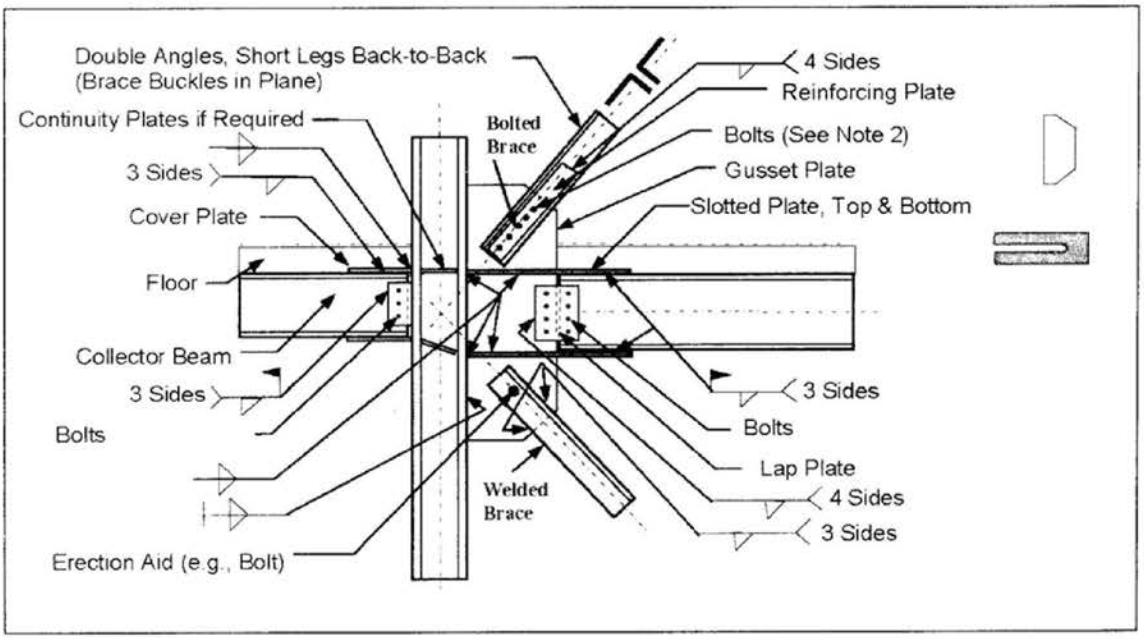
در این قسمت مثال‌های متعددی از جزییات پیشنهادی استاد آستانهٔ اصل در اتصالات مهاربندها نشان داده شده است.



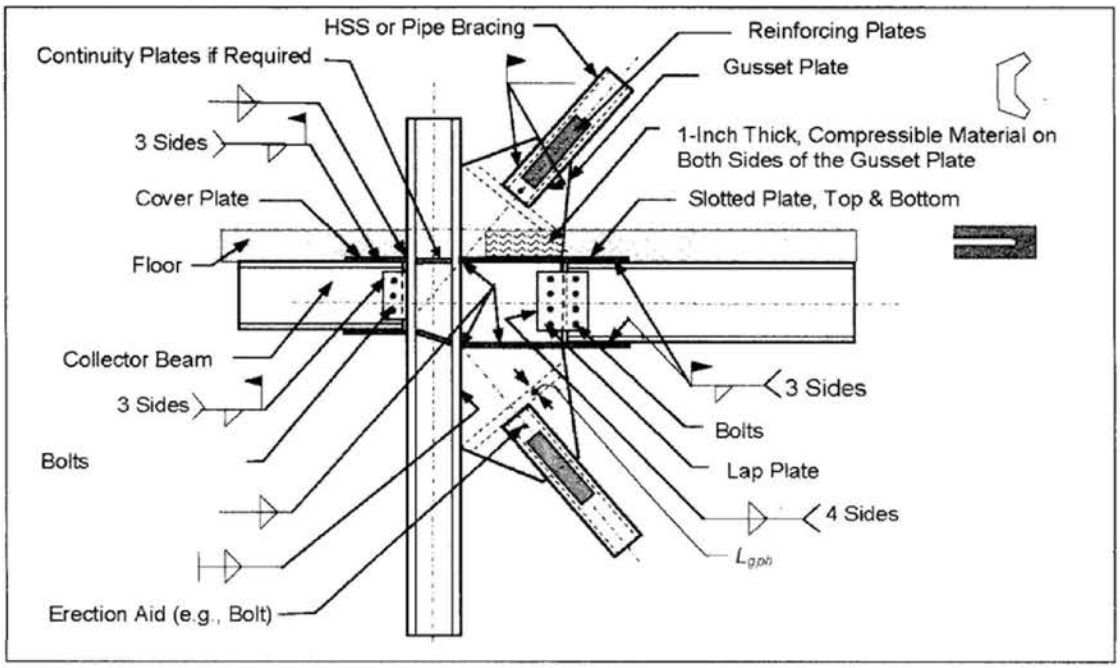
شکل ۱۱ ـ ۷۲



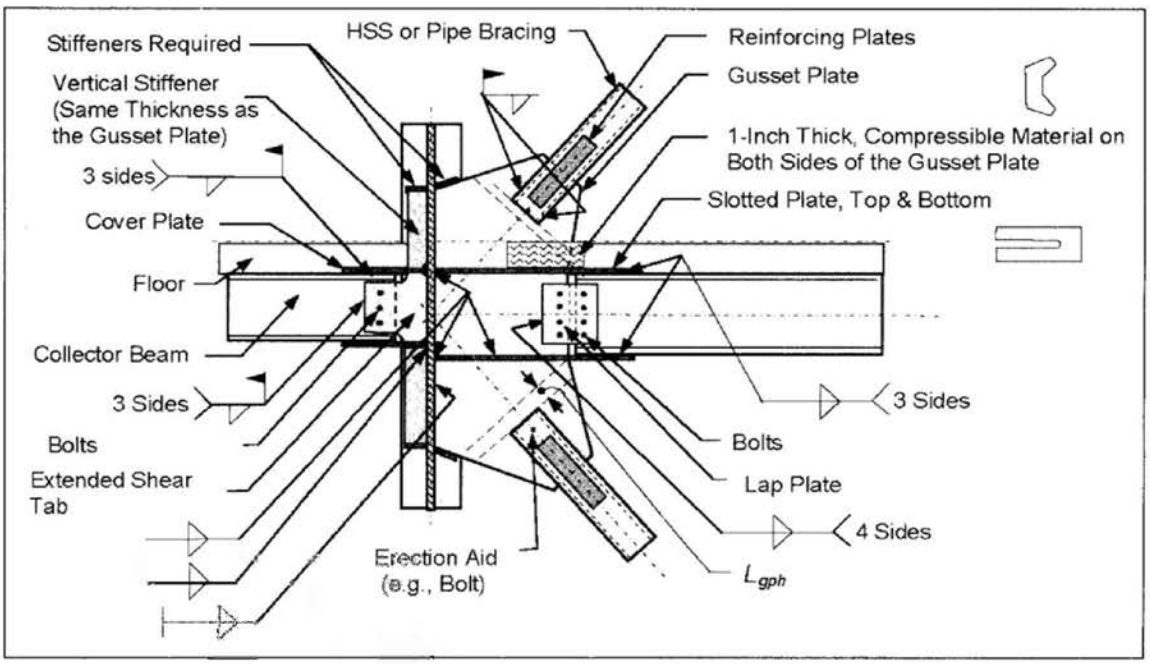
شکل ۱۱ ـ ۷۳



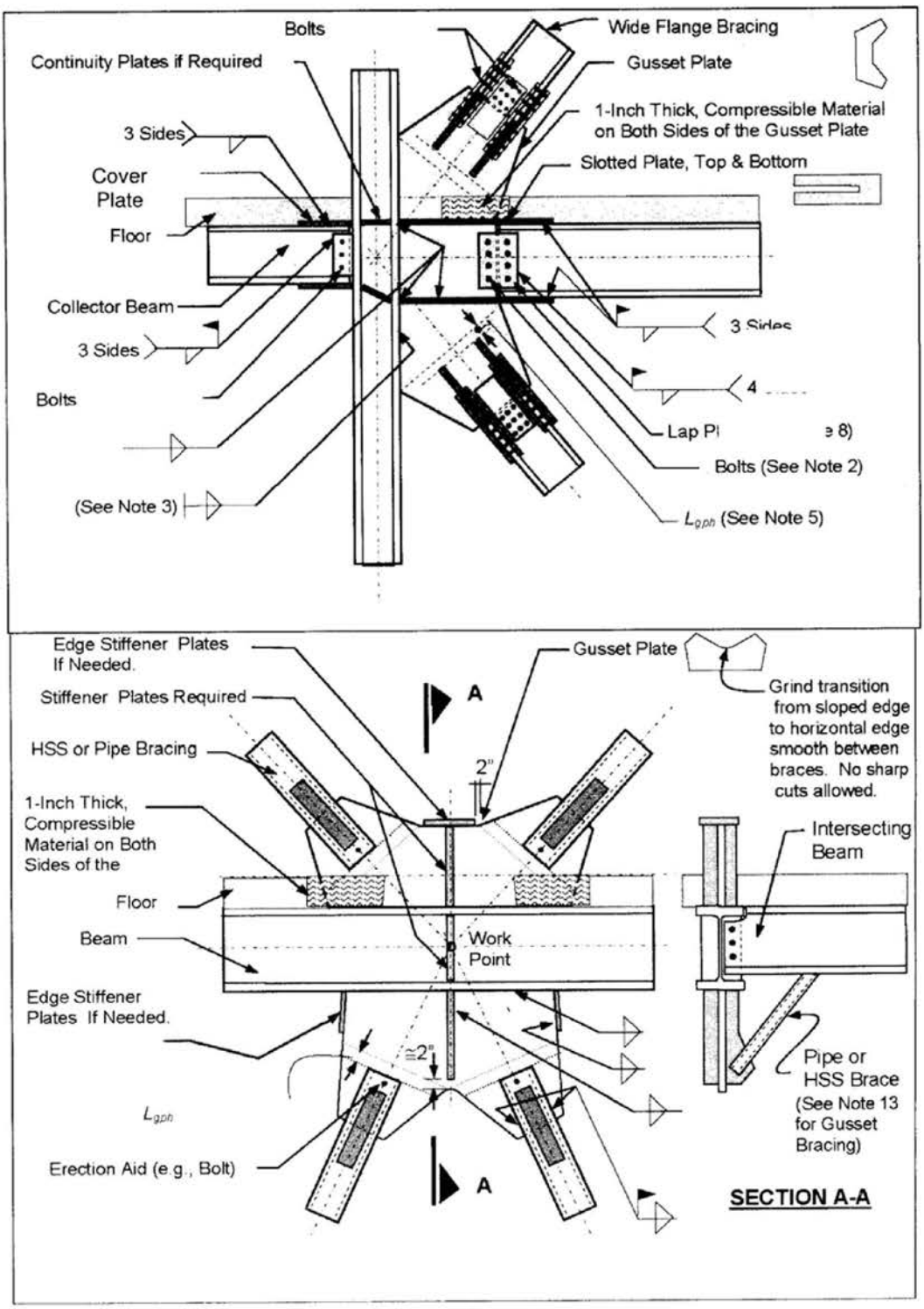
شکل ۱۱ ـ ۷۴



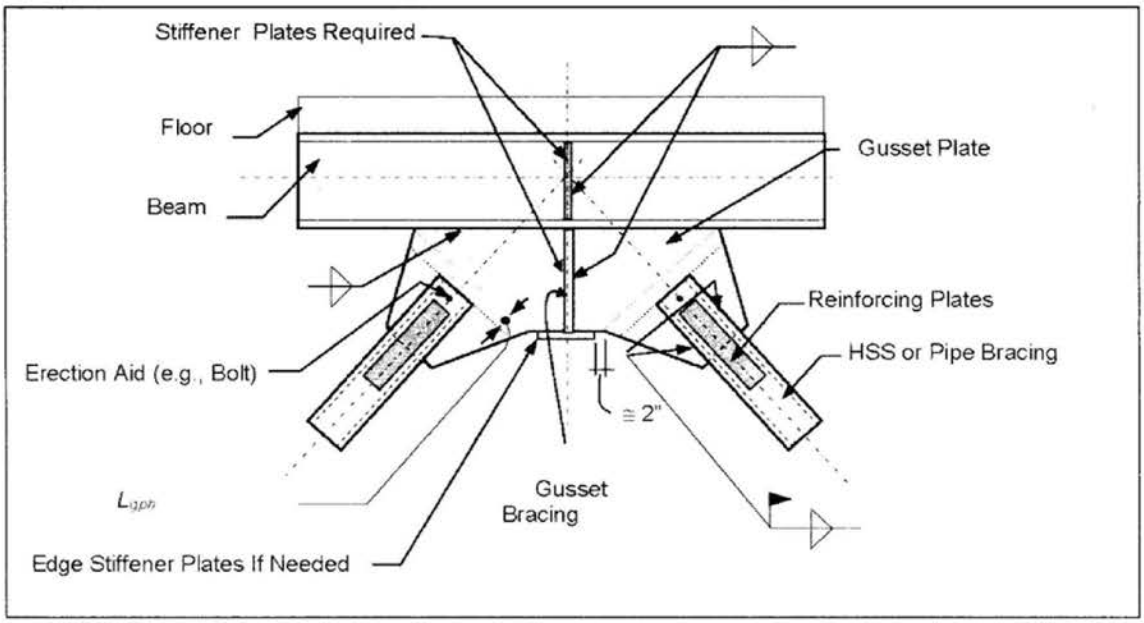
شکل ۱۱ ـ ۷۵



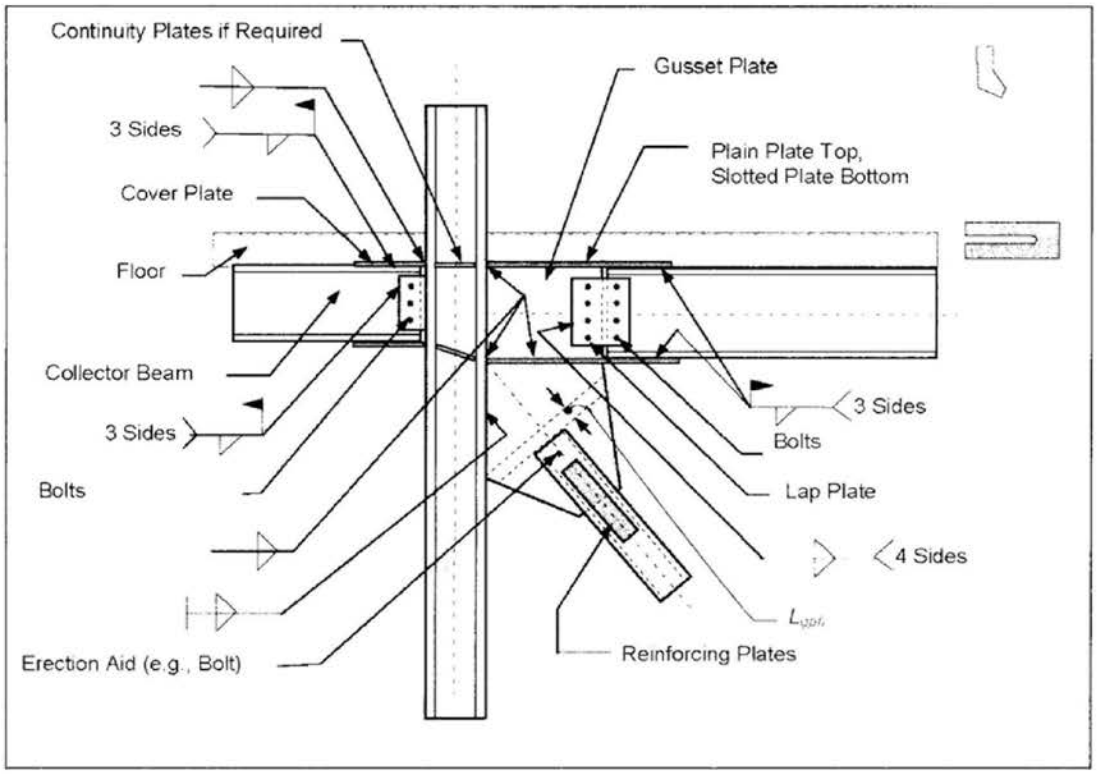
شکل ۱۱ ـ ۷۶


Bolts
Wide Flange Bracing
Continuity Plates if Required
Gusset Plate
1-Inch Thick, Compressible Material on Both Sides of the Gusset Plate
3 Sides
Slotted Plate, Top & Bottom
Cover Plate
Floor
Collector Beam
3 Sides
Bolts
(See Note 3)
3 Sides
4
Lap Pl
ɜ 8)
Bolts (See Note 2)
L_{gph} (See Note 5)
Edge Stiffener Plates If Needed.
Stiffener Plates Required
HSS or Pipe Bracing
1-Inch Thick, Compressible Material on Both Sides of the
Floor
Beam
Edge Stiffener Plates If Needed.
L_{gph}
Erection Aid (e.g., Bolt)
A
2"
≅2"
Work Point
A
Gusset Plate
Grind transition from sloped edge to horizontal edge smooth between braces. No sharp cuts allowed.
Intersecting Beam
Pipe or HSS Brace (See Note 13 for Gusset Bracing)
SECTION A-A

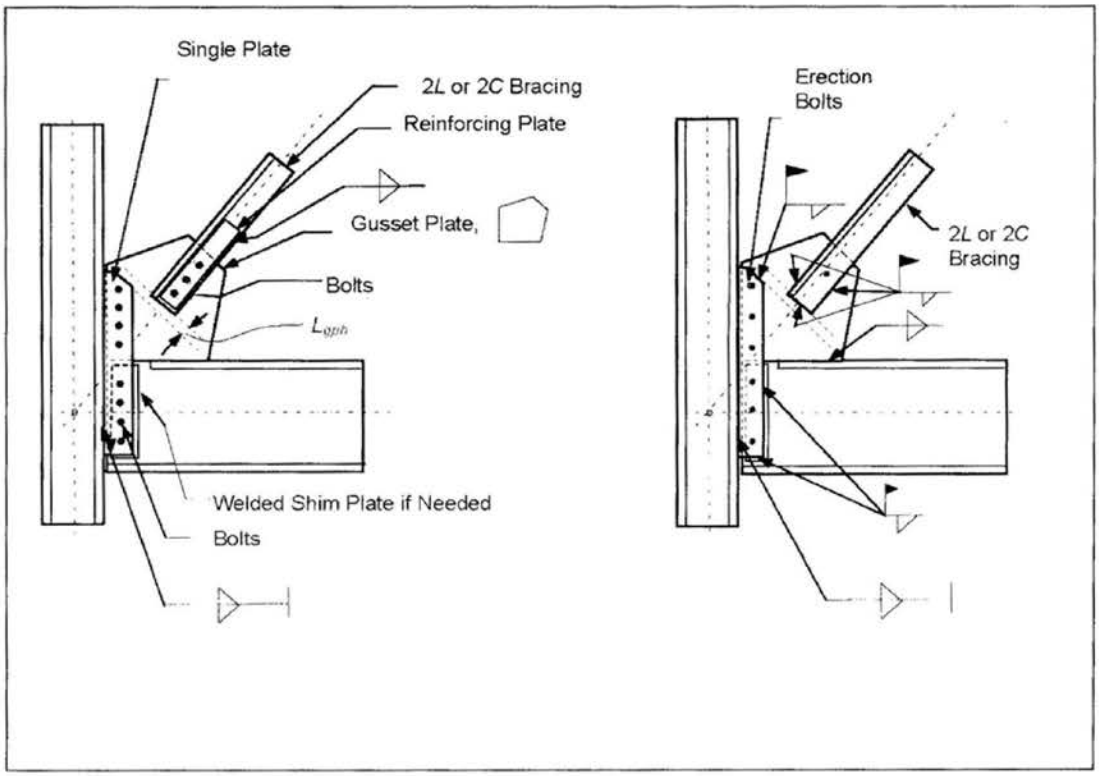
شکل ۱۱ ـ ۷۸



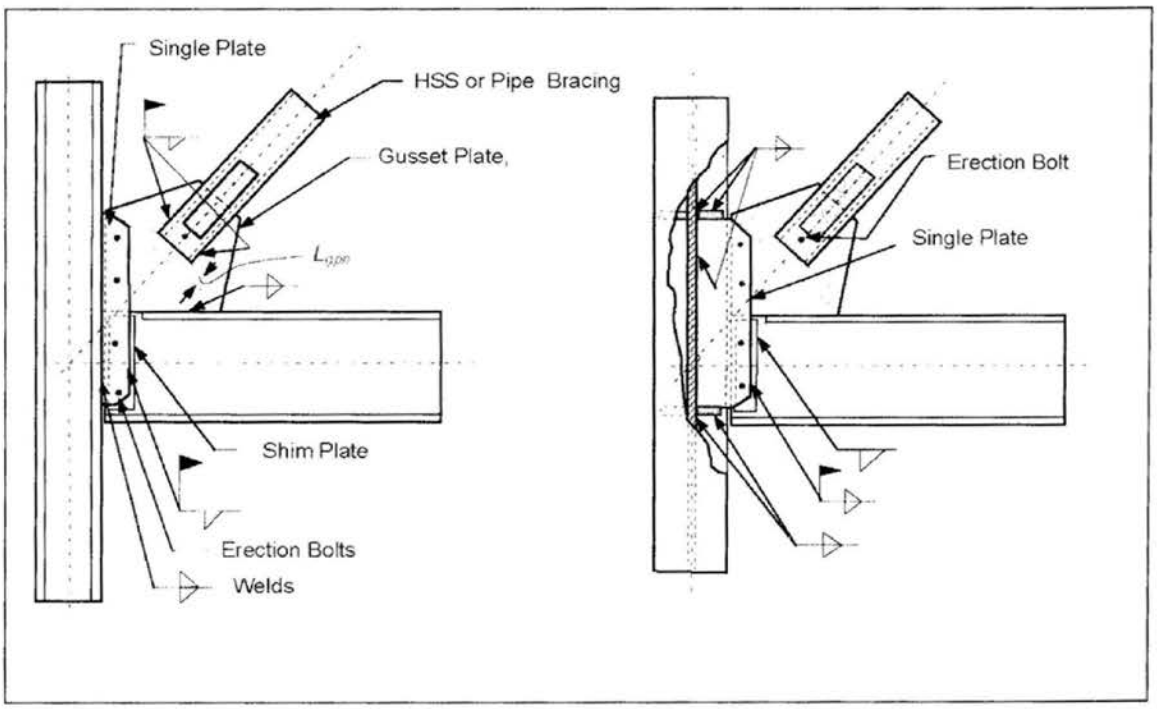
شکل ۱۱ ـ ۷۹



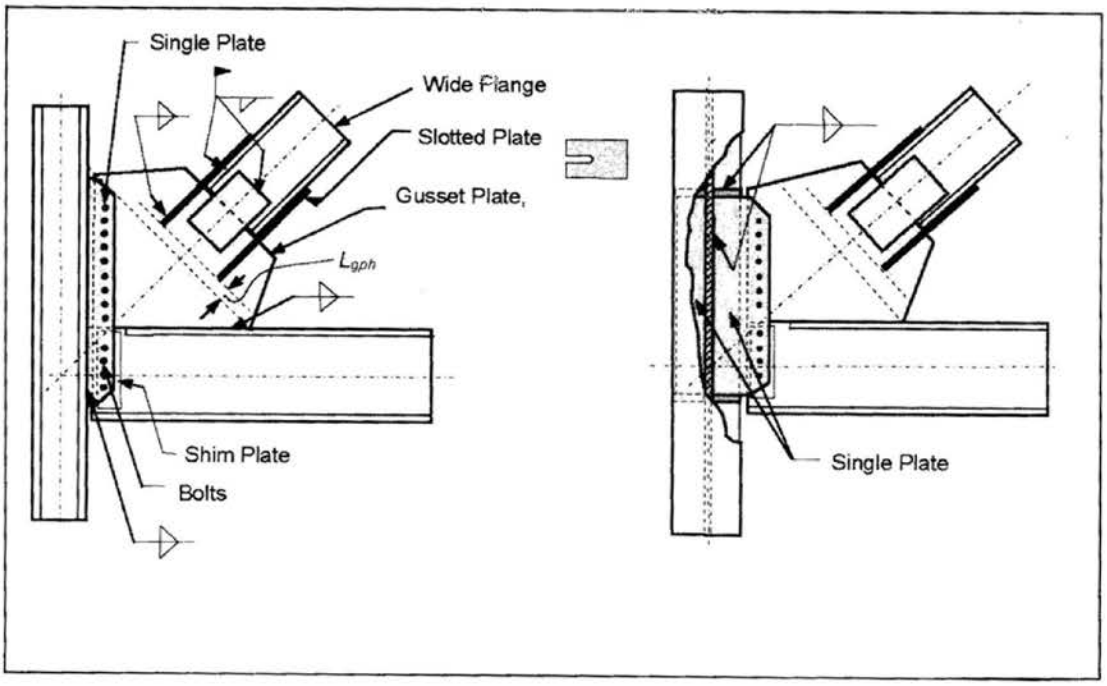
شکل ۱۱ ـ ۸۰



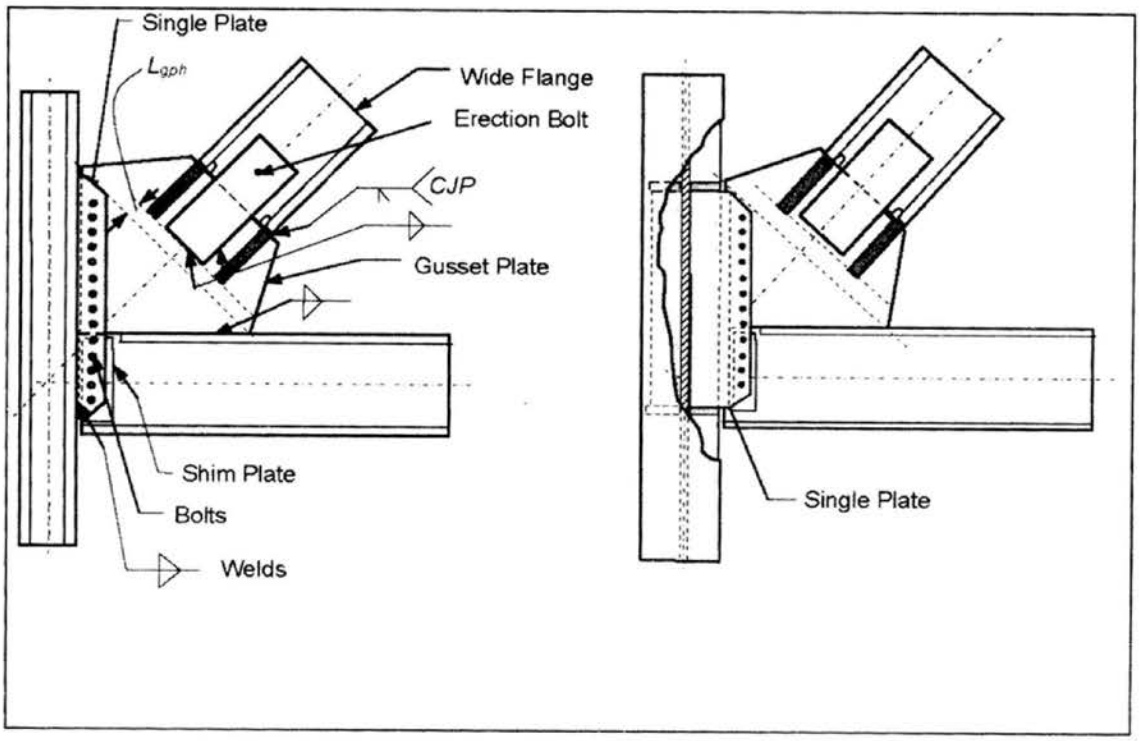
شکل ۱۱ ـ ۸۱



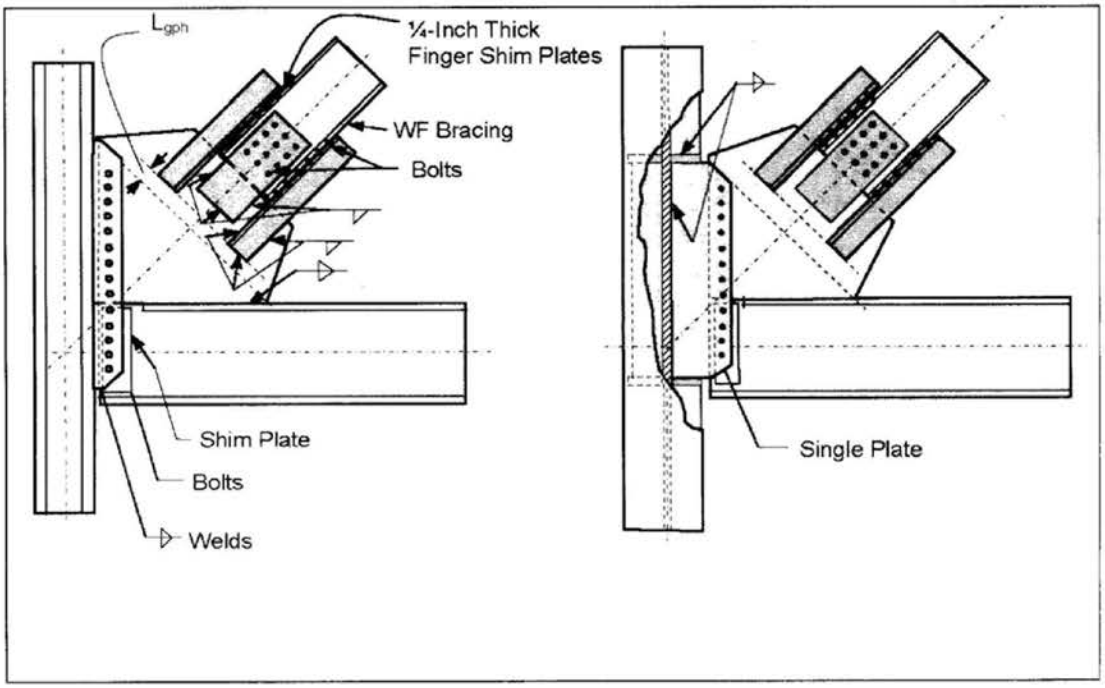
شکل ۱۱ ـ ۸۲



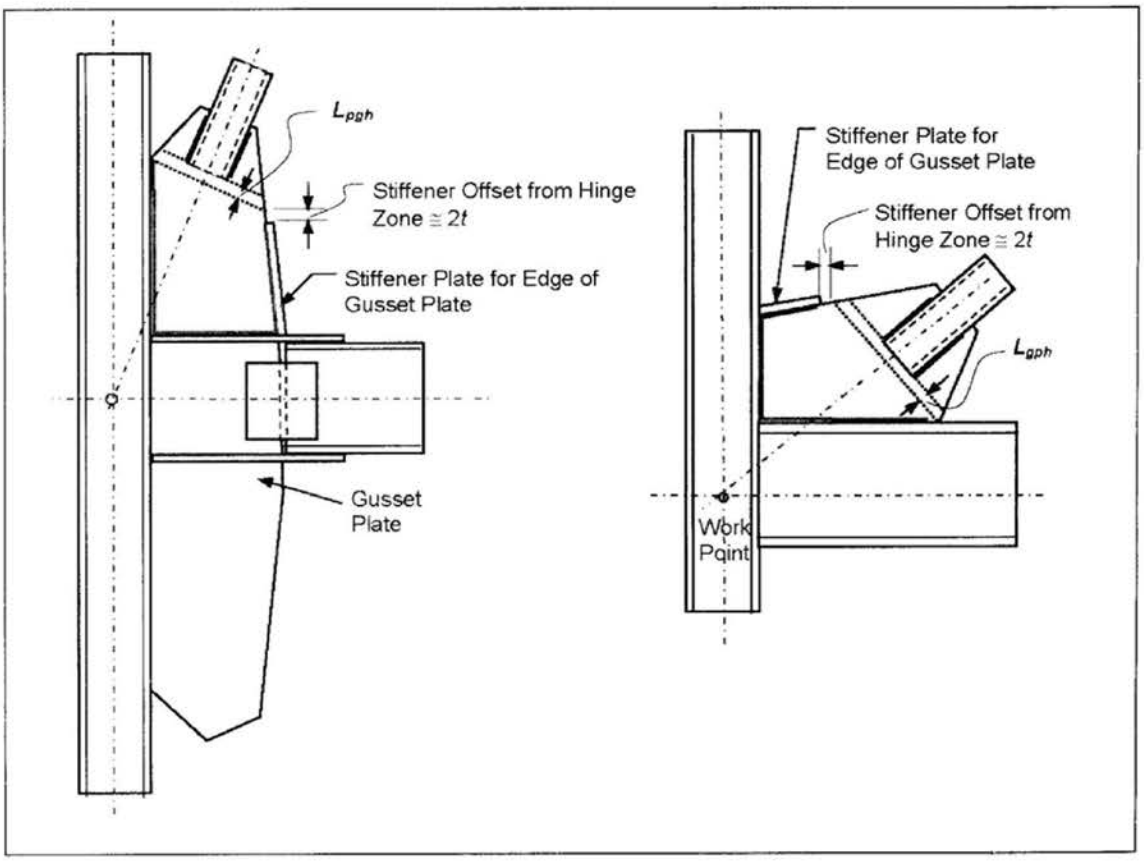
شکل ۱۱ ـ ۸۳



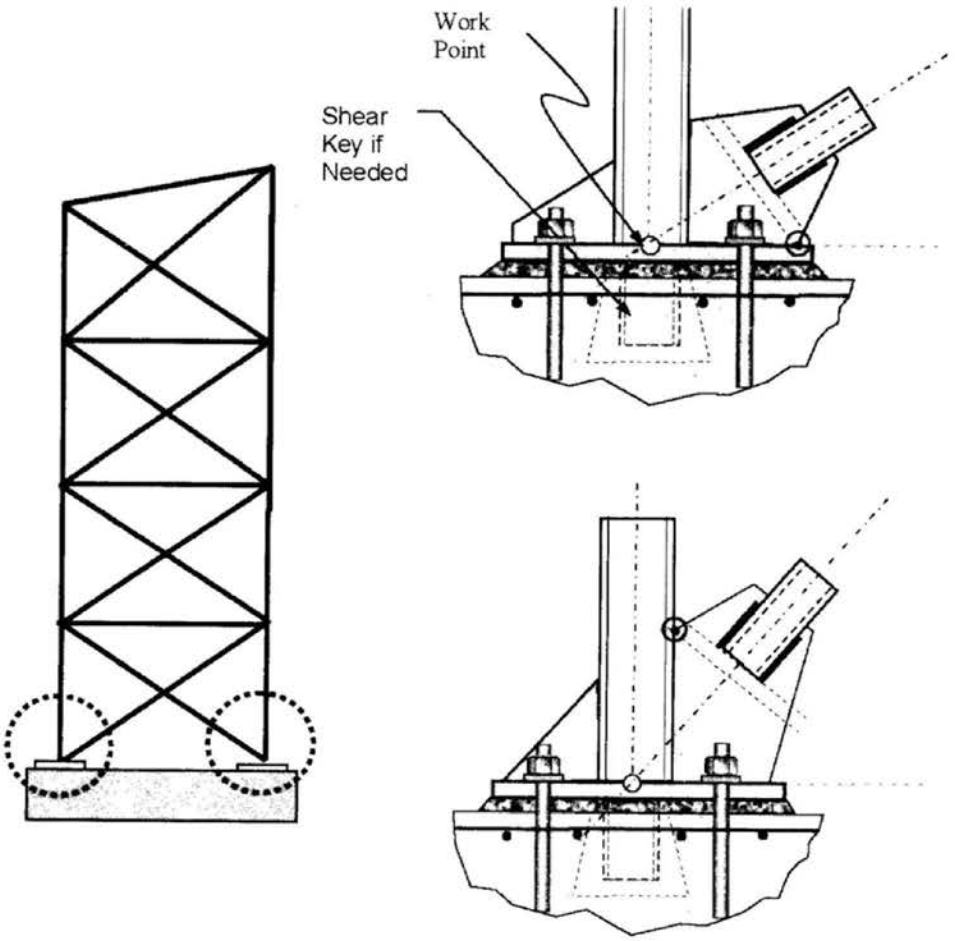
شکل ۱۱ ـ ۸۴



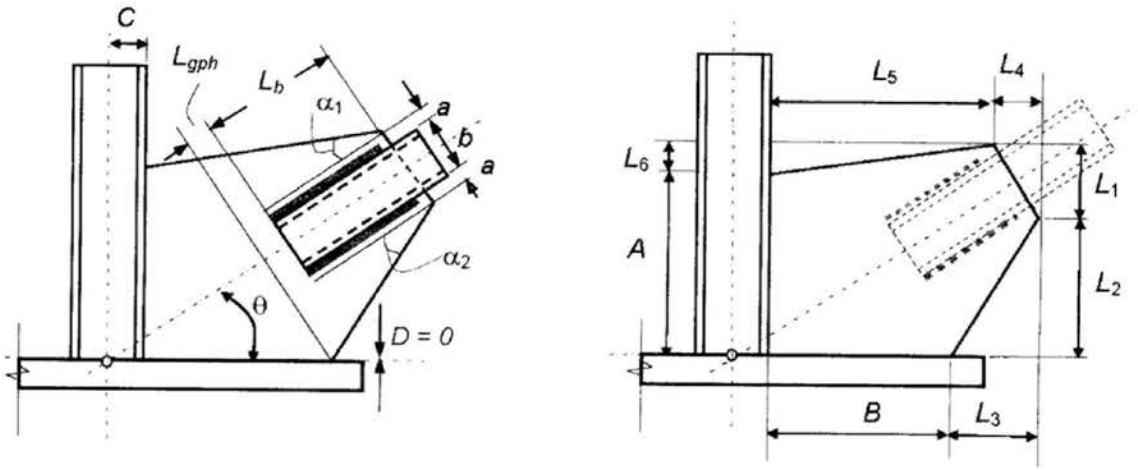
شکل ۱۱ ـ ۸۵



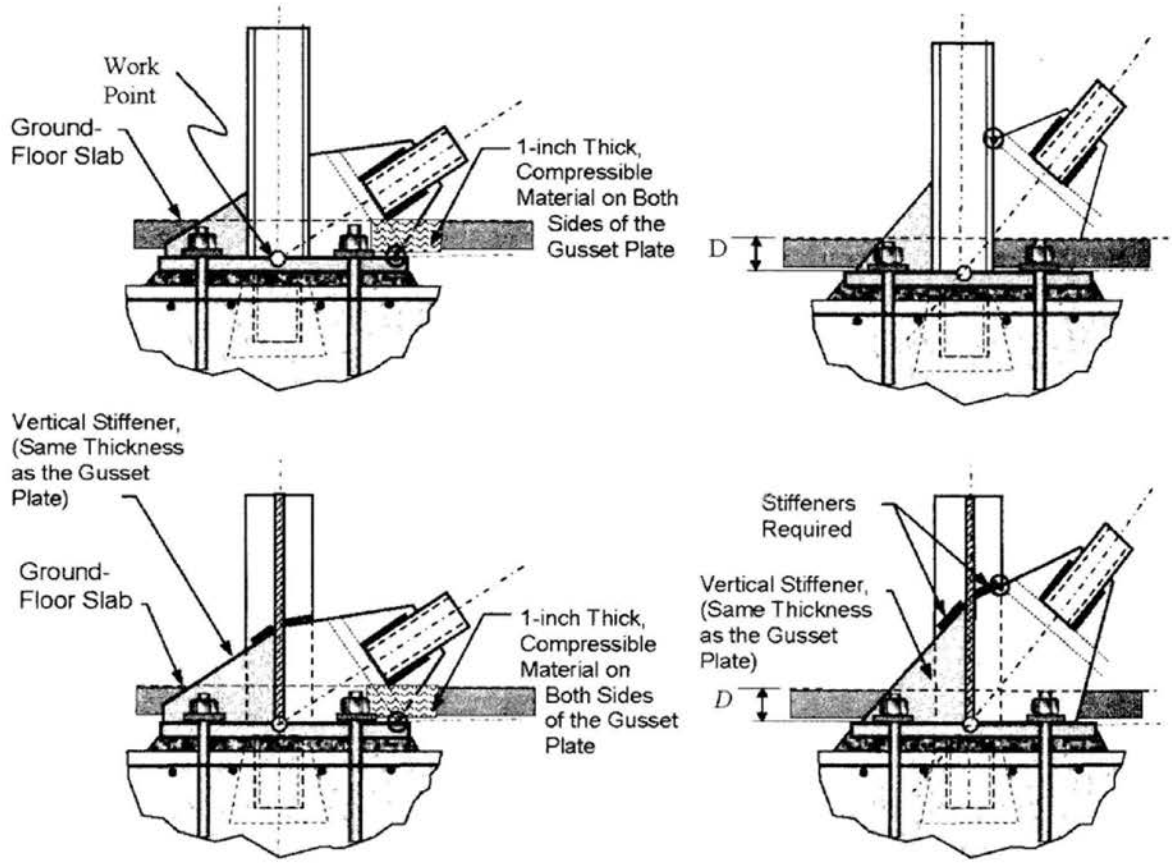
شکل ۱۱ ـ ۸۶



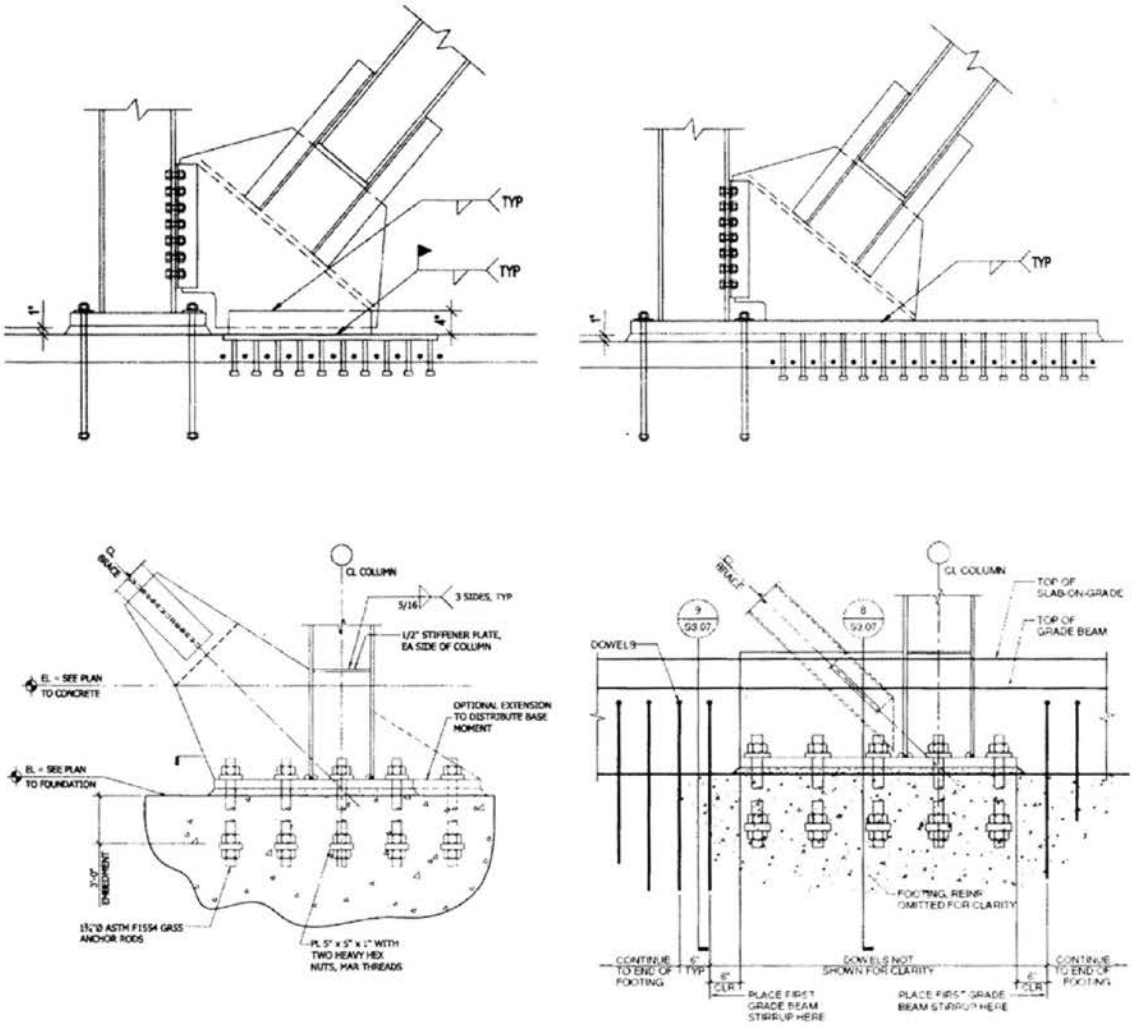
شکل ۱۱ ـ ۸۷ جزییات ورق پای ستون.



شکل ۱۱ ـ ۸۸ جزییات ورق پای ستون.



شکل ۱۱ ـ ۸۹ جزییات ورق پای ستون.



شکل ۱۱ ـ ۹۰

۱۱ ـ ۹ اتصالات پای ستون (کف ستون)

۱۱ ـ ۹ ـ ۱ مقدمه

در طراحی اتصال پای ستون دو شرط اصلی زیر باید تأمین گردد:

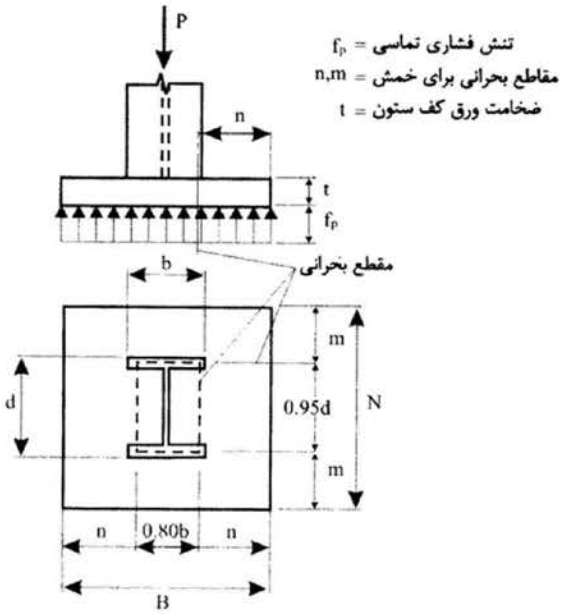
الف) نیروی فشاری موجود در بال‌ها و جان ستون طوری باید توسط ورق پای ستون در شالوده گسترش پیدا کند که تنش فشاری تماسی از مقادیر مجاز توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها کمتر شود.

ب) ورق پای ستون و ستون کاملاً به‌بتن شالوده مهار گردند.

۱۱ ـ ۹ ـ ۲ ورق پای ستون که تحت تأثیر بار محوری تنها قرار دارند

شکل ۱۱ ـ ۹۱ نشان‌دهندهٔ هندسه و پارامترهای مورد استفاده در طراحی ورق کف ستون می‌باشد.

فرض می‌شود که توزیع تنش در زیر کف ستون یکنواخت باشد و قسمت‌های بیرون‌زدهٔ ورق از مقاطع بحرانی، همانند تیرهای طره‌ای عمل نمایند.



شکل ۱۱ ـ ۹۱ ابعاد ورق پای ستون.

لنگر خمشی در دهانه‌های طره‌ای m و n به‌ترتیب برابر است با:

برای دهانهٔ طره‌ای به‌طول n (۱۱ ـ ۶۳)

$$M = \frac{f_p N n^2}{2}$$

برای دهانهٔ طره‌ای به‌طول m (۱۱ ـ ۶۴)

$$M = \frac{f_p B m^2}{2}$$

با داشتن لنگرهای فوق، تنش خمشی در ورق برابر است با:

(۱۱ ـ ۶۵)

$$f = \frac{M}{S} = \frac{(f_p N n^2)/2}{(N t^2)/6} = \frac{3 f_p n^2}{t^2}$$

و

(۱۱ ـ ۶۶)

$$f = \frac{3 f_p m^2}{t^2}$$

بزرگترین مقادیر به‌دست آمده از روابط ۱۱ ـ ۶۵ و ۱۱ ـ ۶۶ حاکم بر طرح است.

آیین‌نامه تنش خمشی مجاز را برای ورق پای ستون مساوی $0/75F_y$ توصیه می‌کند. بنابراین ضخامت لازم را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$f = \frac{3f_p m^2}{t^2} \le 0.75\,F_y \qquad (۶۷ - ۱۱)$$

$$t = 2m\sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \qquad \text{یا} \qquad t = 2n\sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \qquad (۶۸ - ۱۱ - \text{الف})$$

اگر بخواهیم ضخامت را براساس لنگر واحد عرض طراحی نماییم، خواهیم داشت:

$$0.75F_y = \frac{M}{1\times\frac{t^2}{6}} \quad \rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{6M}{0.75F_y}} \qquad (۶۸ - ۱۱ - \text{ب})$$

مثال ۱۱ ـ ۱۶

مطلوب است طراحی کف ستون برای ستونی از نیمرخ IPB360 که باری معادل ۲۲۵ تن ناشی از بار مرده و زنده را تحمل می‌نماید. فولاد ستون و ورق پای ستون از نوع نرمه با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. تنش فشاری مجاز بین ورق پای ستون و شالوده را ۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر بگیرید.

حل:

مشخصات IPB360 بر حسب سانتی‌متر:

$$D = 36 \quad , \quad b = 30 \quad , \quad t_w = 1.25 \quad , \quad t_f = 2.25$$

اغلب طراحان ترجیح می‌دهند که ورق پای ستون را به‌عوض بارهای وارد بر ستون، برای ظرفیت کامل ستون طراحی نمایند. در این صورت اتصال ضعیف‌ترین جزء نخواهد بود.

البته تعیین ظرفیت باربری مجاز ستون باید بر پایهٔ ملاحظات کمانشی آن صورت پذیرد. در این مثال، ورق پای ستون برای بار موجود طراحی خواهد شد.

الف) تعیین ابعاد ورق کف ستون

$$\text{لازم} \quad A = \frac{P}{F_p} = \frac{225(10)^3}{(70)} = 3215\ \text{cm}^2$$

از نظر کاهش ریسک اشتباه اجرایی، ابعاد باید نزدیک به‌مربع باشد. البته بعضی‌از طراحان عقیده دارند که برای مساوی شدن m و n بهتر است که ابعاد ورق کف ستون (یعنی B و N) متناسب با ابعاد خارجی ستون باشد.

$$0.80b = 0.8(30) = 24 \text{ cm}$$
$$0.95d = 0.95(36) = 34.2 \text{ cm}$$
$$n = 0.5(B - 0.80b) = 0.5(B - 24)$$
$$m = 0.5(N - 0.95d) = 0.5(N - 34.2)$$

با فرض m= n داریم:

$$0.5(B - 24) = 0.5(N - 34.2)$$
$$B = N - 10.2$$
$$B \times N = 3215$$
$$(N - 10.2)N = 3215$$
$$N^2 - 10.20N - 3215 = 0$$
$$N = 62.03 \text{ cm}$$
$$B = 62.03 - 10.2 = 51.83 \text{ cm}$$

انتخاب می‌کنیم:

$$N = 60 \quad , \quad B = 50 \text{ cm}$$

$A = 60(50) = 3000 \text{ cm}^2$ قابل قبول است

موجود $n = 0.5(50 - 24) = 13 \text{ cm}$

$m = 0.5(60 - 34.2) = 12.9 \text{ cm}$

موجود $f_P = \dfrac{225(10)^3}{60 \times 50} = 75$ قابل قبول است

لازم $t = 2n\sqrt{\dfrac{f_p}{F_y}} = 2(13)\sqrt{\dfrac{75}{2400}} = 4.59 \text{ cm}$

بنابراین از ورق ۴۵×۵۰۰×۶۰۰ میلی‌متر استفاده نماییم.

۱۱ـ۹ـ۳ تنش مجاز فشار تماسی بین ورق پای ستون و شالودهٔ بتنی

طبق مفاد مبحث دهم، تنش مجاز فشار تماسی بین ورق پای ستون و شالوده بتنی برابر است با:

$$F_P = 0.3f_c\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 0.6f_c \qquad (۱۱ - ۶۹)$$

که در آن:

f_c= مقاومت مشخصهٔ فشاری بتن بر روی نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد

A_1= سطح ورق زیرستون در تماس با شالوده

A_2= حداکثر سطحی از شالوده، هم‌مرکز و متشابه با ورق کف ستون

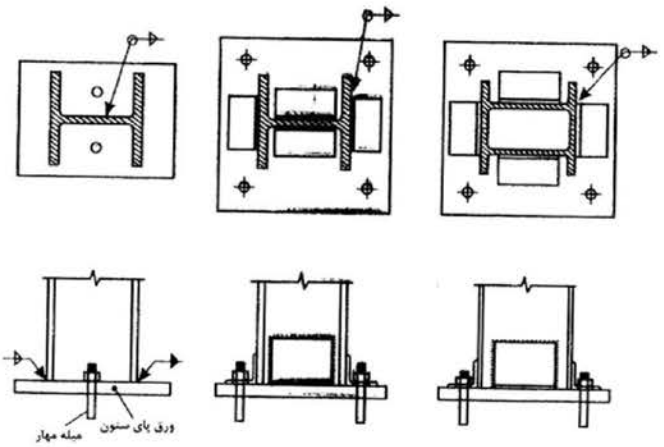
۱۱ ـ ۹ ـ ۴ اتصال ورق پای ستون به‌شالوده در ستون‌ها با بار محوری

ورق پای ستون توسط ۲ تا ۶ پیچ مهاری (معمولاً چهار پیچ در چهار گوشهٔ آن) به‌شالودهٔ بتنی مهار می‌شود (شکل ۱۱ ـ ۹۲). در صورت مفصلی بودن پای ستون، هیچ نیرویی به‌این مهارها وارد نمی‌شود. فقط در هنگام نصب ستون ممکن است بر این پیچ‌ها نیرو وارد گردد که این مسئله نباید از طرف مهندس محاسب نادیده گرفته شود. در ساختمان‌های معمولی قطر این پیچ‌ها حدود ۱۸ تا ۲۴ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و با افزایش اهمیت ساختمان، قطرهای بزرگتری به‌کار می‌رود.

۱۱ ـ ۹ ـ ۵ اتصال ستون به‌ورق پای ستون

در اتصال مفصلی پای ستون، فقط نیروی محوری از ستون به‌ورق پای ستون منتقل می‌شود. در شکل ۱۱ ـ ۹۲ چند نمونه از جزییات اتصال سادهٔ ستون به‌ورق پای ستون نشان داده شده است.

انتهای ستون که با ورق پای ستون در تماس است، باید به‌صورت گونیا بریده شده و سنگ زده شود تا در تماس کامل با ورق پای ستون قرار بگیرد. در چنین حالتی اکثر نیروی محوری توسط فشار تماسی منتقل می‌شود و نبشی‌ها و یا جوش فقط عمل نگهداری و انتقال نیروی برشی را بر عهده می‌گیرند. در صورتی که انتهای ستون سنگ زده نشود، جوش و نبشی‌های اتصال باید بتوانند صد در صد نیروی محوری را انتقال دهند.



شکل ۱۱ ـ ۹۲

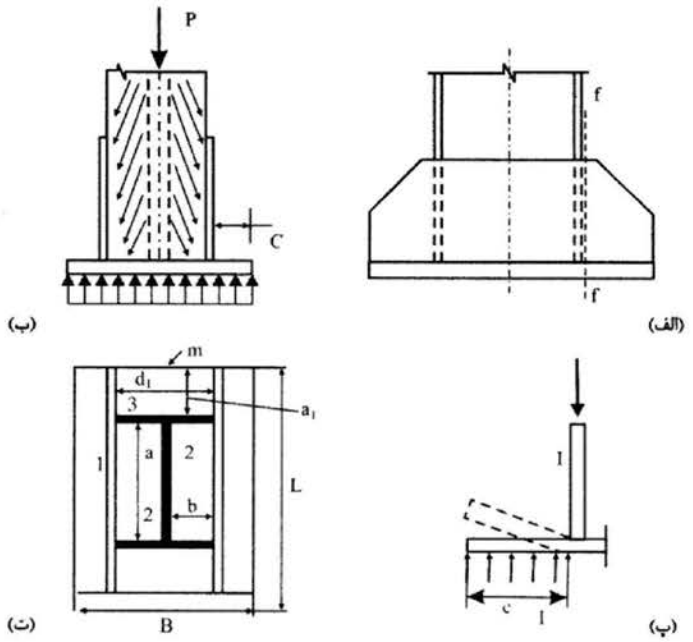
۱۱ ـ ۹ ـ ۶ استفاده از ورق‌های سخت‌کننده در اتصال پای ستون

گاهی مواقع به‌منظور کم کردن ضخامت ورق پای ستون، از ورق‌های سخت‌کنندهٔ مثلثی یا ذوزنقه‌ای در اتصال پای ستون استفاده می‌شود. در شکل ۱۱ ـ ۹۳ نمونه‌ای از این نوع اتصال پای ستون نشان داده شده است. در طراحی، سه ناحیهٔ متمایز در ورق پای ستون دیده می‌شود که نحوهٔ محاسبهٔ هر ناحیه را در زیر شرح می‌دهیم:

در ناحیهٔ ۱ ورق پای ستون همانند یک تیر طره‌ای عمل می‌نماید.

لنگر حداکثر بر واحد طول صفحه در این ناحیه برابر است با:

$$M = \frac{f_p c^2}{2} \qquad (۷۰ ـ ۱۱)$$



شکل ۱۱ ـ ۹۳

ناحیهٔ ۲ همانند ورقی می‌ماند که در چهار طرف تکیه دارد و تحت فشار یکنواخت f_p می‌باشد. لنگر حداکثر چنین ورقی که در وسط دهانه قرار دارد، از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$M_a = \alpha_1 f_p b^2$$

$$M_b = \alpha_2 f_p b^2 \qquad (۷۱ ـ ۱۱)$$

که در روابط فوق:

M_a = لنگر برای نواری به‌عرض ۱ سانتی‌متر به‌موازات ضلع a

M_b = لنگر برای نواری به‌عرض ۱ سانتی‌متر به‌موازات ضلع b

b = طول ضلع کوچکتر ناحیهٔ ۲ به‌سانتی‌متر

f_p = فشار یکنواخت وارد بر ورق پای ستون بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

α_2 و α_1 = ضرایبی که برحسب نسبت ضلع بزرگتر به‌ضلع کوچکتر (a/b) از جدول ۱۱ ـ ۱ به‌دست می‌آیند.

بزرگترین مقادیر M_a و M_b حاکم بر طرح می‌باشد. در صورتی که چهار طرف ورق گیردار فرض گردد، می‌توان لنگرهای به‌دست آمده از رابطهٔ ۱۱ ـ ۷۱ را ۲۰ درصد کاهش داد.

ناحیهٔ ۳ همانند ورقی می‌باشد که در سه طرف تکیه دارد و در یک طرف آزاد است. نقطهٔ بحرانی در چنین ورقی، وسط لبهٔ آزاد می‌باشد (نقطهٔ m در شکل ۱۱ ـ ۹۳). لنگر مربوط به‌نقطهٔ m از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$M_3 = \alpha_3 f_p d_1^2 \qquad (۷۲ ـ ۱۱)$$

α_3 = ضریبی که بر حسب نسبت a_1/d_1 از جدول ۱۱ ـ ۱ به‌دست می‌آید.

d_1 = طول لبهٔ آزاد ورق

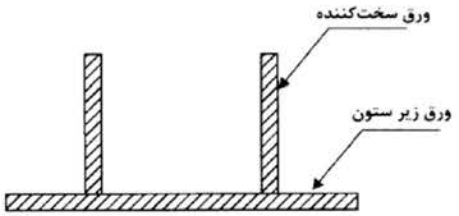
اگر نسبت a_1/d_1 کوچکتر از ۰/۵ باشد، ورق همانند تیر طره‌ای تحلیل می‌گردد.

ضخامت ورق پای ستون که برای تمام مناطق ثابت اختیار می‌گردد، براساس بزرگترین لنگر به‌دست آمده از روابط ۱۱ ـ ۷۰، ۱۱ ـ ۷۱ و ۱۱ ـ ۷۲ طراحی می‌شود.

جدول ۱۱ ـ ۱

ورق در هر چهار طرف تکیه دارد	ضرایب	نسبت a/b										
		۱	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱/۷	۱/۸	۱/۹	۲	بالای ۲
	α_1	۰/۰۴۸	۰/۰۵۵	۰/۰۶۳	۰/۰۶۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۱	۰/۰۸۶	۰/۰۹۱	۰/۰۹۴	۰/۰۹۸	۰/۱۰۰	۰/۱۲۵
	α_2	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۴۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۷	۰/۰۴۶	۰/۰۳۷
ورق در سه طرف تکیه دارد		نسبت a_1/d_1											
	α_3	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱	۱/۲	۱/۴	۲	بالای ۲		
		۰/۰۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۸	۰/۰۹۷	۰/۱۰۷	۰/۱۱۲	۰/۱۲۰	۰/۱۲۶	۰/۱۳۲	۰/۱۳۳		

پس از تعیین ضخامت ورق، باید کل مقطع ورق به‌علاوه سخت‌کننده‌ها در مقطعی نظیر f-f (شکل ۱۱ـ۹۳ـ الف) در مقابل لنگر خمشی ناحیهٔ طره‌ای کنترل گردد. مقطع f-f همانند شکل ۱۱ ـ ۹۴ می‌باشد. در هنگام استفاده از سخت‌کننده‌های پای ستون باید دقت شود که کاهش ضخامت ورق پای ستون، جبران اضافه وزن ناشی از وجود سخت‌کننده‌ها را بنماید.



شکل ۱۱ ـ ۹۴ مقطع f-f.

مثال ۱۱ ـ ۱۷

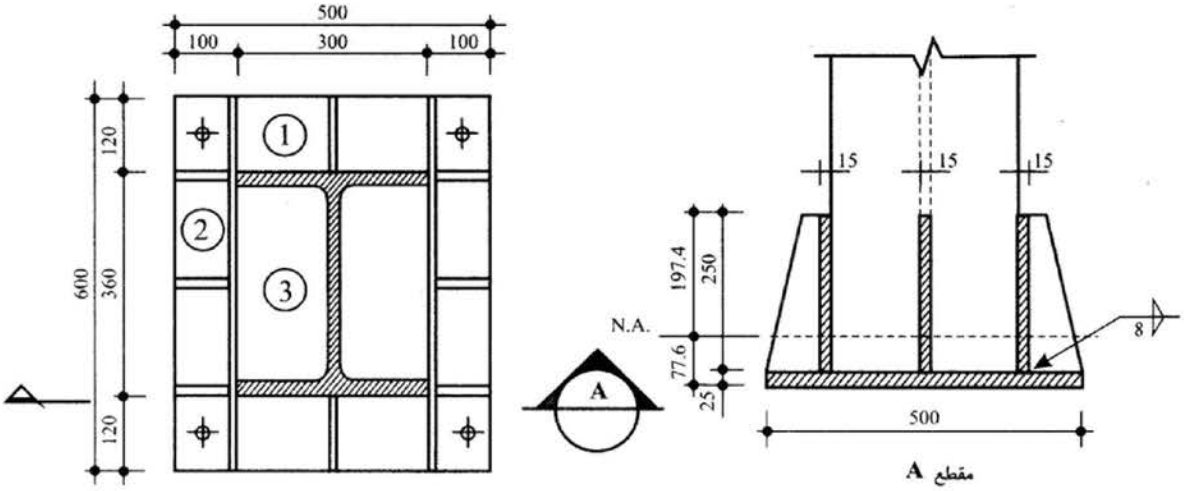
در مثال ۱۱ ـ ۱۶ با استفاده از ورق سخت‌کننده، ضخامت ورق کف ستون را کاهش دهید.

حل:

با توجه به‌مثال ۱۱ ـ ۳ تنش زیر کف ستون $f_p = 75\ kg/cm^2$ می‌باشد. اکنون لنگر در سه ناحیهٔ ۱ و ۲ و ۳ تعیین می‌گردد.

ناحیهٔ ۱ (ورق سه طرف تکیه‌دار)

$$a_1 = 12cm \qquad d_1 = 15cm$$
$$a_1/d_1 = 12/15 = 0.8 \quad \rightarrow \quad \alpha_3 = 0.097$$
$$M_3 = 0.097 \times 75 \times 15^2 = 1637\ kg.cm/cm$$



شکل ۱۱ ـ ۹۵

ناحیهٔ ۲ (ورق سه طرف تکیه‌دار)

$a_1 = 10\,cm \qquad d_1 = 18\,cm$

$a_1 / d_1 = 10/18 = 0.56 \quad \rightarrow \quad \alpha_3 = 0.068$

$M_3 = 0.068 \times 75 \times 18^2 = 1652\ kg.cm/cm$

ناحیه ۳ (ورق چهار طرف تکیه‌دار)

$$a = 36 - 2.25 \times 2 = 31.5 \qquad b = 15 - \frac{1.25}{2} = 14.37$$

$$a/b = \frac{31.5}{14.37} = 2.19 > 2$$

$\alpha_1 = 0.125 \qquad \alpha_2 = 0.037$

$M_a = 0.125 \times 75 \times 14.37^2 = 1936\ kg.cm/cm$

$M_b = 0.037 \times 75 \times 14.37^2 = 573\ kg.cm/cm$

حداکثر لنگر موجود ۱۹۳۶ kg.cm/cm می‌باشد. ضخامت لازم به‌دست می‌آید:

$$f = \frac{M}{S} \quad , \quad F = 0.75F_y$$

$$S = \frac{M}{0.75F_y} \quad \rightarrow \quad \frac{t^2}{6} = \frac{M}{0.75F_y} \quad \rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{6M}{0.75F_y}}$$

$$t = \sqrt{\frac{6 \times 1936}{0.75 \times 2400}} = 2.54\,cm \quad \rightarrow \quad t = 25\,mm \qquad \text{انتخاب}$$

ضخامت ورق کف ستون از ۴۵ میلی‌متر به۲۵ میلی‌متر کاهش یافته است. اکنون با فرض ضخامت ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر برای سخت‌کننده‌ها، مقطع A-A کنترل می گردد.

$$\bar{X} = \frac{50\times 2.5^2/2 + 3\times 25\times 1.5\times 15}{50\times 2.5 + 3\times 25\times 1.5} = 7.76 \text{ cm}$$

$$I = 50\times\frac{2.5^3}{12} + 50\times 2.5(7.76-1.25)^2 + 3\times 1.5\times 25^3/12 + 3\times 25\times 1.5\times 7.24^2 = 17119 \text{ cm}^4$$

$$S_t = 867 \text{ cm}^3 \qquad S_b = 2206 \text{ cm}^3$$

$$M = 50\times 75\times 12^2/2 = 270000 \text{ kg.cm}$$

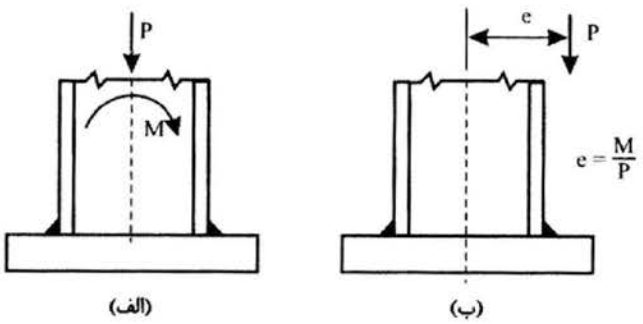
$$f = 27\times 10^4/867 = 311 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{خوبست}$$

۱۱ ـ ۹ ـ ۷ اتصالات پای ستون که تحمل لنگر خمشی می‌نمایند

اغلب پیش می‌آید که اتصالات پای ستون، علاوه‌بر نیروی محوری، لنگر خمشی هم تحمل می‌کنند. برای فهم دقیق‌تر موضوع، این مسئله را در دو قسمت تحت مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم، انتقال نیرو از ستون به‌ورق پای ستون و انتقال نیرو از ورق پای ستون به‌شالوده.

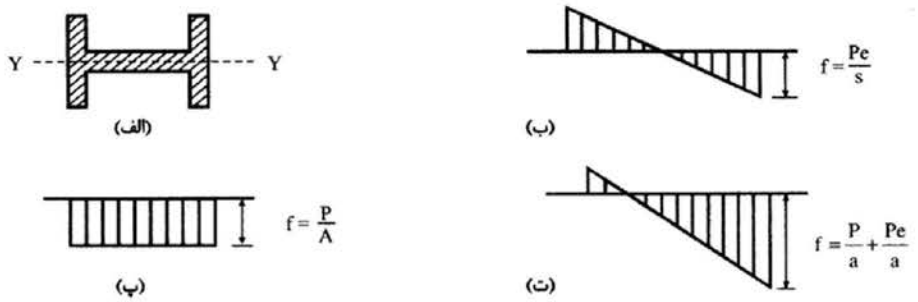
۱۱ ـ ۹ ـ ۷ ـ ۱ انتقال نیرو از ستون به‌ورق پای ستون

هر گاه به‌انتهای ستون ترکیب نیروی محوری فشاری P و لنگر خمشی M وارد آید، بهتر است که اثر آنها را به‌صورت یک نیروی فشاری تنها با برون‌محوری e نمایش دهیم (شکل ۱۱ ـ ۹۶).



شکل ۱۱ ـ ۹۶

بدون توجه به‌طرز نمایش نیروها، در این حالت مقطع ستون تحت دوسری تنش قرار خواهد داشت، یکی تنش حاصل از نیروی محوری فشاری (شکل ۱۱ ـ ۹۷ ـ پ) و دیگری تنش حاصل از اثر لنگر خمشی (شکل ۱۱ـ ۹۷ـ ب)، ترکیب این دو تنش در شکل ۱۱ ـ ۹۷ ـ ت نشان داده شده است.

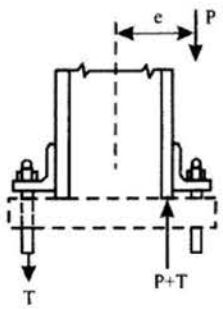


شکل ۱۱ ـ ۹۷

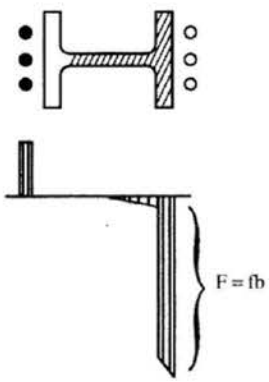
حال اگر تنش‌ها را در پهنای بال و ضخامت جان (به‌ترتیب در ناحیهٔ بال و جان) ضرب کنیم، گسترش نیرویی همانند شکل ۱۱ ـ ۹۸ به‌دست می‌آید که این نیروها به‌ورق پای ستون منتقل خواهد شد. این حالت در صورتی است که فرض کنیم ستون مستقیماً به‌صفحهٔ زیر ستون جوش شده است.

شکل ۱۱ ـ ۹۸

حال اگر همانند شکل ۱۱ ـ ۹۹ ستون به‌ورق پای ستون جوش نشود و به‌وسیلهٔ میلهٔ مهاری نگه داشته شده باشد (همان‌طور که از شکل پیداست، در این حالت نیروی فشاری توسط تنش فشاری تماسی بین بال و ورق پای ستون حمل می‌شود و نیروی کششی حاصل از لنگر توسط میلهٔ مهاری که از سوراخ ورق پای ستون عبور کرده و در شالوده مهار شده است، حمل می‌گردد). وضعیت گسترش تنش بین ستون و ورق پای ستون فرق می‌کند. گسترش تنش در این حالت بدین صورت خواهد بود که نیروهای کششی را میلهٔ مهار و نیروهای فشاری را بال ستون تحمل خواهد کرد (شکل ۱۱ ـ ۱۰۰).



شکل ۱۱ ـ ۹۹



شکل ۱۱ ـ ۱۰۰

۱۱ ـ ۹ ـ ۷ ـ ۲ انتقال نیرو از ورق پای ستون به‌شالوده

رفتار ورق پای ستون در این حالت بسیار شبیه به‌رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت تأثیر نیروی محوری و لنگر خمشی می‌باشد.

نیروی محوری فشاری تولید تنش فشاری تماسی بین ورق پای ستون و سطح تماس شالوده می‌نماید. با تأثیر لنگر خمشی، تنش فشاری در ناحیهٔ کششی لنگر کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار لنگر خمشی، این تنش به‌صفر می‌رسد و با افزایش بیشتر لنگر خمشی، بین ورق پای ستون و شالوده جدایی حاصل می‌شود و در این حالت است که پیچ‌های مهاری اتصال پای ستون تحت تأثیر نیروی کششی قرار می‌گیرند تا از بلند شدن ورق پای ستون جلوگیری نمایند. در ناحیهٔ فشار لنگر خمشی، همواره تنش فشاری خواهیم داشت که مقدار آن در تار انتهایی فشاری، حداکثر است.

از مقاومت مصالح می‌دانیم که تنش ترکیبی ناشی از نیروی محوری و لنگر خمشی در یک محیط همگن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{S} \qquad (۷۳ ـ ۱۱)$$

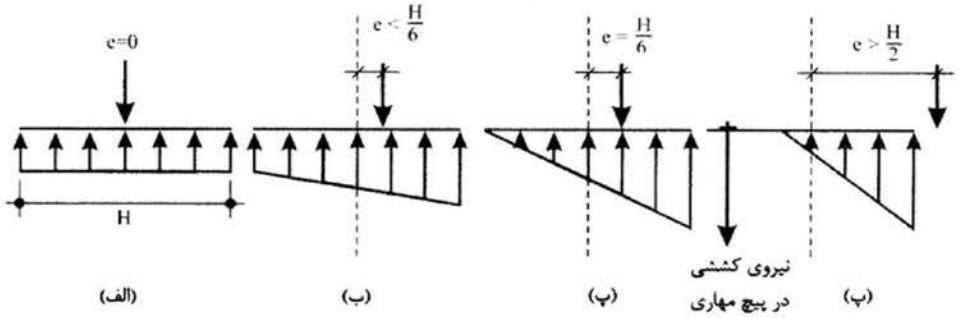
که در آن:

P = نیروی فشاری وارد بر مقطع

A = مساحت سطح تماس

M = لنگر خمشی

S = اساس مقطع سطح تماس



شکل ۱۱ ـ ۱۰۱

در حالتی که سطح تماس به‌صورت مربع مستطیل با ارتفاع H در جهت لنگر خمشی باشد، داریم:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{6M}{HA} \qquad (۷۴ ـ ۱۱)$$

با تعریف برون‌محوری $e = \frac{M}{P}$ رابطهٔ فوق به‌صورت زیر در می‌آید:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{6pe}{HA} = \frac{P}{A}\left(1 \pm \frac{6e}{H}\right) \qquad (۷۵ ـ ۱۱)$$

اگر عبارت داخل پرانتز بزرگتر از صفر باشد، در این‌صورت هیچ‌گونه جدایی بین ورق پای‌ستون و شالوده ایجاد نمی‌گردد و پیچ‌های مهاری تحت‌کشش قرار نمی‌گیرد و در سطح تماس تماماً فشار خواهیم داشت (شکل ۱۱ ـ ۱۰۱ـ ب). شرط فوق را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$1-\frac{6e}{H}\geq 0 \quad \rightarrow \quad e\leq\frac{H}{6} \qquad (۷۶ - ۱۱)$$

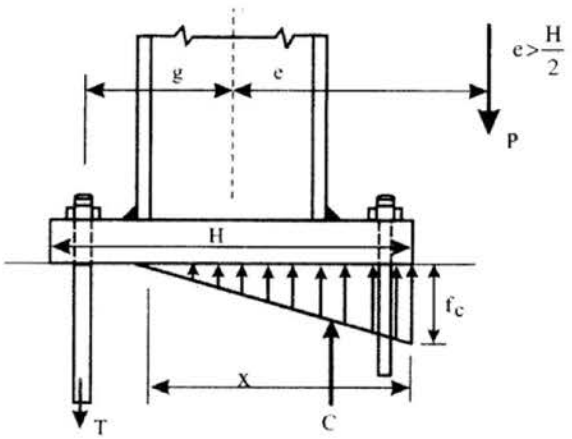
در این حالت محاسبات مربوط به‌تخمین ضخامت ورق پای ستون، مشابه حالت نیروی محوری تنهاست و در هنگام محاسبه به‌طور محافظه‌کارانه فرض می‌شود که تنش حداکثر به‌طور یکنواخت در کل سطح تماس توزیع شده است. در این صورت پیچ‌های مهاری تحت هیچ‌گونه کششی قرار ندارند و همانند گذشته، قطر آنها به‌طور اسمی طراحی می‌شود.

۱۱ ـ ۹ ـ ۷ ـ ۳ محاسبه اتصال ستون در حالت $e>\frac{H}{6}$

وقتی که مقدار e از $\frac{H}{6}$ تجاوز نماید، عبارت داخل پرانتز در رابطهٔ ۱۱ ـ ۷۵ منفی می‌شود و بین سطح تماس ورق و شالوده جدایی رخ می‌دهد. در صورتی که e بزرگتر از $\frac{H}{6}$ ولی کوچکتر از $\frac{H}{2}$ باشد، با وجود جدایی، پیچ‌ها به‌کشش نمی‌افتند و ارتفاع تار خنثی و تنش فشاری حداکثر در بتن از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$x=3\left(\frac{H}{2}-e\right) \quad \rightarrow \quad f_c=2P/(xB) \qquad (۷۷ - ۱۱)$$

در صورتی که $e>\frac{H}{2}$ باشد، در پیچ‌های مهاری کشش ایجاد می‌شود (شکل ۱۱ ـ ۱۰۲). در این حالت چون سطح تماس دیگر یک محیط همگن نیست، رابطهٔ ۱۱ ـ ۷۵ اعتبار خود را از دست می‌دهد و برای پیدا کردن نیروی کششی در پیچ‌های مهاری و تنش فشاری حداکثر باید متوسل به‌شیوه‌هایی شد که در طراحی ستون‌های بتن مسلح تحت برون‌محوری بزرگ از آنها استفاده می‌شود. در شکل ۱۱ ـ ۱۰۲ توزیع تنش‌ها در این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۱ ـ ۱۰۲

با فرض رفتار الاستیک و اعمال معادلات تعادل ایستایی و شرایط سازگاری تغییرشکل‌ها، ارتفاع تار خنثی، یعنی X از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$X^3 + K_1X^2 + K_2X + K_3 = 0 \qquad (۷۸ - ۱۱)$$

که در آن:

$$K_1 = 3\left(e - \frac{H}{2}\right)$$

$$K_2 = \frac{6nA_s}{B}(g + e)$$

$$K_3 = -K_2\left(\frac{H}{2} + g\right)$$

$$\text{نیروی کششی} \quad T = -P\left[\frac{\frac{H}{2} - \frac{X}{3} - e}{\frac{H}{2} - \frac{X}{3} + g}\right]$$

تمام پارامترها در شکل نشان داده شده‌اند، غیر از B که پهنای ورق پای ستون (در امتداد عمود بر H) و A_s که سطح پیچ‌های مهاری کششی می‌باشد. n نیز نسبت ضرایب الاستیسیتهٔ فولاد به بتن است، که مساوی ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. تذکر دو نکته در مورد رابطهٔ ۱۱ ـ ۷۸ ضروری می‌باشد.

اول اینکه حل معادلهٔ درجه ۳ بهتر است به‌صورت عددی انجام بگیرد*. دوم اینکه در هنگام استفاده از این معادله باید مقادیر H، B و A_s معلوم باشند که تخمین صحیح آنها به‌تجربهٔ مهندس محاسب واگذار می‌شود. پس از تعیین مقدار X، مقادیر نیروی کششی T در پیچ‌های مهاری و f_c (تنش فشاری حداکثر در بتن) با استفاده از معادلات تعادل استاتیک به‌دست می‌آیند.

۱۱ ـ ۹ ـ ۷ ـ ۴ روش تقریبی

مطالعهٔ شکل‌های ۱۱ ـ ۹۸، ۱۱ ـ ۹۹ و ۱۱ ـ ۱۰۰ نشان می‌دهد که برآیند نیروی فشاری منتقل شده از ستون به‌ورق پای ستون، تقریباً در مرکز سطح بال فشاری قرار دارد. بنابراین در صورتی که ورق پای ستون کاملاً صلب نباشد، می‌توان انتظار داشت که برآیند نیروهای فشاری بین ورق پای ستون و شالوده در زیر بال فشاری قرار داشته باشد (شکل ۱۱ ـ ۱۰۳). با قبول این فرض و نیز فرض مثلثی بودن توزیع تنش‌های فشاری، مقدار X سه برابر فاصلهٔ مرکز ثقل بال ستون تا لبهٔ آزاد ورق پای ستون خواهد شد. با داشتن X، مقادیر نیروی کششی پیچ‌های مهاری و تنش

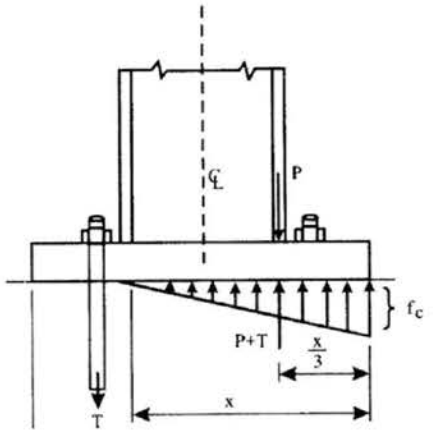
---

* یک روش حل عددی معادلهٔ سه مجهولی، روش نیوتن با استفاده از رابطهٔ زیر می‌باشد:

$$X_{r+1} = X_r - \frac{f(X_r)}{f'(X_r)}$$

که در آن f تابع نشان‌دهندهٔ معادلهٔ درجهٔ ۳ و f' مشتق آن است.

فشاری f_c، از استاتیک به‌دست می‌آید. تذکر این نکته ضروری است که وقتی ستون همانند شکل ۱۱ ـ ۹۹ بدون استفاده از جوش، فقط توسط پیچ‌های مهاری نگه داشته شده باشد، استاتیک مسئله ایجاب می‌کند که برآیند نیروهای فشاری بین ورق پای ستون و شالوده، حتماً در زیر مرکز ثقل بال فشاری قرار داشته باشد و در این حالت تنها فرض تقریبی مسئله، توزیع مثلثی تنش فشاری می‌باشد که ممکن است در واقعیت چنین نباشد.



شکل ۱۱ ـ ۱۰۳

مثال ۱۱ ـ ۱۸

جزییات پای ستون نشان داده شده در شکل ۱۱ ـ ۱۰۴ ـ الف، از جزییات بسیار مناسب و متداول برای اثر توأم نیروی محوری و لنگر خمشی می‌باشد. مطلوب است طراحی این اتصال برای تحمل نیروی محوری ۶۳ تن به‌علاوه لنگر خمشی ۲۳ تن متر که از ستون IPB360 بر آن وارد می‌شود. فولاد مصرفی از نوع نرمه با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. ورق پای ستون در روی یک شالودهٔ بتنی بزرگ با مقاومت نمونهٔ استوانه‌ای $f'_c = 250\ kg/cm^2$ قرار دارد. بنابراین تنش تماسی فشاری مجاز مساوی $0.3\times 250 = 75\ kg/cm^2$ می‌باشد.

حل:

در اتصال پای ستون نشان داده شده، هیچ‌گونه جوشی بین پای ستون و ورق پای ستون وجود ندارد (و یا اگر جوش اسمی به‌خاطر عملیات مونتاژ و یا انتقال برش وجود داشته باشد، در این محاسبات آن را نادیده می‌گیریم). نیروی کششی حاصل از لنگر خمشی توسط پیچ‌های مهاری و نیروی فشاری توسط فشار تماسی بین بال ستون و ورق پای ستون حمل می‌شود (شکل ۱۱ ـ ۱۰۴ ـ ب). بنابراین منطقی است فرض نماییم که برآیند نیروهای فشاری تماسی بین بتن شالوده و ورق پای ستون درست در مقابل بال فشاری قرار دارد. البته نمودار آزاد ورق ستون نشان می‌دهد که برای حفظ تعادل ستون، باید برآیند نیروهای فشاری تماسی بین ورق پای ستون و شالوده درست در مقابل مرکز ثقل بار فشاری باشد. اما توزیع نیروهای فشاری تماسی بین ورق پای ستون و شالوده مشخص نمی‌باشد که ما در اینجا این توزیع را مثلثی فرض می‌نماییم.

الف) تخمین ابعاد ورق پای ستون

برون‌محوری بارهای وارده برابر است با:

$$e = \frac{M}{P} = \frac{23(100)}{63} = 36.51 \text{ cm}$$

در صورتی که نخواهیم بین ورق پای ستون و شالوده جدایی حاصل شود باید حداقل H مساوی 6e یا ۲۱۹/۰۶ سانتی‌متر باشد که انتخاب چنین ورق پای ستونی غیرمعقول است. بنابراین قطعاً بین ورق پای ستون و شالوده منطقه‌ای بدون فشار ایجاد می‌شود و پیچ‌های مهاری در کشش قرار می‌گیرند.

فاصلهٔ محور پیچ‌های مهاری تا بر ستون را مساوی ۵ سانتی‌متر فرض می‌نماییم. در نتیجه فاصلهٔ بین مراکز ثقل نیروهای فشاری و کششی برابر است با (توجه شود که مرکز ثقل نیروهای فشاری همان مرکز ثقل بال فشاری می‌باشد):

$$\text{بازوی لنگر} \quad = d - 0.5t_f + 5 = 36 - 0.5(2.25) + 5 = 39.88$$

در تخمین اولیهٔ H فرض می‌نماییم که رأس مثلث توزیع تنش تا نیروی کششی امتداد داشته باشد.

$$X = \frac{3}{2} \text{ (بازوی لنگر)} = 1.5(39.88) = 59.82 \text{ cm} \quad \text{(ارتفاع تار خنثی از تار فشاری)}$$

$$\frac{X}{3} = \frac{59.82}{3} = 19.94 \text{ cm}$$

بنابراین فاصلهٔ لبهٔ خارجی ورق پای ستون تا محور پیچ‌ها برابر است با:

$$19.94 - 0.5(2.25) - 5 = 13.82 \text{ cm}$$
$$H = X + 13.82 = 59.82 + 13.82 = 73.64$$

ارتفاع H= ۷۰cm انتخاب می‌شود. با انتخاب H سایر ابعاد مطابق شکل ۱۱ ـ ۱۰۴ ـ پ تنظیم می‌گردد پهنای B نیز براساس ملاحظات تنش مجاز فشاری تماسی بین پای ستون و شالوده انتخاب می‌شود.

با لنگرگیری حول مرکز ثقل نیروهای فشاری، نیروی کششی T به‌دست می‌آید:

$$T = \frac{63(19.63)}{39.88} = 31.01 \text{ ton}$$

$$\text{نیروی فشاری} \quad R = 63 + T = 63 + 31.01 = 94.01 \text{ ton}$$

با توجه به‌احتیاجات طراحی پهنای B را مساوی ۵۰ سانتی‌متر انتخاب می‌نماییم.

$$f_{p\max} = \frac{2R}{XB} = \frac{2(94.01)(1000)}{59.82(50)} = 62.86 \text{ kg/cm}^2 < 75 \text{ kg/cm}^2$$

تعیین ضخامت کف ستون

با مراجعه به‌شکل ۱۱ ـ ۱۰۴ طول طره برابر است با:

$$\text{طول طره} = \frac{(70-36)}{2} - 5 = 12 \text{ cm}$$

مقطع بحرانی برای خمش، وسط لبهٔ سخت‌کننده و لبهٔ ستون در نظر گرفته شده است.

برای تعیین ضخامت ورق، فرض می‌نماییم که تنش حداکثر تا مقطع بحرانی به‌طور یکنواخت است. با توجه به‌ناشناخته بودن توزیع تنش، انتخاب این فرض چندان دور از منطق نیست.

به‌ازای عرض واحد:

$$M = 62.86 \times \frac{12^2}{2} = 4526 \text{ kg.cm/cm}$$

$$t = \sqrt{\frac{6M}{0.75F_y}}$$

$$t = \sqrt{\frac{6(4526)}{0.75(2400)}} = 3.88 \text{ cm}$$

بنابراین برای کف ستون از ورق ۴۰×۵۰۰×۷۰۰ میلی‌متر استفاده می‌نماییم.

ب) انتخاب میلهٔ مهارها

از فولاد CK ۴۵ با تنش نهایی $F_u = 6000 \text{ kg/cm}^2$ استفاده می‌شود.

$$F_t = 0.33F_u = 0.33 \times 6000 = 1980 \approx 2000 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = \frac{31.01(1000)}{2000} = 15.5 \text{ cm}^2$$

از سه میلهٔ مهار ۲۵ میلی‌متر استفاده می‌نماییم.

موجود $A_s = 3(4.9) = 14.71 \text{ cm}^2$ قابل قبول است

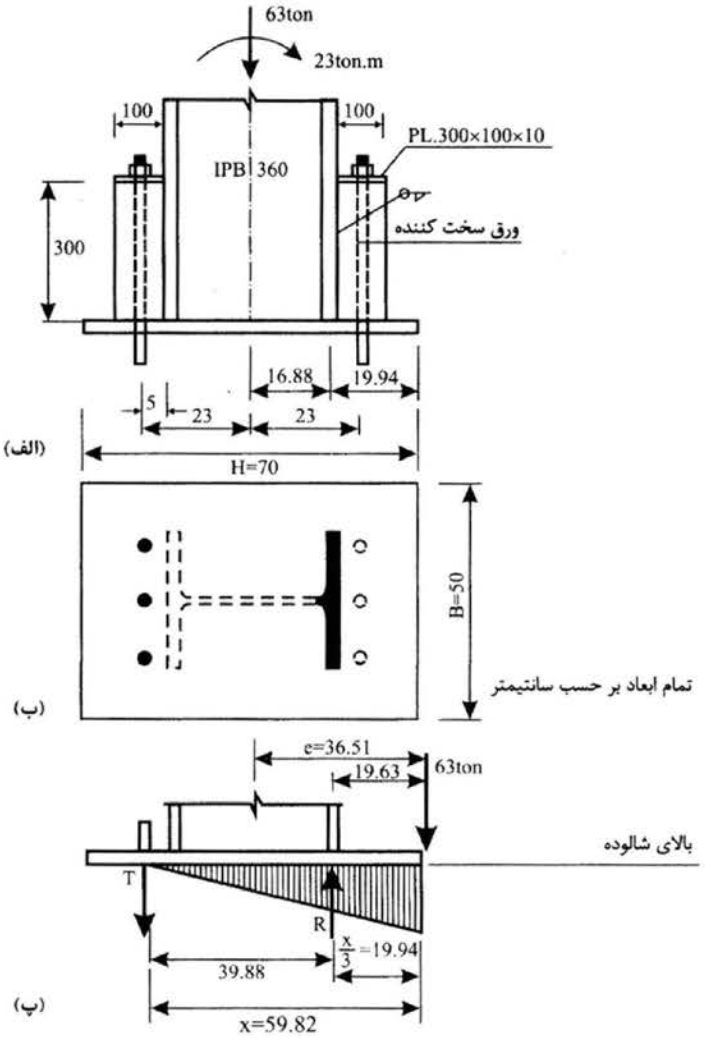
پ) سخت‌کننده‌ها و اتصالات مربوط به‌آنها

همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۱۰۵ ـ الف، نشان داده شده است، نیروی پیچ مهاری، توسط چهار ورق سخت‌کننده حمل می‌گردد. می‌توان فرض نمود که نیروی وارد بر هر یک از ورق‌های سخت‌کنندهٔ میانی مساوی نیروی یک پیچ می‌باشد.

$$\text{نیروی وارد بر هر ورق سخت‌کنندهٔ میانی} = \frac{31.01}{3} = 10.34 \text{ ton}$$

$$\text{لازم } A_s = \frac{10.34}{0.60F_y} = \frac{10.34(1000)}{0.6(2400)} = 7.18 \text{ cm}^2$$

بنابراین از ورق ۱۰×۱۰۰ میلی‌متر به‌عنوان سخت‌کننده استفاده می‌نماییم.



شکل ۱۱ ـ ۱۰۴

همان‌طور که در شکل ۱۱ ـ ۱۰۵ ـ ب، نشان داده شده است، نیروی ۱۰/۳۴ تنی که تحت برون‌محوری ۵ سانتی‌متر اثر می‌نماید، توسط عمل ترکیبی نیروی F_1 (که در جوش افقی به وجود می‌آید) و نیروی F_2 (که در جوش قائم به وجود می‌آید) تحمل می‌شود. می‌توان این طور فرض نمود که نیروی F_1 لنگر ناشی از برون‌محوری و نیروی F_2 برش ناشی از نیروی ۱۰/۳۴ تنی را حمل می‌نماید. نتایج حاصل از این روش به‌شرح زیر می‌باشند:

$$F2 = 10.34 \text{ ton} \quad , \quad Fl = \frac{10.34}{30} \times 5 = 1.72 \text{ ton}$$

$$\text{نیروی وارد بر واحد طول جوش قائم} = \frac{10.34}{30} \times 1000 = 345 \text{ kg/cm}$$

$$\text{نیروی وارد بر واحد طول جوش افقی} = \frac{1.72(1000)}{10} = 172 \text{ kg/cm}$$

اگر بخواهیم از جوش ۵ میلی‌متر در دو طرف سخت‌کننده استفاده نماییم، داریم:

$$R_w = 2(650)D = 2(650)0.5 = 650 \text{ kg/cm}$$

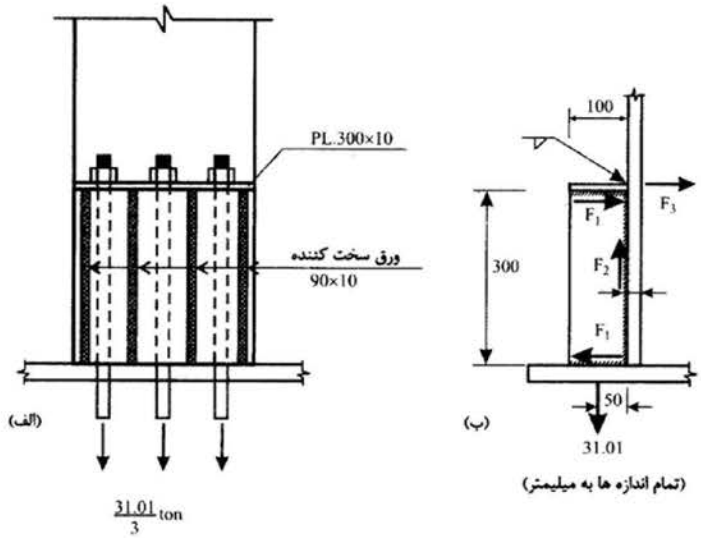
که خیلی بزرگتر از مقادیر مورد نیاز است.

در جهت اطمینان همین جوش را به‌طور پیوسته انتخاب می‌کنیم.

ت) اتصال ورق فوقانی به‌بال ستون

مجموع نیروهای F_1 باید توسط جوشی که سخت‌کننده را به‌بال ستون متصل می‌نماید، حمل گردد. در شکل ۱۱ ـ ۱۰۵ ـ ب، نیروی جوش توسط F_3 نشان داده شده است.

$$F_3 = \frac{\text{لنگر}}{\text{ارتفاع ناودانی}} = \frac{31.01(5)}{30} = 5.17 \text{ ton}$$



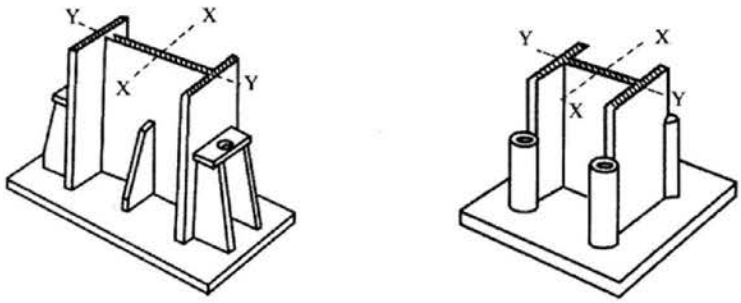
شکل ۱۱ ـ ۱۰۵

اندازهٔ ساق جوش برابر است با:

$$30(650)D = 5.17(1000)$$
$$D = 0.26 \text{ cm}$$

از جوش ۵ میلی‌متر استفاده شود.

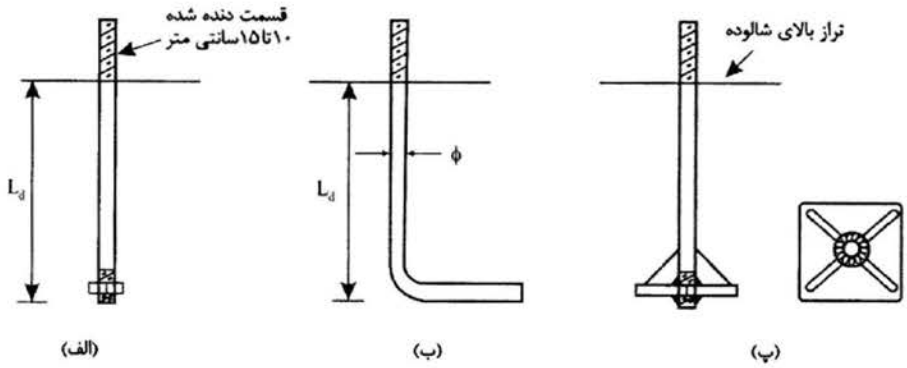
در صورتی که ستون و نیروهای وارد بر ستون کوچک باشد، تعداد پیچ‌های مهاری کمتر خواهد شد. در چنین مواردی برای انتقال نیروی پیچ مهاری به‌ستون، به‌جای سخت‌کننده از جزییات ساده‌تری همانند شکل ۱۱ ـ ۱۰۶ می‌توان استفاده نمود.



شکل ۱۱ ـ ۱۰۶

۱۱ ـ ۹ ـ ۸ مهار میلهٔ مهارها

میله‌مهارها تا حصول مقاومت کششی کل باید در بتن شالوده مهار شوند. میلهٔ مهارها معمولاً* از دنده کردن میلگردهای صاف (بدون آج) ساخته می‌شوند. لذا برای ایجاد مهار مکانیکی، انتهای میل مهار به یکی از صور نشان داده‌شده در شکل ۱۱ ـ ۶۰ درمی‌آید.



شکل ۱۱ ـ ۱۰۷

برای محاسبهٔ طول مهاری می‌توان از روابط آیین‌نامهٔ بتن برای میلگردهای قلاب‌دار در کشش استفاده نمود. به عنوان مثال روابط آیین‌نامهٔ آبا به قرار زیر است:

$$L_d = \frac{F_y}{4F_b} d_b$$

$$F_b = 0.75\, f_{bm} = 0.75 \times 2.05\sqrt{f_c} = 1.54\sqrt{f_c}$$ (برای میلگرد صاف با قلاب انتهایی)

* شواهد زیادی از وقوع شکنندگی در ناحیهٔ دنده شدهٔ میلگردهای آجدار AIII در کارگاه‌ها مشاهده شده است. لذا استفاده از این نوع میلگردها به‌عنوان میل مهار توصیه نمی‌شود، مگر اینکه عدم شکنندگی آنها به‌وسیلهٔ آزمایش تأیید گردد. در صورت نیاز به‌مقاومت زیاد، استفاده از میلگردهای CK ۴۵ ($F_u = 6000\ kg/cm^2$) برای میله‌مهارها قابل توصیه است که دارای شکل‌پذیری مناسب است.

$$L_d = \frac{F_y}{6.15\sqrt{f_c}} d_b$$

f_c= مقاومت مشخصهٔ نمونهٔ استوانه‌ای بتن (kg/cm^2)

F_y= تنش تسلیم فولاد (kg/cm^2)

d_b= قطر پیچ

برای $F_y = 2400\ kg/cm^2$ و $f_c = 250\ kg/cm^2$ مقدار فوق حدود ۲۵ برابر قطر به دست می‌آید.

۱۱ ـ ۱۰ اتصالات لوله‌ها و قوطی‌ها (مقاطع توخالی)

۱۱ ـ ۱۰ ـ ۱ معرفی

استفاده از لوله‌ها و قوطی‌ها امروزه در سازه‌های فولادی بسیار متداول می‌باشد. علاوه بر کاربردهای عمومی ساختمان، در سازه‌های خاصی نظیر سکوهای دریایی[11]، برج‌های مخابراتی[12]، و سازه‌های فضایی[13]، عمدتاً از لوله و بعضاً از قوطی استفاده می‌شود. در سایر سازه‌ها نیز استفاده از لوله و قوطی می‌تواند کیفیت‌های معماری و امکانات سازه‌ای ویژه‌ای فراهم سازد.

فواید استفاده از نیمرخ‌های لوله و قوطی از گذشته به‌خوبی شناخته شده لیکن عاملی که امروزه موجب رواج این کاربردها شده، پیشرفت در تکنیک‌های اجرایی اتصال خصوصاً استفاده از جوشکاری در آنهاست.

با توجه به‌یکسان بودن مشخصات هندسی لوله‌ها نسبت به‌تمام محورهایی که از مرکز سطح می‌گذرند، و مشابه بودن نسبی آنها در قوطی‌ها، این نیمرخ‌ها برای تحمل فشار و کشش بسیار کارآمد هستند، و کاربرد آنها به‌طرح‌های سبک و اقتصادی منجر می‌گردد. اگرچه سطوح داخلی لوله‌ها و قوطی‌ها را به‌راحتی نمی‌توان رنگ‌آمیزی کرد، ولی این موضوع غالباً اهمیت عملی ندارد، زیرا زنگ‌زدگی در داخل لوله‌ها و قوطی‌های بسته خصوصاً در سازه‌هایی که از اتصالات جوشی مستقیم برای اتصال قطعات استفاده شده، امکان بروز ندارد. اتصالات جوشی مانع ورود هر گونه رطوبت و جریان هوا به‌داخل نیمرخ می‌گردند و به‌دلیل محدود بودن هوای داخل قوطی یا لوله تعادل الکتروشیمیایی خیلی زود رخ داده، فرآیند زنگ زدن متوقف می‌گردد.

مشکل عمده در استفاده از نیمرخ‌های لوله و قوطی، اتصالات آنها به‌خصوص اتصال لوله‌هاست. لوله‌ها در محل تقاطع دارای فصل مشترک منحنی شکل فضایی هستند و برای اتصال آنها باید لبه‌های اعضا با دقت خاصی برش خورده، جفت و جور شوند. اغلب برش‌ها به‌وسیلهٔ شعلهٔ گاز صورت می‌گیرد، ولی در بعضی مواقع از اره‌های مخصوص برای این کار استفاده می‌کنند. در هر حال برش و اتصال این گونه نیمرخ‌ها وقت‌گیر و پُرهزینه است.

---

11. Off-Shore Platforms
12. Comunication towers
13. Space Structures

۱۱ ـ ۱۰ ـ ۲ اتصال مستقیم لوله‌ها و قوطی‌ها

در اتصالات مستقیم لوله‌ها و قوطی‌ها، که به‌وسیلهٔ جوشکاری انجام می‌شوند، اگرچه مقداری وقت و هزینه صرف برشکاری خاص انتهای لوله‌ها و جفت و جور کردن قطعات می‌شود، ولی معمولاً جوشکاری‌ها در حداقل ممکن و ظاهر اتصال بسیار بی‌پیرایه است. این مزیت‌ها هم از دیدگاه اقتصادی و هم به‌دلیل زیبایی مشکلات این نوع اتصال را قابل تحمل می‌نماید.

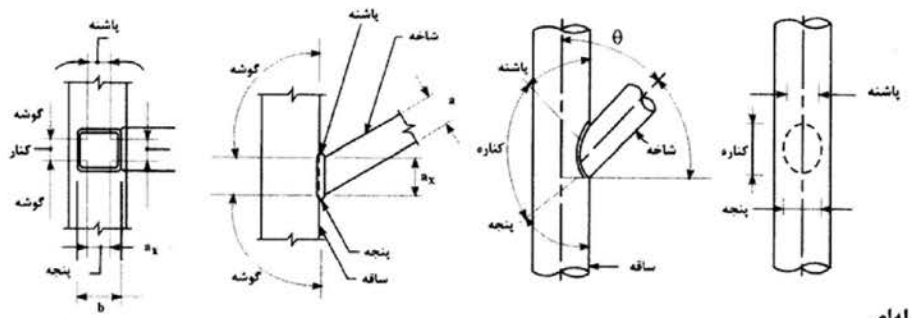
شکل ۱۱ ـ ۱۰۸ انواع اتصالات مستقیم لوله‌ها و قوطی‌ها را به‌نمایش گذاشته است و اسامی بخش‌های مختلف این‌گونه اتصالات را معرفی می‌نماید.

در محل اتصال، عضو ممتد سوراخ نمی‌شود. سوراخ کردن لوله‌ها در گرهٔ اتصال برای عبور سیال، در اتصالات جوشی در لوله‌کشی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که معرفی جزییات آن خارج از حیطهٔ بحث حاضر می‌باشد.

برعکس به‌خاطر تمرکز تنش‌ها در منطقهٔ اتصال ممکن است تقویت‌هایی در گرهٔ اتصال لازم باشد که معمولاً چون تقویت لوله و قوطی از داخل مشکل است، این تقویت‌ها بیشتر از بیرون و به‌صورت روپوش کردن جدار لوله ممتد یا استفاده از سخت‌کنندهٔ حلقوی انجام می‌پذیرد. نمونه‌هایی از این نحوه‌های تقویت در شکل ۱۱ـ۱۰۹ ارایه شده‌است.

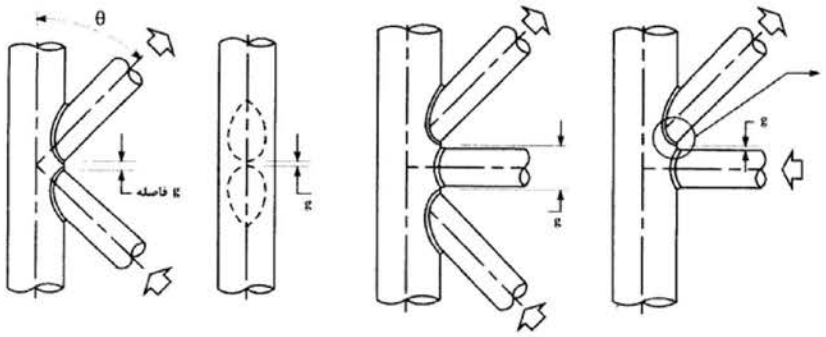
اتصال مستقیم چند عضو در یک گره می‌تواند به‌صورت هم‌مرکز و یا خارج از مرکز سازمان داده شود. شکل ۱۱ ـ ۱۱۰ نمونه‌هایی از هر دو اتصال را به‌نمایش گذاشته است. در اتصالات هم‌مرکز که محور همهٔ اعضای وارد به‌اتصال از یک نقطه عبور می‌کند، معمولاً نیمرخ‌ها همپوشانی پیدا می‌کنند و برش و جفت و جور کردن اتصال پیچیده‌تر می‌شود. اتصالات خارج از مرکز از نظر جزییات ساده‌تر هستند ولی در آنها به‌دلیل لنگر خروج از مرکزیت، تنش‌های اضافی ایجاد می‌شود.

وقتی که اعضا در گرهٔ اتصال به‌یکدیگر برخورد می‌کنند بهتر است ابتدا شاخهٔ کششی مستقیماً به‌ساقه متصل شده، و سپس عضو فشاری با برش مناسب به‌گره جوش شود. این تمهیدات به‌این نیت انجام می‌گیرد که اتصال کششی مناسب‌تری برقرار گردد. شکل ۱۱ ـ ۱۱۱ نمونهٔ چنین اتصالی را عرضه می‌دارد. کلاً مواردی که در بالا به‌عنوان اثر خروج از مرکزیت و اثر همپوشانی ذکر شد بحث‌های نظری هستند. در عمل این اثرها چندان مهم نیستند. به‌طور مثال در اتصال شکل ۱۱ ـ ۱۱۱ قسمت عمده‌ای از مؤلفهٔ قائم نیروی عضو کششی، قبل از اینکه به‌وسیلهٔ جوش a به‌عضو اصلی (ساقه) برسد از طریق جوش ناحیهٔ b به‌عضو فشاری و از آن طریق به‌عضو اصلی انتقال می‌یابد. قسمتی از جوش a که در ناحیهٔ همپوشانی اعضای کششی و فشاری قرار دارد تحت نیروی کوچکی قرار دارد زیرا کشش و فشار وارد بر این منطقه یکدیگر را خنثی می‌نماید.

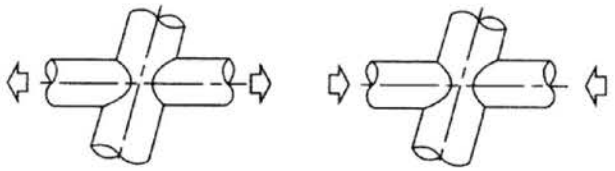


(الف) مقاطع لوله‌ای

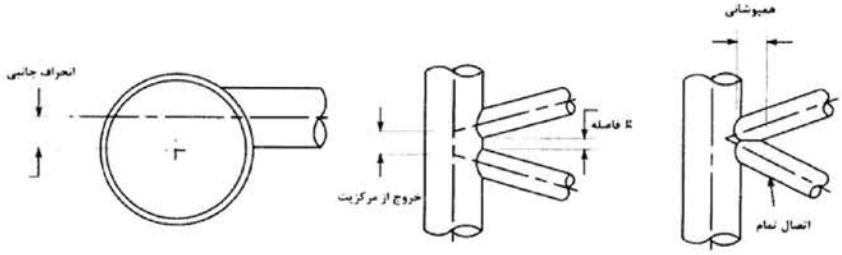
(ب) مقطع قوطی



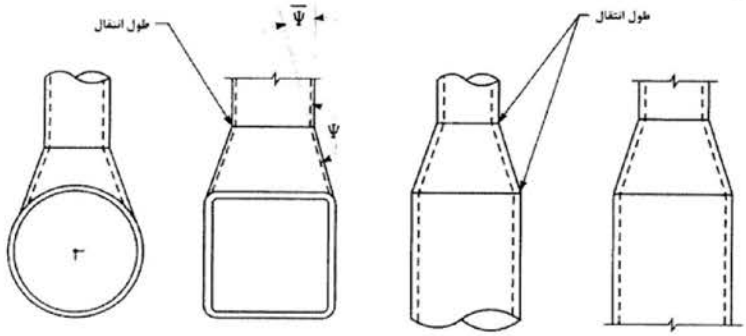
(پ) اتصالات دوشاخه و سه شاخه



(ت) اتصالات ضربدری

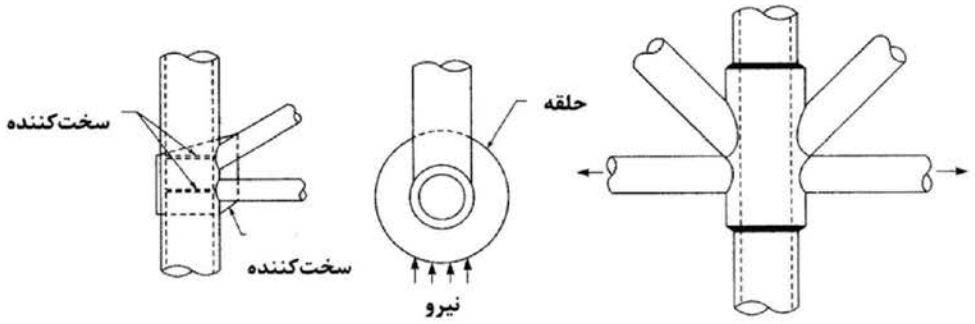


(ث) اتصالات خارج از مرکز



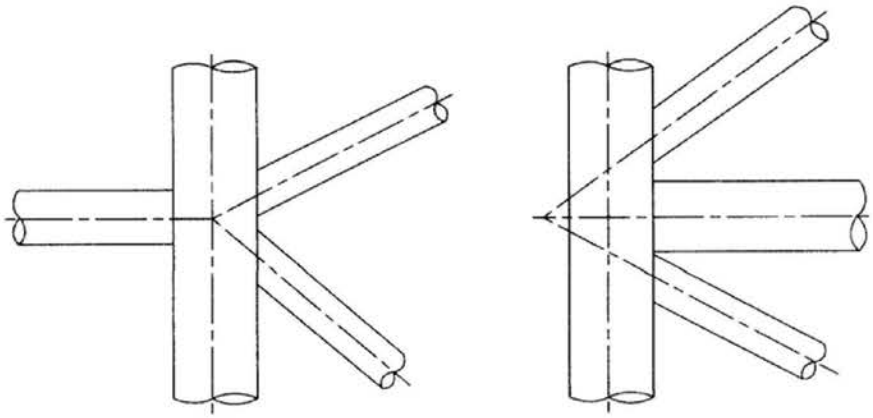
(ج) اتصالات انتقالی

شکل ۱۱ ـ ۱۰۸ اتصال مستقیم لوله و قوطی‌ها.



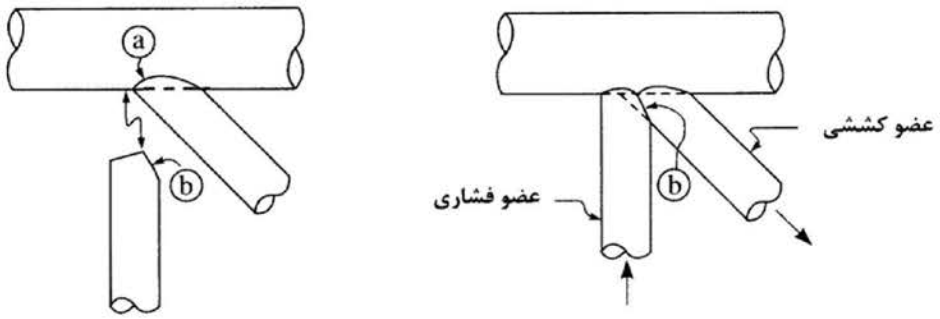
(الف) روپوش کردن ساقه (ب) حلقه سخت‌کننده (ج) سخت‌کنندهٔ داخلی

شکل ۱۱ ـ ۱۰۹ اتصالات تقویت‌شده.



(ب) اتصال خارج از مرکز (الف) اتصال هم‌مرکز (بدون همپوشانی)

شکل ۱۱ ـ ۱۱۰ اتصالات هم‌مرکز و خارج از مرکز.



شکل ۱۱ ـ ۱۱۱ ترتیب جوشکاری اتصالات هم‌پوشان.

۱۱ ـ ۱۰ ـ ۳ استفاده از ورق‌های اتصال

در طراحی اتصالات لوله‌ها به‌چند دلیل ممکن است از ورق‌های واسطه برای اتصال استفاده شود. این دلایل به‌طور خلاصه عبارتند از:

- استفاده از ورق، طول بیشتری برای جوشکاری در اختیار می‌گذارد.
- ورق‌های واسطه امکان استفاده از اتصالات پیچی را به‌هنگام نصب فراهم می‌سازند.

- در این نوع اتصالات امکان استفاده از جوش‌های گوشه فراهم بوده، در نتیجه دقت‌های بیش از حد و آماده‌سازی و جفت و جور کردن لبه‌ها که برای اتصالات مستقیم با جوش شیاری لازم است منتفی می‌گردد.
- با استفاده از ورق‌های اتصال، برش خاص انتهای لوله‌ها به‌منظور جفت و جور شدن آنها دیگر ضروری نخواهد بود. به‌این ترتیب برقراری اتصال بسیار ساده‌تر می‌شود.
- صفحهٔ اتصال، نیروهای اعضای قطری را در سطح وسیع‌تری از عضو اصلی (ساقه) توزیع می‌نماید و به‌خصوص در موارد ضخامت جدارهٔ کم لولهٔ اصلی، نیاز به‌تقویت را در منطقهٔ اتصال کاهش می‌دهد.

شکل ۱۱ ـ ۱۱۲ نمونه‌هایی از اتصال لوله‌ها به‌کمک ورق واسطه را به‌نمایش می‌گذارد.

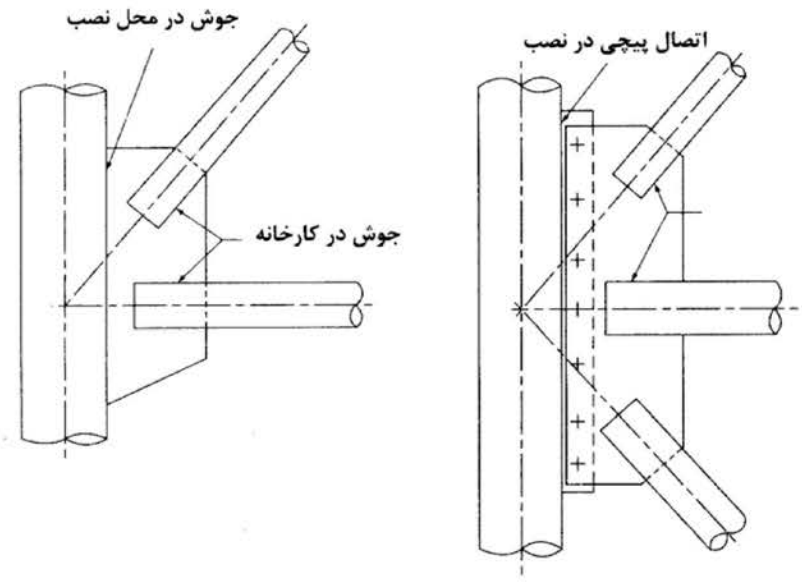
برای اتصال لوله‌ها و قوطی‌ها به‌ورق واسطه معمولاً لوله و قوطی از وسط شکاف داده می‌شود تا ورق اتصال در داخل شکاف قرار گیرد و لبه‌های شکاف به‌ورق اتصال جوش داده می‌شود. شکل ۱۱ ـ ۱۱۳ این نحوهٔ اتصال را به‌نمایش می‌گذارد.

۱۱ ـ ۱۰ ـ ۴ توصیه‌های طراحی

در مراجع مختلف از جمله آیین‌نامهٔ جوشکاری سازه‌ای انجمن جوشکاری آمریکا[۱۴] علاوه بر رعایت ضوابط طراحی آیین‌نامهٔ عمومی طراحی سازه‌ای فولادی، رعایت ضوابط دیگری در مورد سازه‌های لوله‌ای ضروری دانسته شده است. این ضوابط در زیر معرفی شده‌اند.

الف) محدودیت نسبت عرض به‌ضخامت

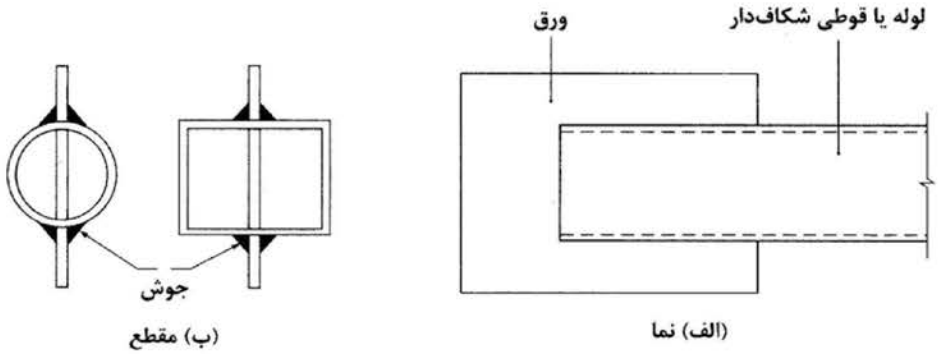
در مورد لوله‌ها این محدودیت به‌شکل رابطهٔ ۱۱ ـ ۷۹ بیان می‌گردد.



(الف) ورق واسطه و اتصال جوشی (ب) ورق واسطه با اتصال پیچی

شکل ۱۱ ـ ۱۱۲ اتصال لوله‌ها به‌کمک ورق واسطه.

14. *AWS, Structural Welding Code D1.1-94*



شکل ۱۱ ـ ۱۱۳ جزییات اتصال لوله به‌ورق.

$$D/t \le \frac{230000}{F_y} \qquad (۷۹ _ ۱۱)$$

در رابطهٔ بالا D قطر خارجی لوله و t ضخامت جدار آن بر حسب سانتی‌متر و F_y تنش جاری شدن فولاد بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

در مورد قوطی‌ها محدودیت عرض به‌ضخامت از روابط ۱۱ ـ ۸۰ و ۱۱ ـ ۸۱ به‌دست می‌آید:

برای نیمرخ‌های قوطی با فاصله در محل اتصال:

$$D/t \le \frac{1760}{\sqrt{F_y}} \qquad (۸۰ _ ۱۱)$$

نسبت به‌دست آمده از رابطهٔ ۱۱ ـ ۸۰ نباید از ۳۵ بیشتر باشد.

برای نیمرخ‌های با همپوشانی در منطقهٔ اتصال:

$$D/t \le \frac{1590}{\sqrt{F_y}} \qquad (۸۱ _ ۱۱)$$

در روابط فوق D ضلع بزرگتر نیمرخ قوطی و t ضخامت جدار قوطی برحسب سانتی‌متر می‌باشد. F_y تنش جاری شدن فولاد بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

ب) حداقل ضخامت جدار لوله

اگرچه AWS در این مورد دستورالعمل خاصی ارایه نکرده است لیکن طبق ضوابط استاندارد انگلستان حداقل ضخامت جدار لوله‌ها برای کاربردهای سازه‌ای به‌شرط آنکه راه نفوذ هوا و رطوبت با استفاده از درپوش یا اتصال مناسب سد شده باشد به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید:

اعضای واقع در محیط خارجی $t_{min} = 4$ mm

اعضای واقع در محیط بسته $t_{min} = 3$ mm

پ) تأثیر خروج از مرکزیت در اتصال

در مورد خروج از مرکزیت‌های شدید، اثرات خروج از مرکزیت باید در تحلیل و طراحی اعضا و اتصالات به‌حساب آورده شود.

۱۱ ـ ۱۰ ـ ۵ طراحی اتصالات مقاطع توخالی لوله‌ای و قوطی‌ها براساس ضوابط آیین‌نامهٔ AISC

مطالب این بخش در مورد اتصالات مقاطع توخالی لوله‌ای و قوطی شکل با ضخامت جداره یکنواخت می‌باشد. مقاومت این اتصالات، به ابعاد مقطع توخالی به خصوص ضخامت جدارهٔ اعضای خرپایی بستگی داشته و توسط آن کنترل می‌شود که این موضوع باید در طراحی اولیه مورد توجه قرار گیرد.

مطالب ارایه شده در این بخش عبارتند از:

الف) نیروهای متمرکز در مقاطع توخالی

ب) اتصالات خرپایی مقاطع توخالی

پ) اتصالات خمشی مقاطع توخالی

ت) جوش صفحات و اعضای فرعی (شاخه) به مقاطع توخالی قوطی شکل

الف) نیروهای متمرکز در مقاطع توخالی

در صورت وجود نیروی متمرکز در اتصال، ظرفیت اتصال را می‌توان از روابط ارایه شده در جدول‌های این بخش برای حالت‌های مختلف محاسبه نمود.

روابط مربوط به اتصالات مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ ـ ۲ ـ الف و روابط مربوط به اتصالات مقاطع قوطی‌شکل در جدول ۱۱ ـ ۳ ـ الف ارائه شده‌اند.

لازم به ذکر است که در صورتی می‌توان از روابط موجود در این جدول‌ها استفاده نمود که شرایط ذکر شده برای هر گروه از اتصالات و اعضای آن برقرار باشد. شرایط مربوط به‌اتصالات مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ ـ ۲ ـ ب و شرایط مربوط به اتصالات مقاطع قوطی شکل در جدول ۱۱ ـ ۳ ـ ب ارایه شده‌اند.

معرفی پارامترهای موجود در جدول‌ها:

* پارامترهای معرفی‌شده، باید به صورت متجانس مورد استفاده قرار گیرند.

A_g= سطح مقطع کلی عضو

B= عرض مقطع قوطی‌شکل عمود بر صفحهٔ اتصال

B_p= عرض ورق عمود بر صفحهٔ اتصال

D= قطر خارجی مقطع لوله‌ای

F_c= حداکثر تنش قابل قبول. (مساوی F_y در حالت مقاومت نهایی و $0.6F_y$ در حالت تنش مجاز)

F_y= حداقل تنش تسلیم مصالح عضو توخالی

F_{yp}= حداقل تنش تسلیم مصالح ورق

F_u= حداقل مقاومت کششی مصالح عضو توخالی

H= ارتفاع عضو توخالی قوطی شکل که در صفحهٔ اتصال اندازه‌گیری می‌شود.

S= اساس مقطع عضو

l_b= طول مقاوم در مقابل بارگذاری، موازی محور عضو توخالی. (برای صفحات پوششی بارگذاری شده برابر عرض مقطع توخالی می‌باشد.)

t= ضخامت جدارهٔ مقطع توخالی

t_p= ضخامت ورق

ب) اتصالات خرپایی مقاطع توخالی

برای محاسبهٔ ظرفیت اتصالات خرپایی مقاطع توخالی می‌توان از مطالب بیان شده در این قسمت استفاده نمود.

روابط مربوط به اتصالات خرپایی مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف و روابط مربوط به اتصالات خرپایی مقاطع قوطی شکل در جدول ۱۱ ـ ۵ ـ الف ارایه شده است.

لازم به ذکر است که شرایط و محدودیت‌های لازم جهت استفاده از روابط باید کنترل شود و در صورت برقراری شرایط و محدودیت‌ها می‌توان از این روابط استفاده نمود. شرایط مربوط به اتصالات مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ـ۴ـ ب و شرایط مربوط به اتصالات مقاطع قوطی شکل در جدول ۱۱ ـ ۵ ـ ب ارایه شده‌اند. انواع مختلف اتصالات خرپایی مقاطع توخالی که در آنها اعضای فرعی (شاخه) مستقیماً به عضو اصلی (ساقه) جوش می‌شوند عبارتند از:

الف) در حالتی‌که نیروی پانچ ($P_r \sin\theta$) در عضو فرعی (شاخه) توسط برش در عضو اصلی (ساقه) متعادل می‌شود، اگر شاخه به عضو اصلی عمود باشد اتصال T شکل و در غیر این صورت اتصال Y شکل می‌باشد.

ب) اگر نیروی پانچ ($P_r \sin\theta$) یک عضو فرعی توسط اعضای دیگر متعادل شود (با حداکثر ۲۰٪ اختلاف)، اتصال K شکل می‌باشد.

پ) اگر نیروی پانچ ($P_r \sin\theta$) توسط عضو اصلی به‌اعضای سمت دیگر منتقل و متعادل شود، اتصال عرضی می‌باشد.

ت) اگر اتصال دارای بیش از ۲ عضو فرعی (شاخه) باشد و یا اعضای شاخه‌ای در بیش از یک صفحه قرار گرفته باشند، اتصال به عنوان «اتصال کلی» یا چند صفحه‌ای رده‌بندی می‌شود.

وقتی اعضای شاخه‌ای قسمتی از بار خود را به‌صورت K و قسمتی از بار را به‌صورت T یا Y یا X انتقال می‌دهند، کفایت اتصال باید با درون‌یابی از نسبت مقاومت قابل حصول هر یک از کل تعیین شود.

معرفی پارامترهای موجود در جدول‌ها:

A_g= سطح مقطع کلی عضو

B= عرض مقطع عضو اصلی (ساقه) قوطی‌شکل عمود بر صفحهٔ اتصال

B_b= عرض مقطع عضو فرعی (شاخه) عمود بر صفحهٔ اتصال

D= قطر خارجی مقطع عضو لوله‌ای اصلی (ساقه)

D_b= قطر خارجی مقطع عضو لوله‌ای فرعی (شاخه)

F_c= حداکثر تنش قابل قبول در عضو اصلی (ساقه) (مساوی F_y در حالت مقاومت نهایی و $0.6F_y$ در حالت تنش مجاز)

F_y= حداقل تنش تسلیم مصالح عضو توخالی اصلی (ساقه)

F_{yb}= حداقل تنش تسلیم مصالح عضو توخالی فرعی (شاخه)

F_u= حداقل مقاومت کششی مصالح فولادی عضو توخالی

H= ارتفاع عضو توخالی قوطی‌شکل اصلی (ساقه) که در صفحهٔ اتصال اندازه‌گیری می‌شود.

H_b= ارتفاع عضو توخالی قوطی‌شکل فرعی (شاخه) که در صفحهٔ اتصال اندازه‌گیری می‌شود.

$l_{ov}/l_p \times 100 = O_v$ برحسب درصد

S= اساس مقطع عضو

e= خروج از مرکزیت در اتصال خرپایی که مطابق شکل ۱۱ ـ ۱۱۵ ـ c ، در جهت مخالف شاخه‌ها، مثبت فرض می‌شود.

g= فاصلهٔ بین اعضای فرعی (شاخه‌ها) در اتصال K شکل

$$\frac{H_b}{\sin\theta} = l_b$$

l_{ov}= طول همپوشانی شده در طول عضو اصلی (ساقه) و در زیر دو عضو فرعی (شاخه)

l_p= طول همپوشانی تصویر شدهٔ اعضای فرعی (شاخه) روی عضو اصلی (ساقه)

t= ضخامت جدارهٔ مقطع توخالی اصلی (ساقه)

t_b= ضخامت جدارهٔ مقطع توخالی فرعی (شاخه)

β= برابر است با نسبت $\frac{D_b}{D}$ برای مقاطع لوله‌ای و $\frac{B_b}{B}$ برای مقاطع قوطی‌شکل

β_{eff}= عبارت است از $\frac{\text{مجموع محیط دو عضو فرعی}}{\text{عرض ساقه} \times 8}$ در اتصال K شکل

γ= برابر است با نسبت $\frac{D}{2t}$ برای مقاطع لوله‌ای و $\frac{B}{2t}$ برای مقاطع قوطی‌شکل

η= برابر است با نسبت $\frac{l_b}{B}$ برای مقاطع قوطی شکل

θ= زاویهٔ بین عضو فرعی (شاخه) و عضو اصلی (ساقه) برحسب درجه

ζ= برابر است با نسبت $\frac{g}{B}$ در مقاطع قوطی‌شکل

پ) اتصالات خمشی مقاطع توخالی

برای محاسبهٔ ظرفیت اتصالات خمشی مقاطع توخالی می‌توان از مطالب ارایه شده در این بخش استفاده نمود. روابط مربوط به اتصالات خمشی مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ ـ ۶ ـ الف و روابط مربوط به اتصالات خمشی مقاطع قوطی‌شکل در جدول ۱۱ ـ ۷ ـ الف ارایه شده است.

محدودیت‌های استفاده از روابط ذکر شده برای مقاطع لوله‌ای در جدول ۱۱ ـ ۶ ـ ب و برای مقاطع قوطی‌شکل در جدول ۱۱ ـ ۷ ـ ب ارایه شده‌اند.

انواع مختلف اتصالات خمشی مقاطع توخالی که در آنها یک یا دو عضو فرعی (شاخه) مستقیماً به عضو اصلی (ساقه) جوش می‌شوند عبارتند از:

الف) اگر اتصال دارای یک عضو فرعی (شاخه) و عمود بر عضو اصلی (ساقه) باشد، اتصال T شکل و اگر اتصال دارای یک عضو فرعی (شاخه) و غیرعمود بر عضو اصلی (ساقه) باشد، اتصال Y شکل می‌باشد.

ب) اگر در سمت دیگر عضو اصلی (ساقه)، عضو فرعی (شاخه) دیگری موجود باشد، اتصال عرضی می‌باشد.

معرفی پارامترهای موجود در جدول‌ها:

A_g= سطح مقطع کلی عضو

B= عرض مقطع عضو اصلی (ساقه) قوطی شکل عمود بر صفحهٔ اتصال

B_b= عرض مقطع عضو فرعی (شاخه) عمود بر صفحهٔ اتصال

D= قطر خارجی مقطع عضو لوله‌ای اصلی (ساقه)

D_b= قطر خارجی مقطع عضو لوله‌ای فرعی (شاخه)

F_c= حداکثر تنش قابل قبول (برابر F_y در حالت مقاومت نهایی و $0.6F_y$ در حالت تنش مجاز)

F_y= حداقل تنش تسلیم مصالح عضو توخالی اصلی (ساقه)

F_{yb}= حداقل تنش تسلیم مصالح عضو توخالی فرعی (شاخه)

F_u= حداقل مقاومت کششی مصالح فولادی عضو توخالی

H= ارتفاع عضو توخالی قوطی شکل اصلی (ساقه) که در صفحهٔ اتصال اندازه‌گیری می‌شود.

H_b= ارتفاع عضو توخالی قوطی‌شکل فرعی (شاخه) که در صفحهٔ اتصال اندازه‌گیری می‌شود.

S= اساس مقطع عضو

Z_b= اساس مقطع پلاستیک عضو فرعی (شاخه) حول محور خمش

t= ضخامت جدارهٔ مقطع توخالی اصلی (ساقه)

t_b = ضخامت جدارهٔ مقطع توخالی فرعی (شاخه)

β= برابر است با نسبت $\frac{D_b}{D}$ برای مقاطع لوله‌ای و $\frac{B_b}{B}$ برای مقاطع قوطی‌شکل

γ= برابر است با نسبت $\frac{D}{2t}$ برای مقاطع لوله‌ای و $\frac{B}{2t}$ برای مقاطع قوطی‌شکل.

η= برابر است با نسبت $\frac{l_b}{B}$ و $l_b = \frac{H_b}{\sin\theta}$

θ= زاویهٔ بین عضو فرعی (شاخه) و عضو اصلی (ساقه) بر حسب درجه

ت) جوش صفحات و اعضای فرعی (شاخه) به مقاطع توخالی قوطی‌شکل:

مقاومت اتصال اعضای فرعی (شاخه) باید براساس حالت حدی انتقال غیریکنواخت نیرو در طول خط جوش تعیین شود.

مقاومت اتصال را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود:

$$R_n \text{ یا } P_n = F_{nw}\ t_w\ l_e$$
$$M_{n-ip} = F_{nw}\ S_{ip} \qquad (۸۲ - ۱۱)$$
$$M_{n-op} = F_{nw} S_{op}$$

پارامترهای روابط فوق را می‌توان با استفاده از روابط جدول ۱۱ ـ ۸ محاسبه نمود.

در روابط فوق:

F_{nw}= تنش اسمی فلز جوش بدون افزایش در اثر هدایت نیرو

S_{ip}= اساس مقطع مؤثر جوش برای خمش داخل صفحه

S_{op}= اساس مقطع مؤثر جوش برای خمش خارج صفحه

l_e = طول مؤثر جوش گوشه یا شیاری در مقاطع قوطی شکل برای محاسبهٔ مقاومت جوش

t_w= حداقل گلوی مؤثر جوش در پیرامون عضو فرعی (شاخه) و یا ورق

ـ برای جوش گوشه:

$\phi = 0.75$ (در حالت مقاومت نهایی)

$\Omega = 2.00$ (در حالت تنش مجاز)

برای جوش شیاری با نفوذ نسبی:

$\phi = 0.80$ (در حالت مقاومت نهایی)

$\Omega = 1.88$ (در حالت تنش مجاز)

مثال ۱۱ ـ ۱۹

اتصال نشان داده شده در شکل ۱۱ ـ ۱۱۴ تحت اثر نیروهای وارد شده از سوی اعضای توخالی لوله‌ای متصل به آن قرار دارد. ظرفیت اتصال را تعیین نمایید.

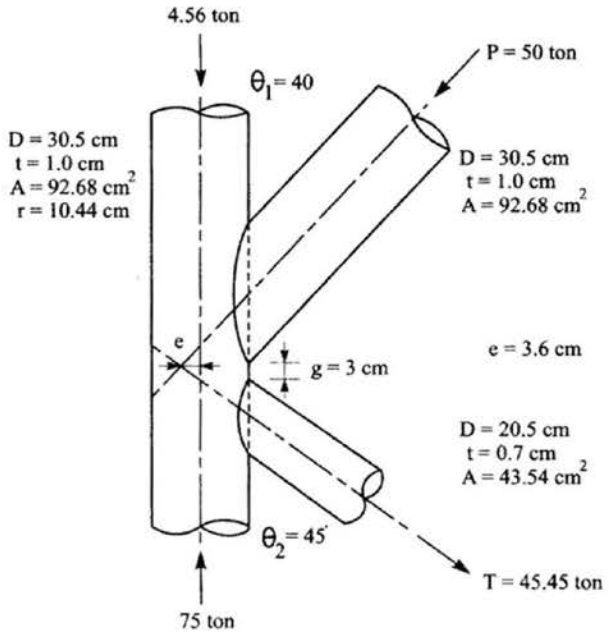
حل:

کنترل محدودیت‌های جدول (۱۱ ـ ۴ ـ ب) جهت استفاده از روابط جدول (۱۱ ـ ۴ ـ الف):

$$\frac{e}{D} = \frac{3.6}{30.5} = 0.12 \rightarrow -0.55 < \frac{e}{D} < 0.25 \qquad (۱)$$

$$\theta_1 = 40^\circ\ ,\ \theta_2 = 45^\circ \rightarrow \theta_1, \theta_2 > 30^\circ \qquad (۲)$$

$$\frac{D}{t} = \frac{30.5}{11} = 30.5 < 50 \quad \text{عضو اصلی (تنه)} \qquad (۳)$$



شکل ۱۱ ـ ۱۱۴ مربوط به مثال ۱۱ ـ ۱۹.

$$\text{شاخهٔ فشاری}\begin{cases}\dfrac{D_b}{t_b}=\dfrac{30.5}{1}=30.5<50\\[2ex]\dfrac{D_b}{t_b}=30.5<\dfrac{0.05E}{F_{yb}}=\dfrac{0.05\times2.1\times10^6}{2400}=43.75\end{cases}\qquad(۴)$$

$$\begin{aligned}&\text{عضو فشاری}\quad \frac{D_b}{D}=\frac{30.5}{30.5}=1\\&\text{عضو کششی}\quad \frac{D_b}{D}=\frac{20.5}{30.5}=0.67\end{aligned}\qquad \rightarrow 0.4\le\left(\frac{D_b}{D}\right)\le1\quad \text{عضو فشاری و کششی}\qquad(۵)$$

$$\text{مقاومت مصالح}: F_y, F_{yb}=240\,\text{MPa}\le360\,\text{MPa}\qquad(۶)$$

$$\frac{F_y}{F_u}, \frac{F_{yb}}{F_u}=\frac{240\,\text{MPa}}{370\,\text{MPa}}=0.65\le0.8\qquad(۷)$$

پس می‌توان از روابط جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف استفاده نمود.

با استفاده از حالت چهارم جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف داریم:

$$(P_n\sin\theta)\ \text{عضو فشاری}=F_yt^2(2.0+11.33\frac{D_b\ \text{عضو فشاری}}{D})Q_g.Q_f$$

داریم:

$\theta_1 = 40^\circ$, $F_y = 2400\ kg/cm^2$, $t = 1\ cm$ (ضخامت عضو اصلی)

$D = 30.5cm$ قطر خارجی عضو اصلی (ساقه) , $D_b = 30.5cm$ قطر خارجی عضو فشاری(شاخه)

محاسبهٔ Q_g:

$$Q_g = \gamma^{0.2}\left[1+\frac{0.024\gamma^{1.2}}{\exp(\frac{0.5g}{t}-1.33)+1}\right]$$

$$\begin{cases}\gamma = \frac{D}{2t} = \frac{30.5}{2\times 1} = 15.25\\ g = 3\ cm\end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_g = 15.25^{0.2}\left[1+\frac{0.024\times(15.25)^{1.2}}{\exp(\frac{0.5\times 3}{1}-1.33)+1}\right] = 2.22$$

محاسبه Q_f :

$$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$$

$$U = \left|\frac{P_{ro}}{F_c.A_g} + \frac{M_{ro}}{F_cS}\right|$$

$$\begin{cases}P_{ro} = P_a = 50\ ton\\ F_c = 0.6F_y = 0.6\times 2400 = 1440\ kg/cm^2\\ A_g = 92.68\ cm^2\\ M_{ro} = o \quad \text{عضو خرپایی و خروج از مرکزیت کم}\end{cases}$$

$$\Rightarrow U = \frac{50\times 10^3}{1440\times 92.68} = 0.374$$

$$\Rightarrow Q_f = 1-0.3(0.374)(1+0.374) \rightarrow Q_F = 0.84$$

حال می‌توانیم از رابطهٔ اصلی استفاده کرده و ظرفیت اتصال را محاسبه نماییم:

$$P_n \sin 40^\circ = 2400\times(1)^2(2+11.33\times\frac{30.5}{30.5})\times 2.22\times 0.84\times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow P_n \sin 40^\circ = 59.65\ ton$$

$$\Rightarrow P_n = \frac{59.65}{\sin 40^\circ} \Rightarrow P_n = 92.8\ ton$$

برای محاسبهٔ مقاومت مجاز اتصال (در سطح تنش مجاز) لازم است مقدار P_n بر ضریب $\Omega = 1/67$ تقسیم شود:

$$\text{مقاومت فشاری مجاز اتصال} = \frac{P_n}{1.67} = \frac{92.8}{1.67} = 55.57 \text{ ton} > 50 \text{ ton}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری مجاز اتصال برابر ۵۵/۵۷ ton می‌باشد.

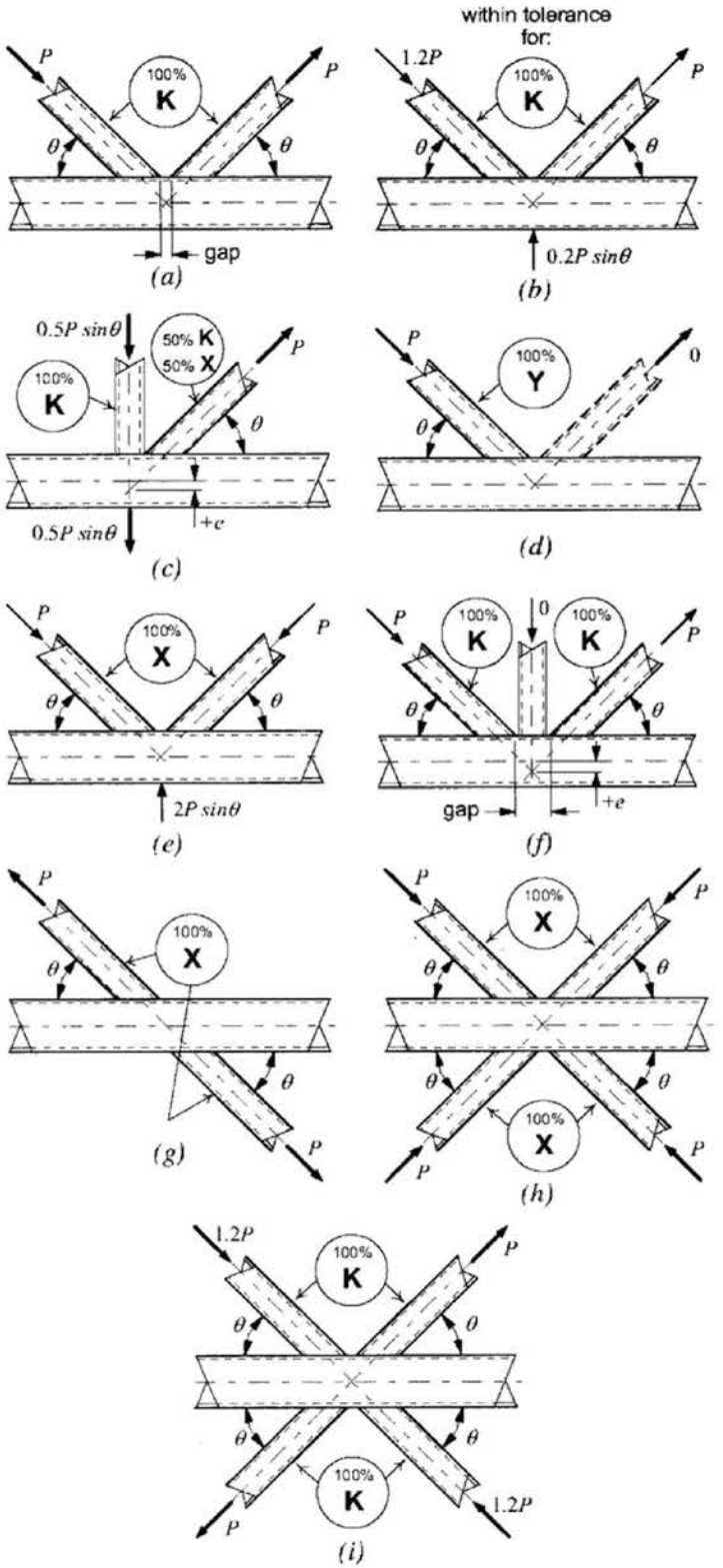
$$(P_n \sin\theta)_{\text{شاخهٔ کششی}} = (P_n \sin\theta)_{\text{شاخهٔ فشاری}}$$

$$(P_n \sin\theta_2)_{\text{شاخهٔ کششی}} = 59.65 \text{ ton} \rightarrow (P_n \sin 45)_{\text{شاخهٔ کششی}} = 59.65 \text{ ton}$$

$$\Rightarrow (P_n)_{\text{شاخهٔ کششی}} = \frac{59.65}{\sin 45} = 84.35 \text{ton} > 45.45 \text{ ton}$$

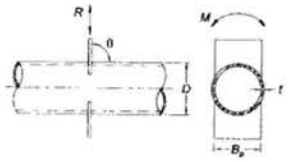
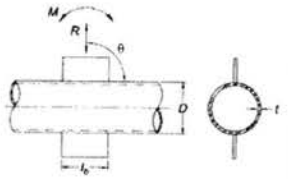
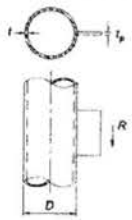
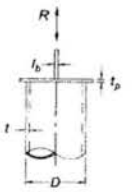
$$\text{مقاومت کششی مجاز اتصال} = \frac{84.35}{1.67} = 50.51 \text{ ton}$$

مشاهده می‌شود که ظرفیت فشاری و کششی مجاز اتصال، جواب‌گوی نیروهای موجود خواهد بود.



شکل ۱۱ ـ ۱۱۵ رده‌بندی اتصال‌ها.

جدول ۱۱ ـ ۲ ـ الف
بار مجاز ورق متصل به‌لوله

Connection Type	Connection Available Strength	Plate Bending	
		In-Plane	Out-of-Plane
Transverse Plate T- and Cross-Connections 	Limit State: HSS Local Yielding Plate Axial Load $R_n \sin\theta = F_y t^2 \left(\frac{5.5}{1-0.81\frac{B_p}{D}} \right) Q_f$ K1-1) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)	—	$M_n = 0.5 B_p R_n$
Longitudinal Plate T-, Y- and Cross-Connections 	Limit State: HSS Plastification Plate Axial Load $R_n \sin\theta = 5.5 F_y t^2 \left(1+0.25\frac{l_b}{D}\right) Q_f$ (K1-2) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)	$M_n = 0.8 l_b R_n$	—
Longitudinal Plate T-Connections 	Limit States: Plate Limit States and HSS Punching Shear Plate Shear Load For R_n, see Chapter J. Additionally, the following relationship shall be met: $t_p \le \frac{F_u}{F_{yp}} t$ (K1-3)	—	—
Cap Plate Connections 	Limit State: Local Yielding of HSS Axial Load $R_n = 2F_y t(5t_p + l_b) \le F_y A$ (K1-4) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)	—	—

FUNCTIONS

$Q_f = 1$ for HSS (connecting surface) in tension
$= 1.0 - 0.3U(1 + U)$ for HSS (connecting surface) in compression (K1-5)

$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right|$ (K1-6)

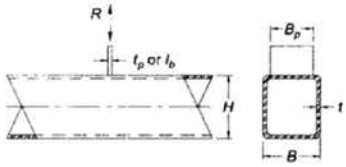
where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the lower compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS.

$P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD.

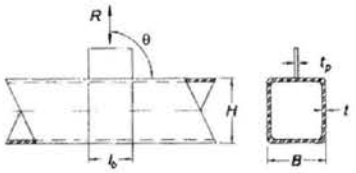
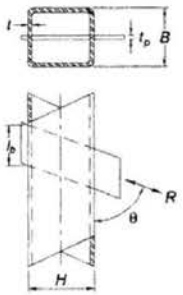
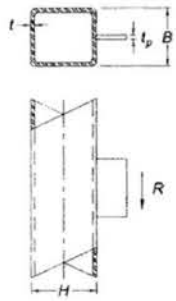
جدول ۱۱ ـ ۲ ـ ب
محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۲ ـ الف

Plate load angle:	θ	$\geq 30°$
HSS wall slenderness:	D/t	≤ 50 for T-connections under branch plate axial load or bending
	D/t	≤ 40 for cross-connections under branch plate axial load or bending
	D/t	$\leq 0.11E/F_y$ under branch plate shear loading
	D/t	$\leq 0.11E/F_y$ for cap plate connections in compression
Width ratio:	0.2	$< B_p/D \leq 1.0$ for transverse branch plate connections
Material strength:	F_y	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u	≤ 0.8

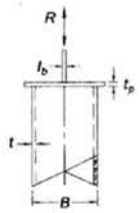
جدول ۱۱ ـ ۳ ـ الف
بار مجاز ورق متصل به‌قوطی

Connection Type	Connection Available Strength
Transverse Plate T- and Cross-Connections, Under Plate Axial Load  where $\beta = \frac{B_p}{B}$	Limit State: Local Yielding of Plate, For All β $R_n = \frac{10}{B/t} F_y t B_p \leq F_{yp} t_p B_p$ (K1-7) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)
	Limit State: HSS Shear Yielding (Punching), When $0.85B \leq B_p \leq B - 2t$ $R_n = 0.6F_y t\left(2t_p + 2B_{ep}\right)$ (K1-8) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)
	Limit State: Local Yielding of HSS Sidewalls, When $\beta = 1.0$ $R_n = 2F_y t\left(5k + l_b\right)$ (K1-9) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Local Crippling of HSS Sidewalls, When $\beta = 1.0$ and Plate is in Compression, for T-Connections $R_n = 1.6t^2\left(1 + \frac{3l_b}{H-3t}\right)\sqrt{EF_y} Q_f$ (K1-10) $\phi = 0.75$ (LRFD) $\Omega = 2.00$ (ASD)
	Limit State: Local Crippling of HSS Sidewalls, When $\beta = 1.0$ and Plate is in Compression, for Cross-Connections $R_n = \left(\frac{48t^3}{H-3t}\right)\sqrt{EF_y} Q_f$ (K1-11) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)

جدول ۱۱ ـ ۳ ـ الف
ادامه

Connection Type	Connection Available Strength
Longitudinal Plate T-, Y- and Cross-Connections, Under Plate Axial Load 	Limit State: HSS Plastification $$R_n \sin\theta = \frac{F_y t^2}{1-\frac{t_p}{B}}\left(\frac{2l_b}{B}+4\sqrt{1-\frac{t_p}{B}Q_f}\right) \quad \text{(K1-12)}$$ $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
Longitudinal Through Plate T- and Y-Connections, Under Plate Axial Load 	Limit State: HSS Wall Plastification $$R_n \sin\theta = \frac{2F_y t^2}{1-\frac{t_p}{B}}\left(\frac{2l_b}{B}+4\sqrt{1-\frac{t_p}{B}Q_f}\right) \quad \text{(K1-13)}$$ $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
Longitudinal Plate T-Connections, Under Plate Shear Load 	Limit States: Plate Limit States and HSS Punching Shear For R_n, see Chapter J. Additionally, the following relationship shall be met: $$t_p \le \frac{F_u}{F_{yp}}t \quad \text{(K1-3)}$$

جدول ۱۱ ـ ۳ ـ الف
ادامه

Connection Type	Connection Available Strength
Cap Plate Connections, under Axial Load 	Limit State: Local Yielding of Sidewalls $R_n = 2F_y t(5t_p + l_b)$, when $(5t_p + l_b) < B$ (K1-14a) $R_n = F_y A$, when $(5t_p + l_b) \geq B$ (K1-14b) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Local Crippling of Sidewalls, When Plate is in Compression $R_n = 1.6t^2\left[1+\frac{6l_b}{B}\left(\frac{t}{t_p}\right)^{1.5}\right]\sqrt{EF_y\frac{t_p}{t}}$, when $(5t_p + l_b)$ (K1-15) $\phi = 0.75$ (LRFD) $\Omega = 2.00$ (ASD)

FUNCTIONS

Q_f = 1 for HSS (connecting surface) in tension

$= 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \leq 1.0$ for HSS (connecting surface) in compression, for transverse plate connections (K1-16)

$= \sqrt{1-U^2}$ for HSS (connecting surface) in compression, for longitudinal plate and longitudinal through plate connections (K1-17)

$U = \left|\frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S}\right|$, where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the lower compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS. $P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD. (K1-6)

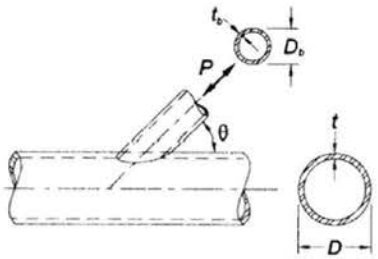
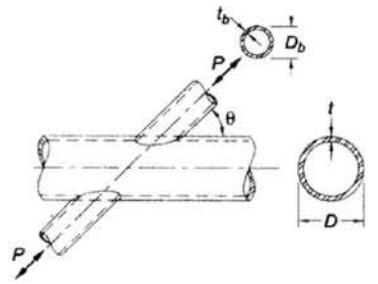
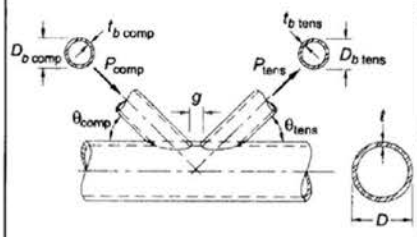
$B_{ep} = \frac{10B_p}{B/t} \leq B_p$ (K1-18)

k = outside corner radius of HSS $\geq 1.5\ t$

جدول ۱۱ ـ ۳ ـ ب
محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۳ ـ الف

Plate load angle:	θ	$\geq 30°$
HSS wall slenderness:	B/t or H/t	≤ 35 for loaded wall, for transverse branch plate connections
	B/t or H/t	≤ 40 for loaded wall, for longitudinal branch plate and through plate connections
	$(B-3t)/t$ or $(H-3t)/t$	$\leq 1.40\sqrt{E/F_y}$ for loaded wall, for branch plate shear loading
Width ratio:	$0.25 \leq B_p/B$	≤ 1.0 for transverse branch plate connections
Material strength:	F_y	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u	≤ 0.8 Note: ASTM A500 Grade C is acceptable.

جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف
بار مجاز اتصالات مقاطع لوله‌ای ـ اتصال مفصلی خرپایی

Connection Type	Connection Available Axial Strength
General Check For T-, Y-, Cross- and K-Connections With Gap, When $D_{b(\text{tens/comp})} < (D - 2t)$	Limit State: Shear Yielding (Punching) $P_n = 0.6F_y t \pi D_b \left(\frac{1+\sin\theta}{2\sin^2\theta}\right)$ (K2-1) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)
T- and Y-Connections 	Limit State: Chord Plastification $P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(3.1 + 15.6\beta^2\right)\gamma^{0.2} Q_f$ (K2-2) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)
Cross-Connections 	Limit State: Chord Plastification $P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(\frac{5.7}{1-0.81\beta}\right) Q_f$ (K2-3) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)
K-Connections With Gap or Overlap 	Limit State: Chord Plastification $(P_n \sin\theta)_{\text{compression branch}} = F_y t^2 \left(2.0 + 11.33 \frac{D_{b\,comp}}{D}\right) Q_g Q_f$ (K2-4) $(P_n \sin\theta)_{\text{tension branch}} = (P_n \sin\theta)_{\text{compression branch}}$ (K2-5) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)

جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف
(ادامه)

FUNCTIONS

$Q_f = 1$ for chord (connecting surface) in tension (K1-5a)

$= 1.0 - 0.3U(1 + U)$ for HSS (connecting surface) in compression (K1-5b)

$$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right|$$

where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the lower compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS. $P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD. (K1-6)

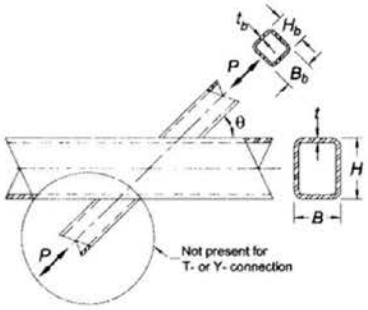
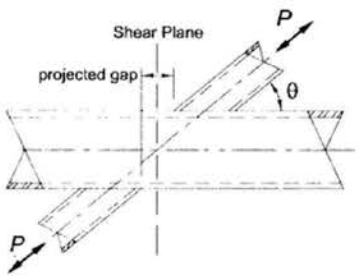
$$Q_g = \gamma^{0.2} \left[1 + \frac{0.024\gamma^{1.2}}{\exp\left(\frac{0.5g}{t} - 1.33\right) + 1} \right]^{[a]} \quad \text{(K2-6)}$$

[a] Note that $\exp(x)$ is equal to e^x, where e = 2.71828 is the base of the natural logarithm.

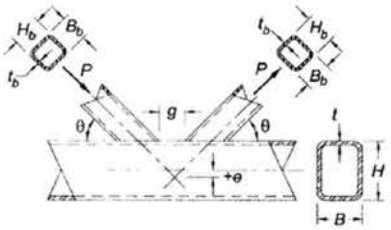
جدول ۱۱ ـ ۴ ـ ب
محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۴ ـ الف

Joint eccentricity:	-0.55	$\leq e/D \leq 0.25$ for K-connections
Branch angle:	θ	$\geq 30°$
Chord wall slenderness:	D/t	≤ 50 for T-, Y- and K-connections
	D/t	≤ 40 for cross-connections
Branch wall slenderness:	D_b/t_b	≤ 50 for compression branch
	D_b/t_b	$\leq 0.05E/F_{yb}$ for compression branch
Width ratio:	0.2	$< D_b/D \leq 1.0$ for T-, Y-, cross- and overlapped K-connections
	0.4	$\leq D_b/D \leq 1.0$ for gapped K-connections
Gap:	g	$\geq t_{b\ comp} + t_{b\ tens}$ for gapped K-connections
Overlap:	25%	$\leq O_v \leq 100\%$ for overlapped K-connections
Branch thickness:	$t_{b\ overlapping}$	$\leq t_{b\ overlapped}$ for branches in overlapped K-connections
Material strength:	F_y and F_{yb}	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u and F_{yb}/F_{ub}	≤ 0.8 Note: ASTM A500 Grade C is acceptable.

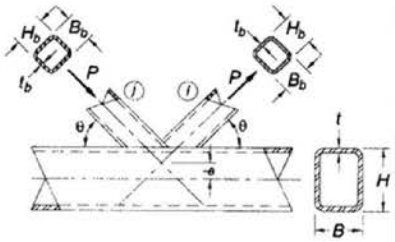
جدول ۱۱ ـ ۵ ـ الف
بار مجاز اتصالات مقاطع قوطی در اتصال مفصلی خرپایی

Connection Type	Connection Available Axial Strength
T-, Y- and Cross-Connections 	Limit State: Chord Wall Plastification, When $\beta \le 0.85$ $P_n \sin\theta = F_y t^2 \left[\frac{2\eta}{(1-\beta)} + \frac{4}{\sqrt{1-\beta}} \right] Q_f$ (K2-7) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Shear Yielding (Punching), When $0.85 < \beta \le 1 - 1/\gamma$ or $B/t < 10$ $P_n \sin\theta = 0.6 F_y t B (2\eta + 2\beta_{eop})$ (K2-8) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)
	Limit State: Local Yielding of Chord Sidewalls, When $\beta = 1.0$ $P_n \sin\theta = 2F_y t (5k + l_b)$ (K2-9) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
Case for checking limit state of shear of chord side walls 	Limit State: Local Crippling of Chord Sidewalls, When $\beta = 1.0$ and Branch is in Compression, for T- or Y-Connections $P_n \sin\theta = 1.6 t^2 \left(1 + \frac{3l_b}{H - 3t} \right) \sqrt{EF_y} Q_f$ (K2-10) $\phi = 0.75$ (LRFD) $\Omega = 2.00$ (ASD)
	Limit State: Local Crippling of Chord Sidewalls, When $\beta = 1.0$ and Branches are in Compression, for Cross-Connections $P_n \sin\theta = \left(\frac{48 t^3}{H - 3t} \right) \sqrt{EF_y} Q_f$ (K2-11) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)
	Limit State: Local Yielding of Branch/Branches Due to Uneven Load Distribution, When $\beta > 0.85$ $P_n = F_{yb} t_b (2H_b + 2b_{eoi} - 4t_b)$ (K2-12) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD) where $b_{eoi} = \frac{10}{B/t} \left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b} \right) B_b \le B_b$ (K2-13)

جدول ۱۱ ـ ۵ ـ الف
(ادامه)

Connection Type	Connection Available Axial Strength
T-, Y- and Cross-Connections	Limit State: Shear of Chord Sidewalls For Cross-Connections With $\theta < 90°$ and Where a Projected Gap is Created (See Figure). Determine $P_n \sin\theta$ in accordance with Section G5.
Gapped K-Connections  	Limit State: Chord Wall Plastification, for All β $P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(9.8\beta_{eff}\gamma^{0.5}\right) Q_f$ (K2-14) $\phi = 0.90$ (LRFD) $\quad \Omega = 1.67$ (ASD)
	Limit State: Shear Yielding (Punching), when $B_b < B - 2t$ Do not check for square branches. $P_n \sin\theta = 0.6 F_y t B \left(2\eta + \beta + \beta_{eop}\right)$ (K2-15) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\quad \Omega = 1.58$ (ASD)
	Limit State: Shear of Chord Sidewalls, in the Gap Region Determine $P_n \sin\theta$ in accordance with Section G5. Do not check for square chords.
	Limit State: Local Yielding of Branch/Branches Due to Uneven Load Distribution. Do not check for square branches or if $B/t \geq 15$. $P_n = F_{yb} t_b \left(2H_b + B_b + b_{eoi} - 4t_b\right)$ (K2-16) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\quad \Omega = 1.58$ (ASD) where $b_{eoi} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \leq B_b$ (K2-13)

جدول ۱۱ ـ ۵ ـ الف
(ادامه)

Connection Type	Connection Available Axial Strength
Overlapped K-Connections  Note that the force arrows shown for overlapped K-connections may be reversed; *i* and *j* control member identification.	Limit State: Local Yielding of Branch/Branches Due to Uneven Load Distribution $\phi = 0.95$ (LRFD) $\quad \Omega = 1.58$ (ASD) When $25\% \le O_v < 50\%$: $P_{n,i} = F_{ybi} t_{bi} \left[\frac{O_v}{50} (2H_{bi} - 4t_{bi}) + b_{eoi} + b_{eov} \right]$ (K2-17) When $50\% \le O_v < 80\%$: $P_{n,i} = F_{ybi} t_{bi} (2H_{bi} - 4t_{bi} + b_{eoi} + b_{eov})$ (K2-18) When $80\% \le O_v < 100\%$: $P_{n,i} = F_{ybi} t_{bi} (2H_{bi} - 4t_{bi} + B_{bi} + b_{eov})$ (K2-19) $b_{eoi} = \frac{10}{B/t} \left(\frac{F_y t}{F_{ybi} t_{bi}} \right) B_{bi} \le B_{bi}$ (K2-20) $b_{eov} = \frac{10}{B_{bj}/t_{bj}} \left(\frac{F_{ybj} t_{bj}}{F_{ybi} t_{bi}} \right) B_{bi} \le B_{bi}$ (K2-21) Subscript *i* refers to the overlapping branch Subscript *j* refers to the overlapped branch $P_{n,j} = P_{n,i} \left(\frac{F_{ybj} A_{bj}}{F_{ybi} A_{bi}} \right)$ (K2-22)

FUNCTIONS

$Q_f = 1$ for chord (connecting surface) in tension (K1-5a)

$= 1.3 - 0.4 \frac{U}{\beta} \le 1$ for chord (connecting surface) in compression, for T-, Y- and cross-connections (K1-16)

$= 1.3 - 0.4 \frac{U}{\beta_{eff}} \le 1.0$ for chord (connecting surface) in compression, for gapped K-connections (K2-23)

$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right|$, where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the higher compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS. (K1-6)
$P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD.

$\beta_{eff} = \left[(B_b + H_b)_{\text{compression branch}} + (B_b + H_b)_{\text{tension branch}} \right] / 4B$ (K2-24)

$\beta_{eop} = \frac{5\beta}{\gamma} \le \beta$ (K2-25)

جدول ۱۱ ـ ۵ ـ ب

محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۵ ـ الف

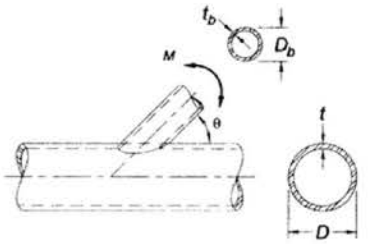
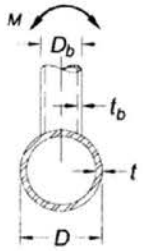
Joint eccentricity:	-0.55	$\leq e/H \leq 0.25$ for K-connections
Branch angle:	θ	$\geq 30°$
Chord wall slenderness:	B/t and H/t	≤ 35 for gapped K-connections and T-, Y- and cross-connections
Branch wall slenderness:	B/t	≤ 30 for overlapped K-connections
	H/t	≤ 35 for overlapped K-connections
	B_b/t_b and H_b/t_b	≤ 35 for tension branch
		$\leq 1.25\sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$ for compression branch of gapped K-, T-, Y- and cross-connections
		≤ 35 for compression branch of gapped K-, T-, Y- and cross-connections
		$\leq 1.1\sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$ for compression branch of overlapped K-connections
Width ratio:	B_b/B and H_b/B	≥ 0.25 for T-, Y- cross- and overlapped K-connections
Aspect ratio:	0.5	$\leq H_b/B_b \leq 2.0$ and $0.5 \leq H/B \leq 2.0$
Overlap:	25%	$\leq O_v \leq 100\%$ for overlapped K-connections
Branch width ratio:	B_{bi}/B_{bj}	≥ 0.75 for overlapped K-connections, where subscript i refers to the overlapping branch and subscript j refers to the overlapped branch
Branch thickness ratio:	t_{bi}/t_{bj}	≤ 1.0 for overlapped K-connections, where subscript i refers to the overlapping branch and subscript j refers to the overlapped branch
Material strength:	F_y and F_{yb}	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u and F_{yb}/F_{ub}	≤ 0.8

ADDITIONAL LIMITS FOR GAPPED K-CONNECTIONS

Width ratio:	$\frac{B_b}{B}$ and $\frac{H_b}{B}$	$\geq 0.1+\frac{\gamma}{50}$
	β_{eff}	≥ 0.35
Gap ratio:	$\zeta = g/B$	$\geq 0.5\ (1 - \beta_{eff})$
Gap:	g	$\geq t_{b\ \text{compression branch}} + t_{b\ \text{tension branch}}$
Branch size:		smaller $B_b \geq 0.63$ (larger B_b), if both branches are square

Note: Maximum gap size will be controlled by the e/H limit. If gap is large, treat as two Y-connections.

جدول ۱۱ ـ ۶ ـ الف
لنگر مجاز اتصالات مقاطع لوله‌ای ـ اتصال صلب

<table>
<tr><th>Connection Type</th><th>Connection Available Flexural Strength</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Branch(es) under In-Plane Bending
T-, Y- and Cross-Connections
 
</td><td>Limit State: Chord Plastification
$M_n \sin\theta = 5.39 F_y t^2 \gamma^{0.5} \beta D_b Q_f$ (K3-1)
$\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)</td></tr>
<tr><td>Limit State: Shear Yielding (Punching),
When $D_b < (D - 2t)$
$M_n = 0.6 F_y t D_b^2 \left(\frac{1 + 3\sin\theta}{4\sin^2\theta} \right)$ (K3-2)
$\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Branch(es) under Out-of-Plane Bending
T-, Y- and Cross-Connections
 
</td><td>Limit State: Chord Plastification
$M_n \sin\theta = F_y t^2 D_b \left(\frac{3.0}{1 - 0.81\beta} \right) Q_f$ (K3-3)
$\phi = 0.90$ (LRFD) $\Omega = 1.67$ (ASD)</td></tr>
<tr><td>Limit State: Shear Yielding (Punching),
When $D_b < (D - 2t)$
$M_n = 0.6 F_y t D_b^2 \left(\frac{3 + \sin\theta}{4\sin^2\theta} \right)$ (K3-4)
$\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)</td></tr>
</table>

For T-, Y- and cross-connections, with branch(es) under combined axial load, in-plane bending and out-of-plane bending, or any combination of these load effects:

$$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r\text{-}ip}}{M_{c\text{-}ip}} \right)^2 + \left(\frac{M_{r\text{-}op}}{M_{c\text{-}op}} \right) \le 1.0 \qquad \text{(K3-5)}$$

$M_{c\text{-}ip}$ = ϕM_n = design flexural strength for in-plane bending from Table K3.1, kip-in. (N-mm)
= M_n/Ω = allowable flexural strength for in-plane bending from Table K3.1, kip-in. (N-mm)
$M_{c\text{-}op}$ = ϕM_n = design flexural strength for out-of-plane bending from Table K3.1, kip-in. (N-mm)
= M_n/Ω = allowable flexural strength for out-of-plane bending from Table K3.1, kip-in. (N-mm)
$M_{r\text{-}ip}$ = required flexural strength for in-plane bending, using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kip-in. (N-mm)
$M_{r\text{-}op}$ = required flexural strength for out-of-plane bending, using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kip-in. (N-mm)
P_c = ϕP_n = design axial strength from Table K2.1, kips (N)
= P_n/Ω = allowable axial strength from Table K2.1, kips (N)
P_r = required axial strength using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kips (N)

جدول ۱۱ ـ ۶ ـ الف
(ادامه)

FUNCTIONS

Q_f = 1 for chord (connecting surface) in tension

$= 1.0 - 0.3U(1 + U)$ for HSS (connecting surface) in compression (K1-5)

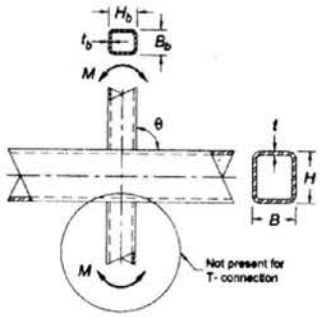
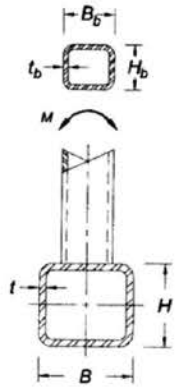
$$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right|,$$ where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the lower compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS. (K1-6)

$P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD.

جدول ۱۱ ـ ۶ ـ ب
محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۶ ـ الف

Branch angle:	θ	$\geq 30°$
Chord wall slenderness:	D/t	≤ 50 for T- and Y-connections
	D/t	≤ 40 for cross-connections
Branch wall slenderness:	D_b/t_b	≤ 50
	D_b/t_b	$\leq 0.05E/F_{yb}$
Width ratio:	0.2	$< D_b/D \leq 1.0$
Material strength:	F_y and F_{yb}	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u and F_{yb}/F_{ub}	≤ 0.8

جدول ۱۱ ـ ۷ ـ الف
لنگر مجاز اتصالات مقاطع قوطی ـ اتصال صلب

Connection Type	Connection Available Flexural Strength
Branch(es) under In-Plane Bending T- and Cross-Connections 	Limit State: Chord Wall Plastification, When $\beta \le 0.85$ $M_n = F_y t^2 H_b \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)}\right] Q_f$ (K3-6) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Sidewall Local Yielding, When $\beta > 0.85$ $M_n = 0.5\, F_y^* t (H_b + 5t)^2$ (K3-7) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Local Yielding of Branch/Branches Due to Uneven Load Distribution, When $\beta > 0.85$ $M_n = F_{yb}\left[Z_b - \left(1 - \frac{b_{eoi}}{B_b}\right) B_b H_b t_b\right]$ (K3-8) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)
Branch(es) under Out-of-Plane Bending T- and Cross-Connections 	Limit State: Chord Wall Plastification, When $\beta \le 0.85$ $M_n = F_y t^2 \left[\frac{0.5 H_b (1+\beta)}{(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2BB_b(1+\beta)}{(1-\beta)}}\right] Q_f$ (K3-9) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Sidewall Local Yielding, When $\beta > 0.85$ $M_n = F_y^* t (B - t)(H_b + 5t)$ (K3-10) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)
	Limit State: Local Yielding of Branch/Branches Due to Uneven Load Distribution, When $\beta > 0.85$ $M_n = F_{yb}\left[Z_b - 0.5\left(1 - \frac{b_{eoi}}{B_b}\right)^2 B_b^2 t_b\right]$ (K3-11) $\phi = 0.95$ (LRFD) $\Omega = 1.58$ (ASD)

جدول ۱۱ ـ ۷ ـ الف
(ادامه)

Connection Type	Connection Available Flexural Strength
Branch(es) under Out-of-Plane Bending T- and Cross-Connections (continued)	Limit State: Chord Distortional Failure, for T-Connections and Unbalanced Cross-Connections $M_n = 2F_y t\left[H_b t + \sqrt{BHt(B+H)}\right]$ (K3-12) $\phi = 1.00$ (LRFD) $\Omega = 1.50$ (ASD)

For T- and cross-connections, with branch(es) under combined axial load, in-plane bending and out-of-plane bending, or any combination of these load effects:

$$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r\text{-}ip}}{M_{c\text{-}ip}}\right) + \left(\frac{M_{r\text{-}op}}{M_{c\text{-}op}}\right) \le 1.0 \quad \text{(K3-13)}$$

$M_{c\text{-}ip}$ = ϕM_n = design flexural strength for in-plane bending from Table K3.2, kip-in. (N-mm)
= M_n/Ω = allowable flexural strength for in-plane bending from Table K3.2, kip-in. (N-mm)
$M_{c\text{-}op}$ = ϕM_n = design flexural strength for out-of-plane bending from Table K3.2, kip-in. (N-mm)
= M_n/Ω = allowable flexural strength for out-of-plane bending from Table K3.2, kip-in. (N-mm)
$M_{r\text{-}ip}$ = required flexural strength for in-plane bending, using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kip-in. (N-mm)
$M_{r\text{-}op}$ = required flexural strength for out-of-plane bending, using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kip-in. (N-mm)
P_c = ϕP_n = design axial strength from Table K2.2, kips (N)
= P_n/Ω = allowable axial strength from Table K2.2, kips (N)
P_r = required axial strength using LRFD or ASD load combinations, as applicable, kips (N)

FUNCTIONS

Q_f = 1 for chord (connecting surface) in tension (K1-15)

$= 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \le 1.0$ for chord (connecting surface) in compression (K1-16)

$U = \left|\frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c S}\right|$, where P_{ro} and M_{ro} are determined on the side of the joint that has the lower compression stress. P_{ro} and M_{ro} refer to required strengths in the HSS. (K1-6)
$P_{ro} = P_u$ for LRFD; P_a for ASD. $M_{ro} = M_u$ for LRFD; M_a for ASD.

F_y^* = F_y for T-connections and = $0.8F_y$ for cross-connections

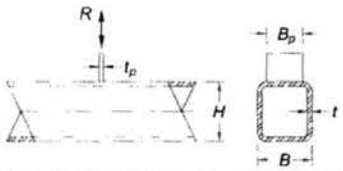
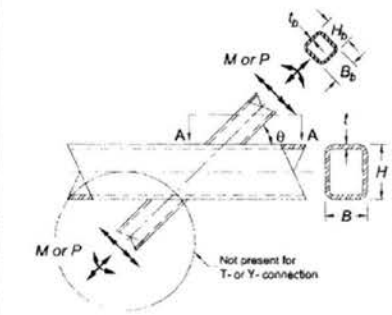
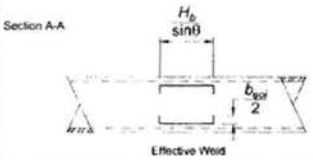
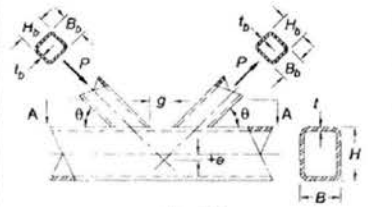
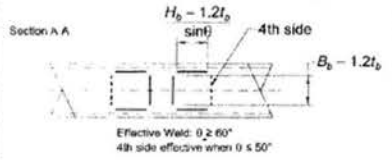
$$b_{eo} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \le B_b \quad \text{(K2-13)}$$

جدول ۱۱ ـ ۷ ـ ب

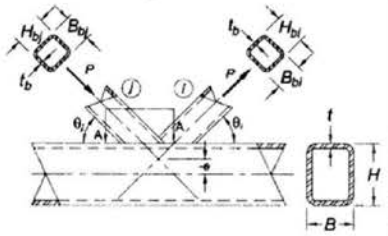
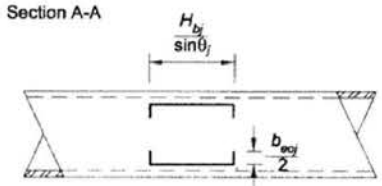
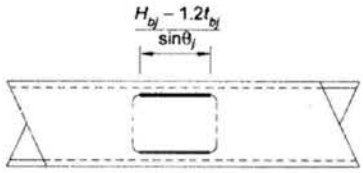
محدودیت‌های جدول ۱۱ ـ ۷ ـ الف

Branch angle:	θ	$\cong 90°$
Chord wall slenderness:	B/t and H/t	≤ 35
Branch wall slenderness:	B_b/t_b and H_b/t_b	≤ 35
		$\leq 1.25\sqrt{\frac{E}{F_{yb}}}$
Width ratio:	B_b/B	≥ 0.25
Aspect ratio:	0.5	$\leq H_b/B_b \leq 2.0$ and $0.5 \leq H/B \leq 2.0$
Material strength:	F_y and F_{yb}	≤ 52 ksi (360 MPa)
Ductility:	F_y/F_u and F_{yb}/F_{ub}	≤ 0.8

جدول ۱۱ ـ ۸
مشخصات جوش

Connection Type	Connection Weld Strength
Transverse Plate T- and Cross-Connections Under Plate Axial Load 	Effective Weld Properties $I_e = 2\left(\frac{10}{B/t}\right)\left(\frac{F_y t}{F_{yp} t_p}\right) B_p \le 2B_p$ (K4-4) where I_e = total effective weld length for welds on both sides of the transverse plate
T-, Y- and Cross-Connections Under Branch Axial Load or Bending  	Effective Weld Properties $I_e = \frac{2H_b}{\sin\theta} + 2b_{eoi}$ (K4-5) $S_{ip} = \frac{t_w}{3}\left(\frac{H_b}{\sin\theta}\right)^2 + t_w b_{eoi}\left(\frac{H_b}{\sin\theta}\right)$ (K4-6) $S_{op} = t_w\left(\frac{H_b}{\sin\theta}\right)B_b + \frac{t_w}{3}\left(B_b^2\right) - \frac{(t_w/3)(B_b - b_{eoi})^3}{B_b}$ (K4-7) $b_{eoi} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \le B_b$ (K2-13) When $\beta > 0.85$ or $\theta > 50°$, $b_{eoi}/2$ shall not exceed $2t$.
Gapped K-Connections Under Branch Axial Load  	Effective Weld Properties When $\theta \le 50°$: $I_e = \frac{2(H_b - 1.2t_b)}{\sin\theta} + 2(B_b - 1.2t_b)$ (K4-8) When $\theta \ge 60°$: $I_e = \frac{2(H_b - 1.2t_b)}{\sin\theta} + (B_b - 1.2t_b)$ (K4-9) When $50° < \theta < 60°$, linear interpolation shall be used to determine I_e.

جدول ۱۱ ـ ۸
(ادامه)

Connection Type	Connection Weld Strength
Overlapped K-Connections under Branch Axial Load	Overlapping Member Effective Weld Properties (all dimensions are for the overlapping branch, *i*)
	When 25% ≤ O_v < 50%: $$l_{e,i}=\frac{2O_v}{50}\left[\left(1-\frac{O_v}{100}\right)\left(\frac{H_{bi}}{\sin\theta_i}\right)+\frac{O_v}{100}\left(\frac{H_{bi}}{\sin(\theta_i+\theta_j)}\right)\right]+b_{eoi}+b_{eov}$$ (K4-10)
Note that the force arrows shown for overlapped K-connections may be reversed; *i* and *j* control member identification	When 50% ≤ O_v < 80%: $$l_{e,i}=2\left[\left(1-\frac{O_v}{100}\right)\left(\frac{H_{bi}}{\sin\theta_i}\right)+\frac{O_v}{100}\left(\frac{H_{bi}}{\sin(\theta_i+\theta_j)}\right)\right]+b_{eoi}+b_{eov}$$ (K4-11)
	When 80% ≤ O_v ≤ 100%: $$l_{e,i}=2\left[\left(1-\frac{O_v}{100}\right)\left(\frac{H_{bi}}{\sin\theta_i}\right)+\frac{O_v}{100}\left(\frac{H_{bi}}{\sin(\theta_i+\theta_j)}\right)\right]+B_{bi}+b_{eov}$$ (K4-12)
Section A-A  Effective Weld: Eq. K4-13 When $\frac{B_{bi}}{B}\le 0.85$ and $\theta_i \le 50°$	$$b_{eoi}=\frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{ybi}t_{bi}}\right)B_{bi}\le B_{bi}$$ (K2-20)
	$$b_{eov}=\frac{10}{B_{bj}/t_{bj}}\left(\frac{F_{ybj}t_{bj}}{F_{ybi}t_{bi}}\right)B_{bi}\le B_{bi}$$ (K2-21)
	when $B_{bi}/B_b > 0.85$ or $\theta_i > 50°$, $b_{eoi}/2$ shall not exceed $2t$ and when $B_{bi}/B_{bj} > 0.85$ or $(180 - \theta_i - \theta_j) > 50°$, $b_{eov}/2$ shall not exceed $2t_{bj}$
 Effective Weld: When $\frac{B_{bi}}{B} > 0.85$ or $\theta_j > 50°$	Subscript *i* refers to the overlapping branch Subscript *j* refers to the overlapped branch
	$$l_{e,i}=\frac{2H_{bj}}{\sin\theta_j}+2b_{eoj}$$ (K4-13)
	$$b_{eoj}=\frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{ybj}t_{bj}}\right)B_{bj}\le B_{bj}$$ (K4-14)
	When $B_{bj}/B > 0.85$ or $\theta_j > 50°$, $l_{e,j} = 2\,(H_{bj} - 1.2t_{bj})/\sin\theta_j$

۱۲ جوش درزهای استاندارد

راهنمای استفاده از جدول‌های درزهای استاندارد

شماره مشخص‌کننده انواع درز

۱ ـ شیار ساده
۲ ـ شیار جناغی
۳ ـ شیار جناغی دوطرفه
۴ ـ شیار نیم‌جناغی
۵ ـ شیار نیم‌جناغی دوطرفه
۶ ـ شیار لاله‌ای
۷ ـ شیار لاله‌ای دوطرفه
۸ ـ شیار نیم‌لاله‌ای
۹ ـ شیار نیم‌لاله‌ای دوطرفه
۱۰ ـ شیار پیشانی

علایم اختصاری فرآیندهای جوشکاری

SM = جوش قوس الکتریکی با الکترود دستی (SMAW)
S = جوش زیرپودری (SAW)
G = جوش تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی (GMAW)

علایم اختصاری وضعیت‌های جوشکاری

F = تخت
V = قائم
ALL = تمام وضعیت‌ها
H = افقی
OH = سقفی

علامت اختصاری تذکرات فنی

A : برای جوش گاز با مدار کوتاه مناسب نیست.

B : جوشکاری از یک طرف درز انجام می‌شود.

C : قبل از جوشکاری طرف دیگر ریشه جوش، تا رسیدن به‌فلز سالم سنگ زده شود.

E : حداقل اندازهٔ گلوگاه مؤثر مندرج در آیین‌نامه.

J : اگر از جوش گوشه برای تقویت جوش شیاری در اتصالات سپری یا کنج استفاده می‌شود باید اندازهٔ آن $\frac{1}{4}T_1$ در نظر گرفته شود ولی از ۱۰ میلی‌متر بیشتر نباشد.

L : جوش‌های لب به‌لب و گونیا در پل‌سازی پیش‌آزموده نیستند.

M : جوش‌های شیاری دوطرفه می‌توانند عمق‌های نامساوی داشته باشند ولی در هیچ حالت نباید عمق شیار از $\frac{1}{4}$ ضخامت قطعه نازکتر، کمتر باشد.

N : زاویهٔ دو قطعه اتصال می‌تواند بین ۱۳۵ درجه تا ۱۸۰ درجه تغییر یابد به‌شرط آنکه زاویهٔ شیار ثابت باقی مانده و ضخامت گلوگاه مؤثر حفظ شود.

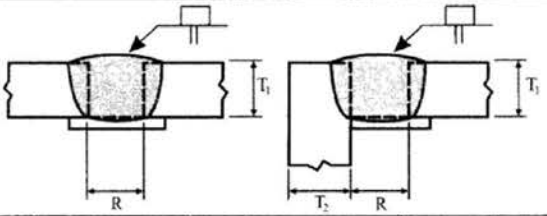
Q : در جوش‌های سپری و گونیا زاویهٔ بین دو قطعه می‌تواند تغییر یابد به‌شرط آنکه زاویهٔ شیار ثابت باقی‌مانده مشخص گردد.

R : زاویهٔ بین قطعات اتصال در اتصال کنج می‌تواند از ۴۵ تا ۱۳۵ درجه و اتصال سپری از ۴۵ تا ۹۰ درجه تغییر یابد به‌شرط آنکه هندسهٔ اصلی درز و ضخامت گلوگاه حفظ شود.

Z : اندازهٔ گلوگاه مؤثر براساس جوش‌هایی که سطح آنها مسطح است تعیین می‌شود.

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

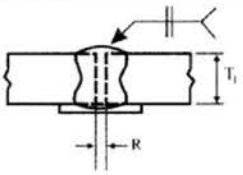
(I) جوش شیاری ساده
(B) اتصال لب به‌لب
(C) اتصال کنج (گونیا)



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-L 1a	6 max	–	$R=T_1$	+2 , −0	+6 , −2	All	N
	C-L 1a	6 max	U	$R=T_1$	+2 , −0	+6 , −2	All	–
GMAW	B-L 1a-GF	10 max	–	$R=T_1$	+2 , −0	+6 , −2	All	A,N

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود (به‌جز B-L1-S)

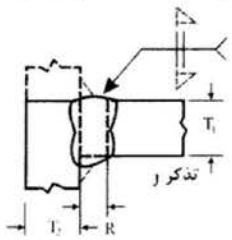
(I) جوش شیاری ساده
(B) اتصال لب به‌لب



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-L1b	6 max	–	$R=T_1/2$	+2 , −0	+2 , −3	All	C,N
GMAW	B-L1b-GF	10 max	–	R=0 تا 3	+2 , −0	+2 , −3	All	A,C,N
SAW	B-L 1-S	10 max	–	R=0	±0	+2 , −0	F	N
SAW	B-L 1a-S	16 max	–	R=0	±0	+2 , −0	F	C,N

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود (به‌جز B-L1-S)

(I) جوش شیاری ساده
(T) اتصال سپری
(C) اتصال کنج

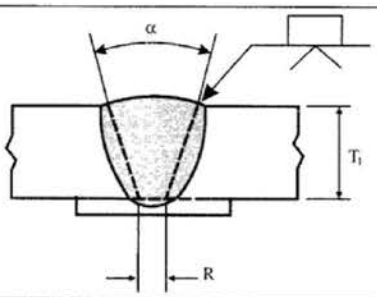


فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	TC-L1b	6 max	U	$R=T_1/2$	+2 , −0	+2 , −3	All	C,J
GMAW	TC-L1-GF	10 max	U	R=0 تا 3	+2 , −0	+2 , −3	All	A,C,J
SAW	TC-L1-S	10 max	U	R=0	±0	+2 , −0	F	J,C

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

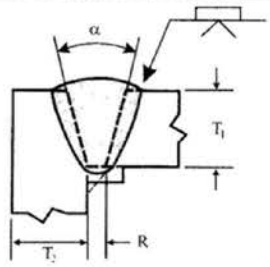
جوش شیاری جناغی (2)
اتصال لب به‌لب (B)



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+6 , −2	R=+2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°

فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود =U)		آماده‌سازی درز		وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شکاف		
SMAW	B-U2a	U	–	R=6	α=45°	All	N
				R=10	α=30°	F,V,OH	N
				R=12	α=20°	F,V,OH	N
GMAW	B-U2a-GF	U	–	R=5	α=30°	F,V,OH	A,N
				R=10	α=30°	F,V,OH	A,N
				R=6	α=45°	F,V,OH	A,N
SAW	B-L2a-S	50max	–	R=6	α=30°	F	N
SAW	B-U2-S	U	–	R=16	α=20°	F	N

جوش شیاری جناغی (2)
اتصال کنج (C)



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+6 , −2	R=+2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°

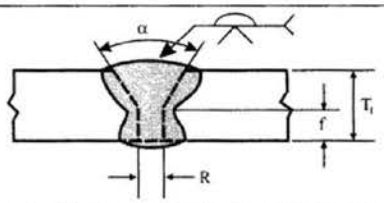
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود =U)		آماده‌سازی درز		وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شکاف		
SMAW	C-U2a	U	U	R=6	α=45°	All	Q
				R=10	α=30°	F,V,OH	Q
				R=12	α=20°	F,V,OH	Q
GMAW	B-U2a-GF	U	U	R=5	α=30°	F,V,OH	A
				R=10	α=30°	F,V,OH	A,Q
				R=6	α=45°	F,V,OH	A,Q
SAW	C-L2a-S	50max	U	R=6	α=30°	F,V,OH	Q
SAW	C-U2-S	U	U	R=16	α=20°	F	Q

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش شیاری جناغی (2)
اتصال لب به‌لب (B)

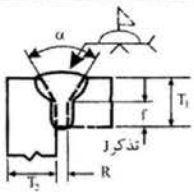
ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود.



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه / ضخامت ریشه / زاویهٔ شیار	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-U2	26mm	–	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=60°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	C,N
GMAW	B-U2-GF	U	–	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=60°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	A,C,N
SAW	B-L2c-S	بین 12 تا 25	–	R=0 ، α=60° f=6max			F	C,N
		بین 25 تا 38	–	R=0 ، α=60° f=12max	R=±0 f=+0 ، −f	+1.5−0 ±1.5		
		بین 38 تا 50	–	R=0 ، α=60° f=16max	α=+10° ، −0°	+10° ، −5°		

جوش شیاری جناغی (2)
اتصال کنج (C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود.

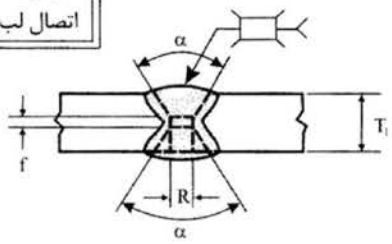


فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه / ضخامت‌ریشه / زاویهٔ شیار	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	C-U2	U	U	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=60°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	C,J,R
GMAW	C-U2-GF	U	U	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=60°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	A,C,J,R
SAW	C-U2b-S	U	U	R=0 f=6max α=60°	±0 +0 ، −6 +10° ، −0°	+2 ، −0 ±2 +10° ، −5°	F	C,J,R

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش جناغی دوطرفه (3)
اتصال لب به‌لب (B)

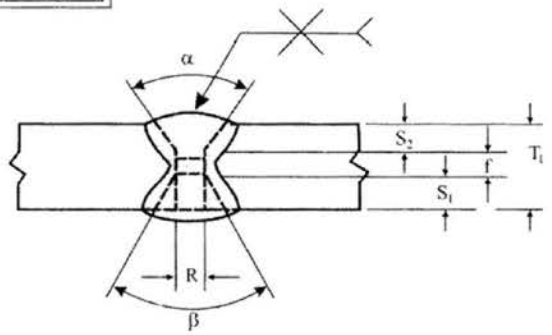


ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده دوباره با جوش پُر شود

رواداری‌ها		در طراحی	در مونتاژ
		R=±0	+6 ، −0
		f=±0	+2 ، −0
		α=+10° ، −0°	+10° ، −5°
فاصله دهنده	SAW	±0	+2 ، −0
	SMAW	±0	+3 ، −0

فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: ضخامت ریشه	آماده‌سازی درز: زاویهٔ شیار	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-U3a	U فاصله‌دهنده =1/8×R	—	R=6	f=0 تا 3	α=45°	All	C,M,N
				R=10	f=0 تا 3	α=30°	F,OH,V	
				R=12	f=0 تا 3	α=20°	F,OH,V	
SAW	B-U3a-S	U فاصله‌دهنده =1/4×R	—	R=16	f=0 تا 6	α=20°	F	C,M,N

جوش جناغی دوطرفه (3)
اتصال لب به‌لب (B)



ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده دوباره با جوش پُر شود.

فقط برای B-U3c-S

T_1 از	T_1 تا	S_1
50	60	35
60	70	45
75	90	55
90	100	60
100	120	70
120	140	80
140	160	95

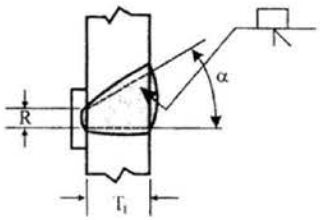
$T_1 \le 50$ یا $T_1 > 160$
برای $S_1 = 2/3(T_1 - 6)$

فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه / ضخامت‌ریشه / زاویهٔ شیار	رواداری‌ها: در طراحی	رواداری‌ها: در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-U3b	U	—	R=0 تا 3	+2 ، −0	+2 ، −3	All	C,M,N
GMAW	B-U3-GF			f=0 تا 3 α=β=60°	+2 ، −0 +10° ، −0	بدون محدودیت +10° ، −5°	All	A,C,M,N
SAW	B-U3c-S	U	—	R=0 f=6 min α=β=60°	+2 ، −0 +6 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −0 +6 ، −0 +10° ، −5°	F	C,M,N
				برای تعیین S_1 به‌جدول فوق مراجعه کنید $S_2 = T_1 - (S_1 + f)$				

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

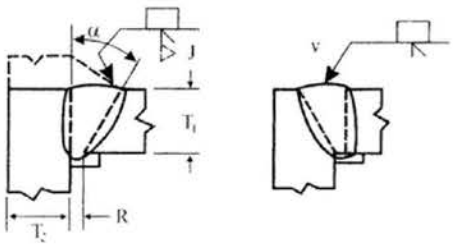
جوش نیم‌جناغی یکطرفه (4)
اتصال لب به‌لب (B)



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+6 , −2	R=+2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°

فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز		وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شیار		
SMAW	B-U4a	U	–	R=6	α=45°	All	Br,N
				R=10	α=30°	All	Br,N
GMAW	B-U4a-GF	U	–	R=5	α=30°	All	A,Br,N
				R=6	α=45°	All	A,Br,N
				R=10	α=30°	F	A,Br,N

جوش نیم‌جناغی یکطرفه (4)
اتصال گونیا (T)
اتصال کنج (C)



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+6 , −2	R=+2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°

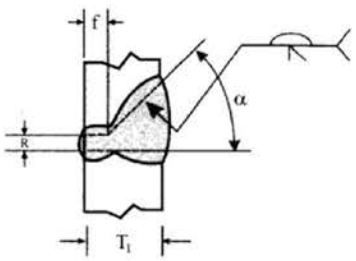
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز		وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شکاف		
SMAW	TC-U4a	U	U	R=6	α=45°	All	J,Q,V
				R=10	α=30°	F,OH,H	J,Q,V
GMAW	TC-U4a-GF	U	U	R=5	α=30°	All	A,J,Q,V
				R=10	α=30°	F	A,J,Q,V
				R=6	α=45°	All	A,J,Q,V
SAW	TC-U4a-S	U	U	R=10	α=30°	F	J,Q,V
				R=6	α=45°		

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش نیم‌جناغی یکطرفه (4)
اتصال لب به‌لب (B)

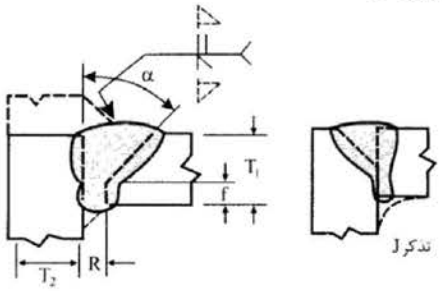
ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود.



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت ریشه زاویهٔ شیار	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	B-U4b	U	–	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=45°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	Br,C,N
GMAW	B-U4a-GF	U	–				All	A,Br,C,N

جوش نیم‌جناغی یکطرفه (4)
اتصال گونیا (T)
اتصال کنج (C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود.



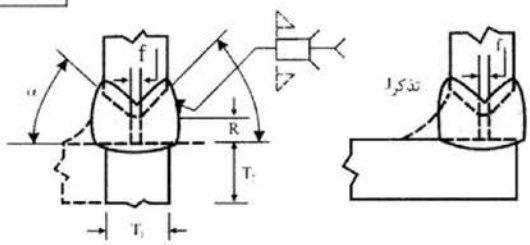
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت ریشه زاویهٔ شیار	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
SMAW	TC-U4b	U	U	R=0 تا 3 f=0 تا 3 α=45°	+2 ، −0 +2 ، −0 +10° ، −0°	+2 ، −3 بدون محدودیت +10° ، −5°	All	C,J,R,V
GMAW	TC-U4b-GF	U	U				All	A,C,J, R,V
SAW	TC-U4b-S	U	U	R=0 f=6 max α=60°	±0 +0 ، −3 +10° ، −0°	+6 ، −0 ±2 +10° ، −5°	F	C,J,R,V

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
$+2\ ,\ -0$	$R=\pm 0$
± 2	$f=+2\ ,\ -0$
$+10^\circ\ ,\ -5^\circ$	$\alpha=+10^\circ\ ,\ -0^\circ$
$+2\ ,\ -0$	فاصله $=+0$

ریشه جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود



(5) جوش نیم‌جناغی دوطرفه
(B) اتصال لب به‌لب
(T) اتصال گونیا
(C) اتصال کنج

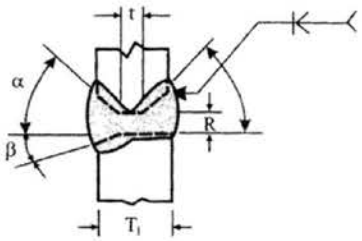
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز			وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	ضخامت ریشه	زاویهٔ شیار		
SMAW	B-U5b	U فاصله $=R/8$	U	$R=6$	f=0 تا 3	$\alpha=45^\circ$	All	Br,C, M,N
	TC-U5a	U فاصله $=R/8$	U	$R=6$	f=0 تا 3	$\alpha=45^\circ$	All	C,J, M,R,V
				$R=10$	f=0 تا 3	$\alpha=30^\circ$	F,OH	C,J,M, R,V

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش نیم‌جناغی دوطرفه (5)
اتصال لب به‌لب (B)

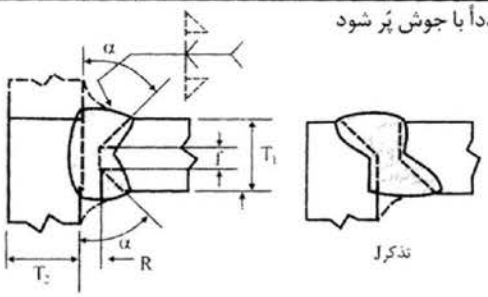
ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده و مجدداً با جوش پُر شود.



تذکر	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: روادارها: در مونتاژ	آماده‌سازی درز: روادارها: در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه: ضخامت ریشه	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه: زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U): T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U): T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
Br,C, M,N	All	+2 ، −3 بدون محدودیت $\alpha+\beta$، +10° −5°	+2 ، −0 +2 ، −0 $\alpha+\beta$، +10° −0°	R=0 تا 3 f=0 تا 3	α=45° β=0° تا 15°	--	U	B-U5a	SMAW
A,Br,C, M,N	All	+2 ، −3 بدون محدودیت $\alpha+\beta$= +10° ، −5°	+2 ، −0 +2 ، −0 $\alpha+\beta$= +10° ، −0°	R=0 تا 3 f=0 تا 3	α=45° β=0° تا 15°	--	U	B-U5-GF	GMAW

جوش نیم‌جناغی دوطرفه (5)
اتصال سپری (T)
اتصال کنج (C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده مجدداً با جوش پُر شود



تذکر	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: روادارها: در مونتاژ	آماده‌سازی درز: روادارها: در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه: ضخامت ریشه	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه: زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U): T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U): T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
G,J,M, R,V	All	+2 ، −5 بدون محدودیت	+2 ، −0 +2 ، −0	R=0 تا 3 f=0 تا 3	α=45°	U	U	TC-U5b	SMAW
A,C,J, M,R,V	All	+10° ، −5°	+10° ، −0°			U	U	TC-U5-GF	GMAW
G,J,M R,V	F	+2 ، −3 ±2 +10° ، −5°	±0 +0 ، −5 +10° ، −0°	R=0 f=5 max	α=60°	U	U	TC-U5-S	SAW

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.

(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

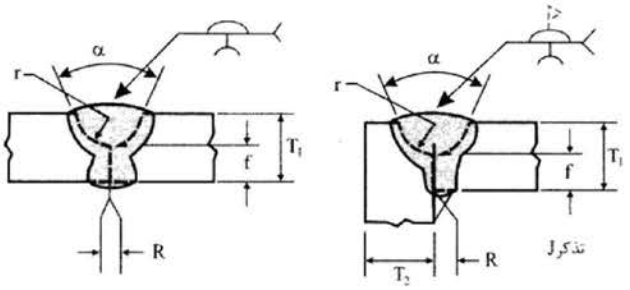
جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش لاله‌ای یکطرفه	(6)
اتصال لب به‌لب	(B)
اتصال کنج	(C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته مجدداً با جوش پُر شود

ریشهٔ جوش از پشت برداشته مجدداً با جوش پُر شود

رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+2 , −3	R=±2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°
نامحدود	f=±2
+3 , −0	r=+3 , −0

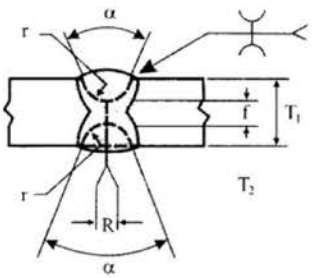


فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز				وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شیار	ضخامت ریشه	شعاع شیار		
SMAW	B-U6	U	U	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=6	All	C,N
				R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	F,OH	C,N
	C-U6	U	U	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=6	All	C,J,R
				R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	F,OH	C,J,R
SMAW	B-U6-GF	U	U	R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	All	A,C,N
	C-U6-GF	U	U	R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	All	A,C,J,R

جوش لاله‌ای دوطرفه	(7)
اتصال لب به‌لب	(B)

رواداری‌ها برای B-U7 و B-U7-GF	
در مونتاژ	در طراحی
+2 , −3	R=+2 , −0
+10° , −5°	α=+10° , −0°
بدون محدودیت	f=+2 , −0
±2	f=+6 , −0

رواداری‌ها برای B-U7-S	
در مونتاژ	در طراحی
+2 , −0	R=±0
±2	f=+0 , −6



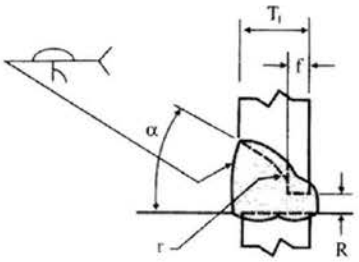
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز				وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شیار	ضخامت ریشه	شعاع شیار		
SMAW	B-U7	U	—	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=6	All	C,M,N
				R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	F,OH	C,M,N
GMAW	B-U7-GF	U	—	R=0 تا 3	α=20°	f=3	r=6	All	A,C,M,N
SAW	B-U7-S	U	—	R=0	α=20°	f=6max	r=6	F	C,M,N

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش نیم‌لاله‌ای یکطرفه (8)
اتصال لب به‌لب (B)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده
مجدداً با جوش پر شود

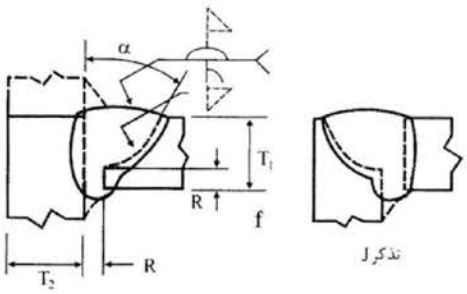


رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+2 , −3	R=± 2 , −0
+ 10° , −5°	α=+ 10° , −0°
نامحدود	f=+2 , −0
± 2	r=+6 , −0

فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز				وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شیار	ضخامت ریشه	شعاع شیار		
SMAW	B-U8	U	—	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=10	All	Br,C,N
GMAW	B-U8-GF	U	—	R=0 تا 3	α=30°	f=3	r=10	All	A,Br,C,N

جوش نیم‌لاله‌ای یکطرفه (8)
اتصال گونیا (T)
اتصال کنج (C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته و مجدداً با جوش پُر شود



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
+2 , −3	R=+2 , −0
+ 10° , −5°	α=+ 10° , −0°
بدون محدودیت	f=+ 2 , −0
± 2	r=+6 , −0

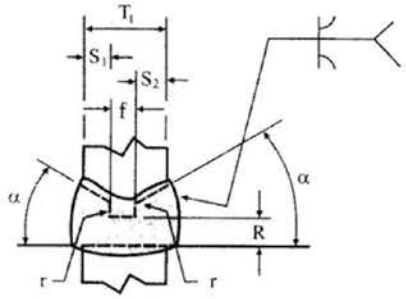
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز				وضعیت‌های مجاز جوشکاری	تذکر
		T_1	T_2	شکاف ریشه	زاویهٔ شیار	ضخامت ریشه	شعاع شیار		
SMAW	TC-U8a	U	U	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=10	All	C,J,R,V
				R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=10	F,OH	C,J,R,V
GMAW	B-U8a-GF	U	U	R=0 تا 3	α=45°	f=3	r=10	All	A,C,J, R,V

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.
(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ کامل

جوش نیم‌لاله‌ای دوطرفه (9)
اتصال لب به‌لب (B)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده
و مجدداً با جوش پُر شود

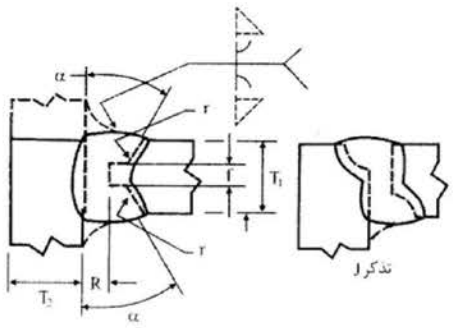


رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
−3 , +2	R=± 2 , −0
−5° , +10°	α=+ 10° , −0°
نامحدود	f=+ 2 , −0
± 2	r=+3 , −0

تذکر	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز				ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
		شعاع شیار	ضخامت ریشه	زاویهٔ شیار	شکاف ریشه	T_2	T_1		
Br,C,M,N	All	r=10	f=3	α=45°	R=0 تا 3	–	U	B-U9	SMAW
A,Br,C, M,N	All	r=10	f=3	α=30°	R=0 تا 3	–	U	B-U9-GF	GMAW

جوش نیم‌لاله‌ای دوطرفه (9)
اتصال سپری (T)
اتصال کنج (C)

ریشهٔ جوش از پشت برداشته شده
و مجدداً با جوش پُر شود



رواداری‌ها	
در مونتاژ	در طراحی
−3 , +2	R=+ 2 , −0
−5° , +10°	α=+ 10° , −0°
نامحدود	f=+ 2 , −0
± 2	r=+3 , −0

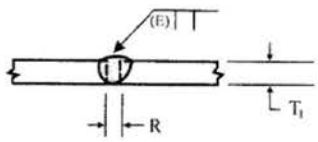
تذکر	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز				ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
		شعاع شیار	ضخامت ریشه	زاویهٔ شیار	شکاف ریشه	T_2	T_1		
C,J,M, R,V	All	r=10	f=3	α=45°	R=0 تا 3	U	U	TC-U9a	SMAW
C,J,M, R,V	F,OH	r=10	f=3	α=30°	R=0 تا 3				
A,C,J, M,R,V	All	r=10	f=3	α=30°	R=0 تا 3	U	U	B-U9a-GF	GMAW

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.
(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

(1) جوش شیاری ساده
(B) اتصال لب به‌لب

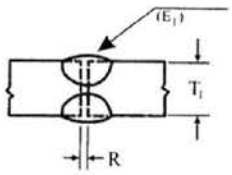
گردهٔ جوش ۱ تا ۳ میلی‌متر بدون رواداری



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
SMAW	B-P1a	3 max	–	R = 0 تا 1.5	+2، −0	± 2	All	$T_1 - 1$	B
SMAW	B-P1c	6 max	–	$R = \frac{T_1}{2}$ min	+2، −0	± 2	All	$\frac{T_1}{2}$	B

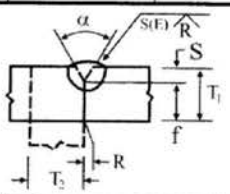
(1) جوش شیاری ساده
(B) اتصال لب به‌لب

$E_2 + E_1$ نباید از $\frac{3T_1}{4}$ بیشتر باشد



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
SMAW	B-P1b	6 max	–	$R = \frac{T_1}{2}$	+2، −0	± 2	All	$\frac{3T_1}{4}$	

(2) جوش جناغی
(B) اتصال لب به‌لب
(C) اتصال کنج



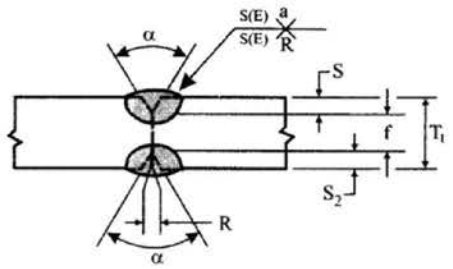
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه / ضخامت ریشه / زاویهٔ شیار	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
SMAW	BC-P2	6 min	U	R = 0 f = 1 min α = 60°	0 ، + 2 بدون محدودیت +10°، −0°	+3 ، −2 ± 2 +10°، −5°	All	S	B,E, Q2
GMAW	BC-P2-GF	6 min	U	R = 0 f = 3 min α = 60°	0 ، + 2 بدون محدودیت +10°، −0°	+3 ، −2 ± 2 +10°، −5°	All	S	A,B,E Q2
SAW	BC-P2-S	11 min	U	R = 0 f = 6 min α = 60°	±0 بدون محدودیت +10°، −0°	+2 ، −0 ± 2 +10°، −5°	F	S	B,E, Q2

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.

(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

جوش جناغی دوطرفه (3)
اتصال لب به‌لب (B)



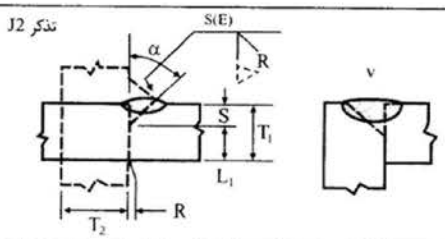
فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز			وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
				شکاف ریشه	روادارى‌ها				
		T_1	T_2	ضخامت ریشه زاویهٔ شیار	در طراحی	در مونتاژ			
SMAW	B-P3	12 min	–	R=0 f=3 min α=60°	+2 , −0 بدون محدودیت +10°, −0°	+3 , −2 ± 2 +10°, −5°	All	S	E,Mp, Q2
GMAW	B-P3-GF	12 min	–	R=0 f=3 min α=60°	+2 , −0 بدون محدودیت +10°, −0°	+3 , −2 ± 2 +10°, −5°	All	S	A,E, Mp,Q2
SAW	B-P3-S	20 min	–	R=0 f=6 min α=60°	±0 بدون محدودیت +10°, −0°	+2 , −0 ± 2 +10°, −5°	F	S	E,Mp, Q2

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.

(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

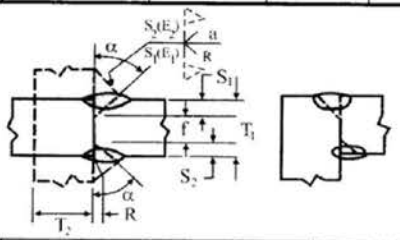
جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

(4) جوش نیم‌جناغی یکطرفه
(B) اتصال لب به‌لب
(T) اتصال سپری
(C) اتصال کنج



تذکر	گلوگاه مؤثر (E)	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت‌ریشه زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
B,E,J2 Q2,V	S-3	All	+3,−2 ±2 +10°,−5°	+2,−0 بدون‌محدودیت +10°,−0°	R=0 f=3 min α=45°	U	U	BTC-P4	SMAW
A,B,E, J2,Q2, V	S	F,H	+3,−2	+2,−0	R=0	U	6 min	BTC-P4-GF	GMAW
	S-3	V,OH	±2 +10°,−5°	بدون‌محدودیت +10°,−0°	f=3 min α=45°				
B,E,J2, Q2,V	S	F	+2,−0 ±2 +10°,−5°	±0 بدون‌محدودیت +10°,−0°	R=0 f=6 min α=60°	U	11 min	TC-P4-S	SAW

(5) جوش نیم‌جناغی دوطرفه
(B) اتصال لب به‌لب
(T) اتصال گونیا
(C) اتصال کنج

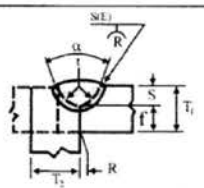


تذکر	گلوگاه مؤثر (E)	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت‌ریشه زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
E,J2, L,Mp, Q2,V	(S_1+S_2) −6	All	+3,−2 ±2 +10°,−5°	+2,−0 بدون‌محدودیت +10°,−0°	R=0 f=3 min α=45°	U	8 min	BTC-P5	SMAW
A,E,J2, L,Mp Q2,V	(S_1+S_2) (S_1+S_2) −6	F,H V,OH	+3,−2 ±2 +10°,−5°	+2,−0 بدون‌محدودیت +10°,−0°	R=0 f=3 min α=45°	U	12 min	BTC-P5-GF	GMAW
E,J2, L,Mp, Q2,V	(S_1+S_2)	F	+2,−0 ±2 +10°,−5°	±0 بدون‌محدودیت +10°,−0°	R=0 f=6 min α=60°	U	20 min	TC-P5-S	SAW

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.
(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

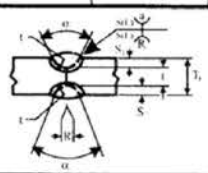
جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

جوش لاله‌ای یکطرفه (6)
اتصال لب به‌لب (B)
اتصال کنج (C)



تذکر	گلوگاه مؤثر (E)	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت‌ریشه زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
B,E, Q2	S	All	+3,−2 ± 2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=1 min r=6 α=45°	U	6 min	BC-P6	SMAW
A,B, E,Q2	S	All	+3,−2 ±2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6 , −0 +10°,−0°	R=0 f=3 min r=6 α=20°	U	6 min	BC-P6-GF	GMAW
B,E, Q2	S	F	+2 ,−0 ± 2 ± 2 +10°,−5°	±0 بدون محدودیت +6 , −0 +10°,−0°	R=0 f=6 min r=6 α=20°	U	11 min	BC-P6-S	SAW

جوش جناغی دوطرفه (7)
اتصال لب به‌لب (B)

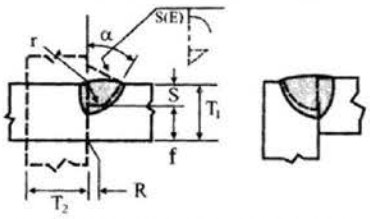


تذکر	گلوگاه مؤثر (E)	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت‌ریشه زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
E,Mp, Q2	(S_1+S_2)	All	+3 , −2 ± 2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=3 min r=6 α=45°	–	12 min	B-P7	SMAW
A,E, Mp,Q2	(S_1+S_2)	All	+3 , −2 ± 2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=3 min r=6 α=20°	–	12 min	B-P7-GF	GMAW
E,Mp, Q2	(S_1+S_2)	F	+2 ,−0 ± 2 ± 2 +10°,−5°	±0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=6 min r=6 α=20°	–	20 min	B-P7-S	SAW

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.
(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

(8) جوش نیم‌لاله‌ای یکطرفه
(B) اتصال لب به‌لب
(C) اتصال کنج
(T) اتصال سپری



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U)		آماده‌سازی درز			وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
				شکاف ریشه	رواداری‌ها				
		T_1	T_2	ضخامت ریشه شعاع شیار زاویهٔ شیار	در طراحی	در مونتاژ			
SMAW	B-P8*	6 min	U	R=0 f=3 min r=10 α=45°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	+3,−2 ±2 ±2 +10°,−5°	All	S	E,J2, Q2,V
SMAW	TC-P8**	6 min	U	R=0 f=3 min r=10 α=30°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	+3,−2 ±2 ±2 +10°,−5°	All	S	E,J2, Q2,V
GMAW	B-P8-GF*	6 min	U	R=0 f=3 min r=10 α=45°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	+3,−2 ±2 ±2 +10°,−5°	All	S	A,E, J2,Q2, V
GMAW FCAW	TC-P8-GF**	6 min	U	R=0 f=3 min r=10 α=30°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	+3,−2 ±2 ±2 +10°,−5°	All	S	A,E, J2,Q2, V
SAW	B-P8-S*	11 min	U	R=0 f=6 min r=12 α=45°	±0 بدون محدودیت +6,−0° +10°,−0°	+2 ,−0 ±2 ±2 +10°,−5°	F	S	E,J2, Q2,V
SAW	TC-P8-S**	11 min	U	R=0 f=6 min r=12 α=20°	±0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	+2 ,−0 ±2 ±2 +10°,−5°	F	S	E,J2, Q2,V

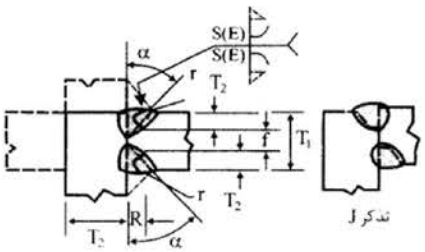
* مربوط به‌جوش‌های کنج داخلی می‌شود.
** مربوط به‌جوش‌های کنج خارجی می‌شود.

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.

(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

(9) جوش نیم‌لاله‌ای دوطرفه
(B) اتصال لب به‌لب
(T) اتصال سپری
(C) اتصال کنج (گونیا)



تذکر	گلوگاه مؤثر (E)	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در مونتاژ	آماده‌سازی درز: رواداری‌ها در طراحی	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت ریشه شعاع شیار زاویهٔ شیار	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_2	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	مشخصهٔ اتصال	فرآیند جوشکاری
E,J2, Mp, Q2,V	S_1+S_2	All	+3,−2 ± 2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 −0 +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=3 min r=10 α=45°	U	12 min	BTC-P9*	SMAW
A,J2, Mp, Q2,V	S_1+S_2	All	+3,−2 ± 2 ± 2 +10°,−5°	+2 ,−0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=3 min r=10 α=30°	U	6 min	BTC-P9-GF*	GMAW
E,J2, Mp, Q2,V	S_1+S_2	F	+2 ,−0 ± 2 ± 2 +10°,−5°	±0 بدون محدودیت +6,−0° +10°,−0°	R=0 f=6 min r=12 α=20°	—	20 min	B-P9-S	SAW
E,J2 Mp, Q2,V	S_1+S_2	F	+2 ,−0 ± 2 ± 2 +10°,−5°	±0 بدون محدودیت +6,−0° +10°,−0°	R=0 f=6 min r=12 α=20°	U	20 min	TC-P9-S**	SAW
E,J2, Mp, Q2	S_1+S_2	F	+2 ,−0 ± 2 ± 2 +10°,−5°	±0 بدون محدودیت +6,−0 +10°,−0°	R=0 f=6 min r=12 α=45°	U	20 min	TC-P9-S*	SAW

* مربوط به‌جوش‌های کنج داخلی می‌شود.

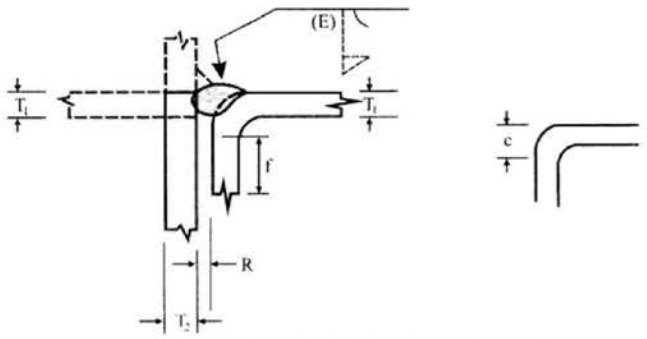
** مربوط به‌جوش‌های کنج خارجی می‌شود.

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود.

(تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

جوش‌های شیاری با نفوذ ناقص

(10) جوش پیشانی
(B) اتصال لب به‌لب
(T) اتصال سپری
(C) اتصال کنج



فرآیند جوشکاری	مشخصهٔ اتصال	ضخامت فلز مبنا (نامحدود = U) T_1	T_2	T_3	آماده‌سازی درز: شکاف ریشه ضخامت ریشه شعاع خم	رواداری‌ها: در طراحی	در مونتاژ	وضعیت‌های مجاز جوشکاری	گلوگاه مؤثر (E)	تذکر
SMAW	BTC-P10	5 min	U	T_1 min	R=0 f=5 min C= $\frac{3}{2}T_1$ min	+2 ,−0 بدون محدودیت −0 , + محدود	+3,− 2 +U,− 2 −0 , + محدود	All	$\frac{5}{8}T_1$	J2,Q2, Z
GMAW	BTC-P10-GF	5 min	U	T_1 min	R=0 f=5 min C= $\frac{3}{2}T_1$ min	+2 ,−0 بدون محدودیت −0 , + محدود	+3,− 2 +U,− 2 −0 , + محدود	All	$\frac{5}{8}T_1$	A,J2, Q2,Z
SAW	T-P10-S	12 min	12min	N/A	R=0 f=12 min C= $\frac{3}{2}T_1$ min	±0 بدون محدودیت −0 , + محدود	+2 ,−5 +U,− 2 −0 , + محدود	F	$\frac{5}{8}T_1$	J2,Q2, Z

برای تذکرات به‌راهنمای ابتدای جداول مراجعه شود. (تمام اندازه‌ها به‌میلی‌متر است)

۱۳ تعداد عبور

۱۳ تعداد عبور

برای حصول جوش با اندازهٔ مورد نظر، برحسب ضخامت ورق و اندازهٔ جوش، تعداد عبور مشخصی لازم است. در جدول‌هایی که در این فصل ارایه می‌شوند، تعداد عبور استاندارد برای انواع مختلف جوش دستی نشان داده شده است. این تعداد عبور می‌تواند مبنای شروع خوبی برای تهیهٔ دستورالعمل جوشکاری باشد و مورد استفاده قرار گیرد.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

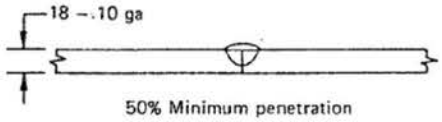


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)*
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(+)	40†	70†	80	120	135
Arc Speed (in./min)	22 – 26	30 – 35	25 – 30	20 – 24	17 – 21
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0244	0.0287	0.0262	0.0487	0.0695
Total Time (hr/ft of weld)	0.00833	0.00615	0.00727	0.00909	0.0105

* Use 1/16 in. gap and whip the electrode.
† DC(–)

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

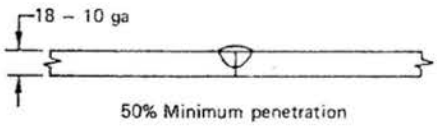


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)*
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6011	E6011	E6011	E6011	E6011
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) AC	50	100	105	130	145
Arc Speed (in./min)	20 – 24	28 – 33	26 – 31	24 – 29	22 – 27
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0251	0.0326	0.0367	0.0527	0.0648
Total Time (hr/ft of weld)	0.00909	0.00656	0.00702	0.00755	0.00817

* Use 1/16 in. gap and whip the electrode.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

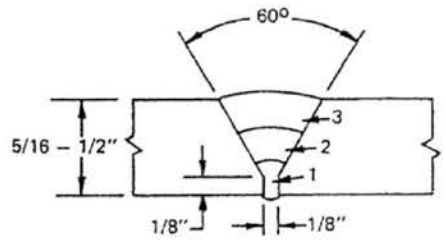
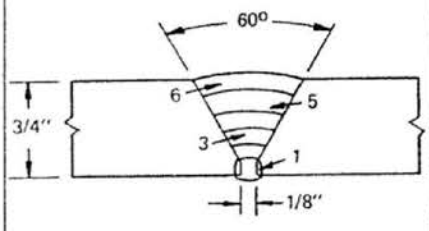


Plate Thickness (in.)	5/16		3/8		1/2		
Pass	1	2	1	2 & 3	1	2	3
Electrode Class	E6011	E6027	E6011	E6027	E6011	E6011	E6027
Size	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	1/4	1/4
Current (amp) AC	135	240	135	240	135	275	400
Arc Speed (in./min)	5.5-6.5	12.0-14.0	5.5-6.5	12.0-14.0	5.5-6.5	8.0-10.0	10.0-12.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.168	0.142	0.168	0.284	0.168	0.228	0.354
Total Time (hr/ft of weld)	0.0487		0.0641		0.0717		

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good
Welded From: One side



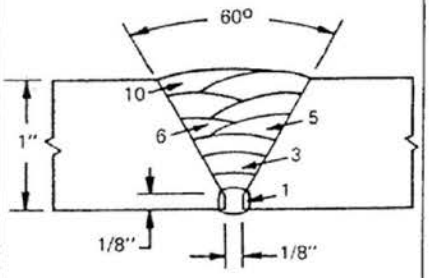


Plate Thickness (in.)	3/4			1		
Pass	1	2	3 – 6	1	2	3 – 10
Electrode Class	E6011	E6011	E6027	E6011	E6011	E6027
Size	5/32	1/4	1/4	5/32	1/4	1/4
Current (amp) AC	135	275	400	135	275	400
Arc Speed (in./min)	5.5 – 6.5	8.0 – 10.0	11.0 – 13.0	5.5 – 6.5	8.0 – 10.0	11.0 – 13.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.168	0.228	1.47	0.168	0.228	2.94
Total Time (hr/ft of weld)	0.122			0.189		

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

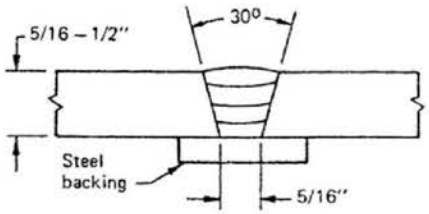


Plate Thickness (in.)	5/16		3/8		1/2	
Pass	1	2 – 3	1	2 – 3	1	2 – 4
Electrode Class	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027
Size	3/16	1/4	3/16	1/4	3/16	1/4
Current (amp) AC	300	400	300	400	300	400
Arc Speed (in./min)	13.0-15.0	15.0-18.0	13.0-15.0	11.5-13.5	13.0-15.0	12.5-14.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.228	0.524	0.228	0.697	0.228	1.00
Total Time (hr/ft of weld)	0.0385		0.0463		0.0605	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

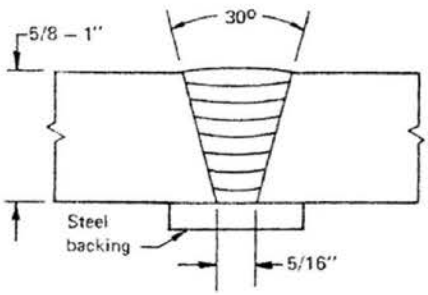
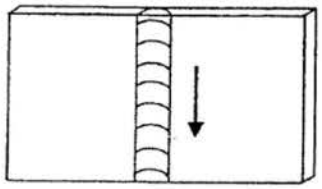


Plate Thickness (in.)	5/8		3/4		1	
Pass	1	2 – 5	1	2 – 6	1	2 – 8
Electrode Class	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027
Size	3/16	1/4	3/16	1/4	3/16	1/4
Current (amp) AC	300	400	300	400	300	400
Arc Speed (in./min)	13.0-15.0	12.5-14.5	13.0-15.0	12.5-14.5	13.0-15.0	12.5-14.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.228	1.35	0.228	1.69	0.228	2.37
Total Time (hr/ft of weld)	0.0759		0.0913		0.122	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side



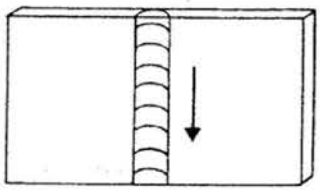
50% Minimum penetration

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)*
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(+)	45†	75†	90	130	150
Arc Speed (in./min)	25 – 30	33 – 38	27 – 32	22 – 27	18 – 22
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0234	0.0281	0.0272	0.0478	0.0730
Total Time (hr/ft of weld)	0.00727	0.00555	0.00678	0.00817	0.00100

* Use 1/16 in. gap and whip the electrode.
† Use DC(–)

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side



50% Minimum penetration

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)*
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6011	E6011	E6011	E6011	E6011
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) AC	55	110	115	140	155
Arc Speed (in./min)	23 – 28	29 – 34	27 – 32	26 – 31	24 – 29
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0236	0.0345	0.0376	0.0523	0.0640
Total Time (hr/ft of weld)	0.00785	0.00635	0.00678	0.00703	0.00755

* Use 1/16 in. gap and whip the electrode.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical up
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

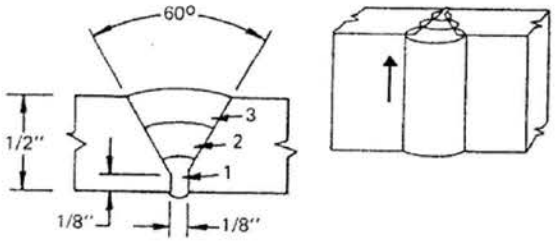


Plate Thickness (in.)	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1 & 2	1 & 2	1 & 2	1 – 3
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	5/32	5/32	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	110	120	150	170
Arc Speed (in./min)*	5.2-5.8	3.8-4.2	4.8-5.3	3.8-4.2
Electrode Req'd (lb/ft)	0.323	0.440	0.586	0.990
Total Time (hr/ft of weld)	0.0901	0.118	0.130	0.152

* First pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical up
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

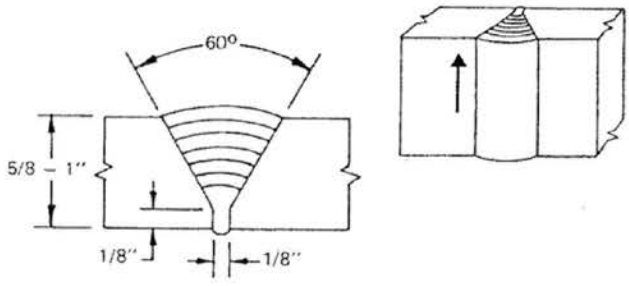


Plate Thickness (in.)	5/8	3/4	1
Pass	1 – 4	1 – 6	1 – 10
Electrode Class	E6010	E6010	E6010
Size	3/16	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	170	170	170
Arc Speed (in./min)*	3.8 – 4.2	3.8 – 4.2	3.8 – 4.2
Electrode Req'd (lb/ft)	1.48	2.08	3.56
Total Time (hr/ft of weld)	0.228	0.318	0.547

* First pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical up
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair
Welded From: One side

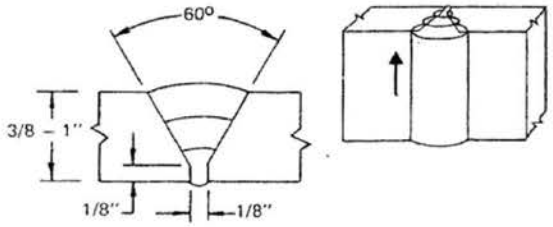


Plate Thickness (in.)	3/8		1/2		3/4		1	
Pass	1	2	1	2 – 3	1	2 – 7	1	2 – 11
Electrode Class	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018
Size	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	160	160	160	160	160	160	160	160
Arc Speed (in./min)	4.3-4.7	3.2-3.5*	4.3-4.7	3.2-3.5*	4.3-4.7	3.2-3.5*	4.3-4.7	3.2-3.5*
Electrode Req'd (lb/ft)	0.281	0.341	0.281	0.758	0.281	1.93	0.281	3.52
Total Time (hr/ft of weld)	0.104		0.176		0.381		0.659	

* Second pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical up
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good
Welded From: Two sides

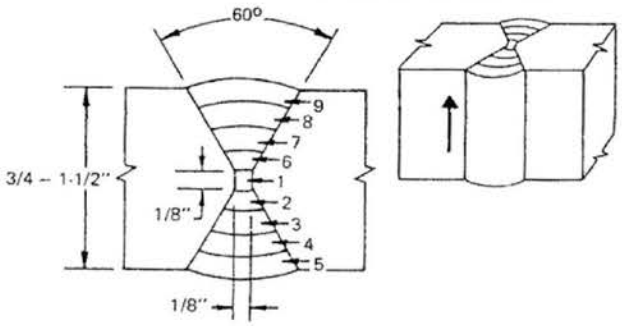


Plate Thickness (in.)	3/4		1		1-1/4		1-1/2	
Pass	1	2 – 5	1	2 – 7	1	2 – 7	1	2 – 9
Electrode Class	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018
Size	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	140	160	140	160	140	160	140	160
Arc Speed (in./min)	3.5-4.1	4.1-4.9	3.5-4.1	3.5-4.1	3.9-4.1	2.3-2.9	3.5-4.1	2.4-3.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.240	0.900	0.240	1.66	0.240	2.40	0.240	3.16
Total Time (hr/ft of weld)	0.230		0.367		0.514		0.645	

Gouge out seam for first pass on second side.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair
Welded From: One side

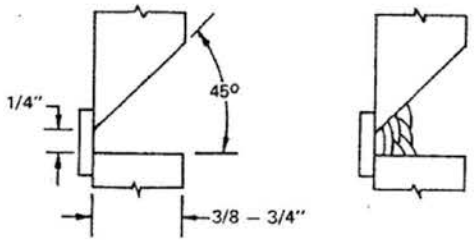


Plate Thickness (in.)	3/8		1/2		5/8		3/4	
Pass	1	2 – 5	1	2 – 7	1	2 – 9	1	2 – 11
Electrode Class	E7018		E7018		E7018		E7018	
Size (in.)	3/16		3/16		3/16		3/16	
Current (amp) DC(+)	240		240		240		240	
Arc Speed (in./min)	4.5-5.5	8.5-9.5	4.5-5.5	7.5-8.5	4.5-5.5	6.7-7.4	5.5-6.5	6.2-6.8
Electrode Req'd (lb/ft)	0.867		1.35		1.75		2.42	
Total Time (hr/ft of weld)	0.118		0.182		0.270		0.345	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair
Welded From: One side

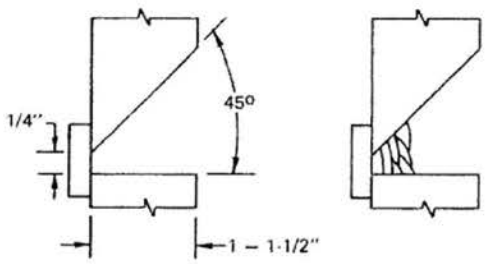


Plate Thickness (in.)		1		1-1/4		1-1/2	
Pass	1*	2 – 13	14 – 19†	2 – 17	18 – 24†	2 – 22	23 – 31†
Electrode Class	E7018	E7018		E7018		E7018	
Size (in.)	3/16	7/32	3/16	7/32	3/16	7/32	3/16
Current (amp) DC(+)	240	280	240	280	240	280	240
Arc Speed (in./min)	5 – 6	6.2-6.8	9.5-10.5	5.7-6.3	9.5-10.5	5.2-5.8	9.5-10.5
Electrode Req'd (lb/ft)		3.39	.994	4.82	1.23	6.40	1.60
Total Time (hr/ft of weld)		0.526		.714		1.00	

* First pass for all thicknesses
† Cover passes.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Fair
Welded From: Two sides

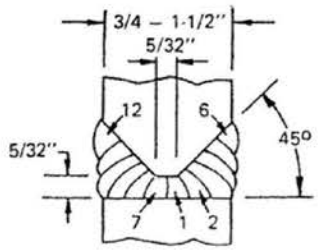


Plate Thickness (in.)	3/4		1		1-1/4		1-1/2	
Pass	1	2 – 6	1	2 – 10	1	2 – 10	1	2 – 12
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	240	240	240	240	240	240	240	240
Arc Speed (in./min)	5.5-6.5	9.0-11.0	4.4-5.2	8.5-10.5	3.8-4.6	5.5-6.5	3.7-4.3	4.6-5.4
Electrode Req'd (lb/ft)	0.956		1.47		2.60		3.84	
Total Time (hr/ft of weld)	0.133		0.230		0.347		0.490	

Fill first pass side. Back gouge as required before welding second side.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair
Welded From: One side

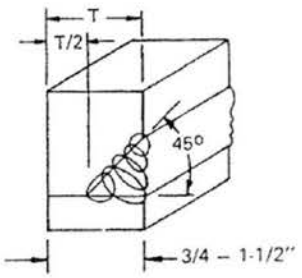


Plate Thickness (in.)		3/4	1	1-1/4	1-1/2
Pass	1*	2 – 3	2 – 5	2 – 5	2 – 6
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size (in.)	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	240	240	240	240	240
Arc Speed (in./min)	4.0-6.0	9.5-10.5	9.0-10.0	5.7-6.3	4.7-5.3
Electrode Req'd (lb/ft)		0.470	0.740	1.80	1.92
Total Time (hr/ft of weld)		0.0800	0.116	0.178	0.250

* First pass for all thicknesses.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Overhead
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair
Welded From: One side

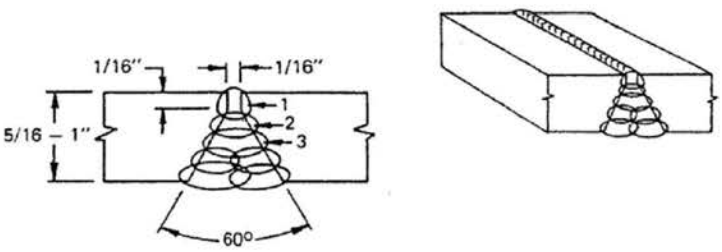
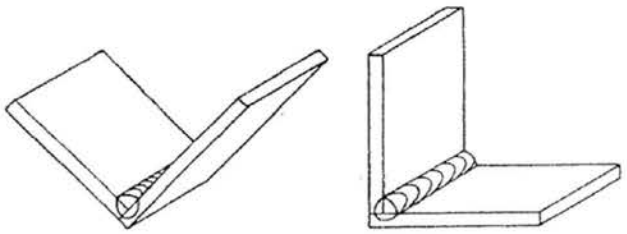


Plate Thickness (in.)	5/16		3/8		1/2		3/4		1	
Pass	1	2	1	2 – 3	1	2 – 5	1	2 – 9	1	2 – 13
Electrode Class	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018	E6010	E7018
Size	1/8	5/32	1/8	5/32	1/8	5/32	1/8	5/32	1/8	5/32
Current (amp) DC(+)	110	170	110	170	110	170	110	170	110	170
Arc Speed (in./min)	4.3 – 4.7	3.4 – 3.8	4.3 – 4.7	3.3 – 3.7	4.3 – 4.7	3.6 – 4.0	4.3 – 4.7	4.3 – 4.7	4.3 – 4.7	3.6 – 4.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.155	0.327	0.155	0.671	0.155	0.918	0.155	2.08	0.155	3.70
Total Time (hr/ft of weld)	0.0999		0.158		0.202		0.399		0.575	

Split layers after third pass, as shown in sketch.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat and horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

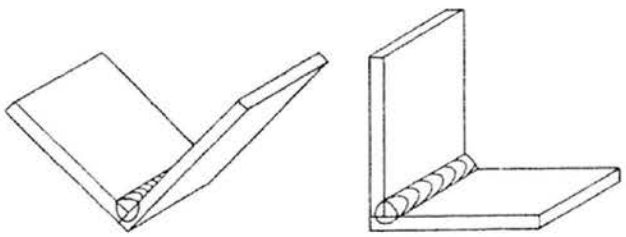


18 – 10 ga

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6012	E6012	E6012	E6012
Size	3/32	1/8	5/32	3/16	3/16
Current (amp) DC(–)	70	95	140	190	200
Arc Speed (in./min)	14 – 18	15 – 19	16 – 20	20 – 24	16 – 20
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0413	0.0583	0.0848	0.0865	0.112
Total Time (hr/ft of weld)	0.0125	0.0118	0.0111	0.00910	0.0111

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat and horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

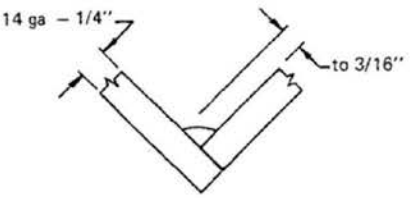


18 – 10 ga

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6013	E6013	E6013	E6013
Size	3/32	1/8	5/32	5/32	3/16
Current (amp) AC	70	105	155	160	210
Arc Speed (in./min)	14 – 18	14 – 18	15 – 19	14 – 18	14 – 18
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0413	0.0495	0.0670	0.0742	0.0926
Total Time (hr/ft of weld)	0.0125	0.0125	0.0118	0.0125	0.0125

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

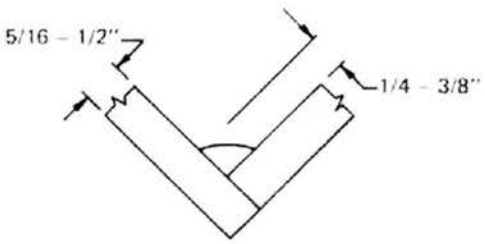
Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)				5/32	5/32	3/16	3/16
Plate Thickness (in.)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)	3/16		1/4	
Pass	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	3/32	1/8	1/8	1/8	5/32	5/32	3/16
Current (amp) AC	95	150	160	180	210	230	270
Arc Speed (in./min)	14.5-16.0	16.5-18.5	16.5-18.5	15.0-16.5	16.0-18.0	14.0-15.5	15.5-17.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0485	0.0760	0.0822	0.102	0.117	0.144	0.162
Total Time (hr/ft of weld)	0.0131	0.0114	0.0114	0.0127	0.0117	0.0136	0.0121

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

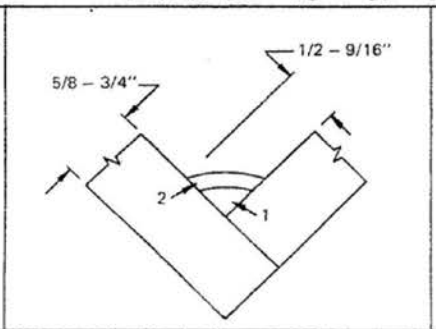
Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

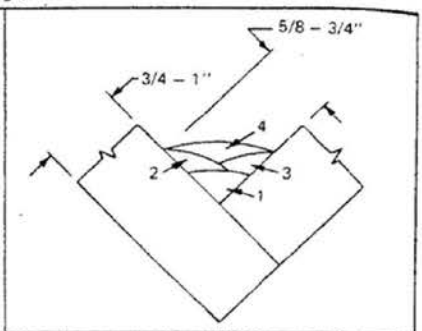


Weld Size, L (in.)	1/4	1/4	9/32	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	5/16		3/8		1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	3/16	7/32	1/4	1/4	5/16
Current (amp) AC	275	325	375	375	475
Arc Speed (in./min)	14.0-16.0	16.0-18.0	17.0-19.0	14.0-15.0	11.0-12.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.19	0.20	0.22	0.29	0.38
Total Time (hr/ft of weld)	0.0133	0.0118	0.0131	0.138	0.174

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level:Commercial
Weldability: Good

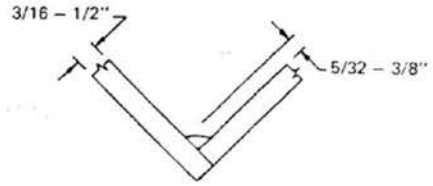




Weld Size, L (in.)	1/2		9/16		5/8		3/4	
Plate Thickness (in.)	5/8		3/4		3/4		1	
Pass	1	2	1	2	1	2 & 3	1	2 – 4
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	5/16	5/16	5/16	5/16	5/16	5/16	5/16	5/16
Current (amp) AC	475	550	475	550	475	550	475	550
Arc Speed (in./min)	13.0-15.0	14.0-16.0	13.0-15.0	10.0-11.0	13.0-15.0	14.0-15.0	13.0-15.0	13.0-14.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.67		0.85		1.07		1.46	
Total Time (hr/ft of weld)	0.0276		0.0333		0.0429		0.587	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

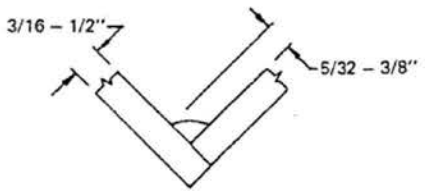
Position: Flat
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8 to
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7014	E7014	E7014	E7014	E7014
Size	5/32	3/16	7/32	1/4	5/16
Current (amp) AC	200	250	310	370	450
Arc Speed (in./min)	12.5-13.5	12.0-13.0	11.0-12.0	9.0-10.0	7.5-8.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0980	0.121	0.191	0.270	0.375
Total Time (hr/ft of weld)	0.0154	0.0160	0.0174	0.0211	0.0250

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

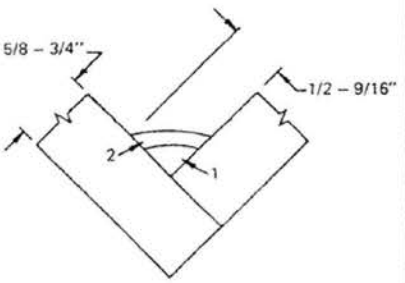
Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good

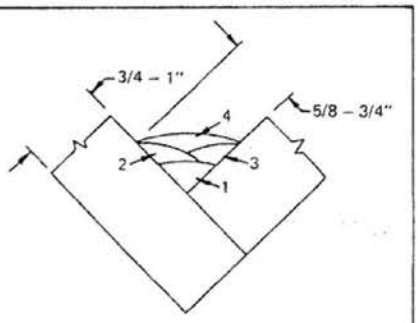


Weld Size, L (in.)	5/32	3/16		1/4		9/32	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4		5/16		3/8		1/2
Pass	1	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027
Size	5/32	5/32	3/16	3/16	7/32	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	210	220	260	270	335	380	390	400
Arc Speed (in./min)	15.5-17.0	13.5-15.0	15.5-17.0	12.5-14.0	14.5-16.0	14.0-15.5	11.0-12.0	9.5-10.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.119	0.146	0.167	0.215	0.228	0.269	0.343	0.428
Total Time (hr/ft of weld)	0.0123	0.0140	0.0123	0.0151	0.0131	0.0136	0.0174	0.0200

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good

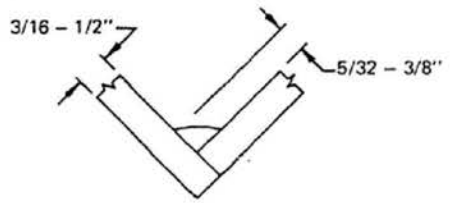




Weld Size, L (in.)	1/2		9/16		5/8		3/4	
Plate Thickness (in.)	5/8		3/4		3/4		1	
Pass	1	2	1	2	1	2 & 3	1	2 – 4
Electrode Class	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027
Size	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	400	400	400	400	400	400	400	400
Arc Speed (in./min)	11.5-12.5	11.5-12.5	11.5-12.5	7.5-8.5	11.5-12.5	11.0-12.0	11.5-12.5	10.0-11.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.727		0.936		1.12		1.58	
Total Time (hr/ft of weld)	0.0333		0.0417		0.512		0.0737	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor

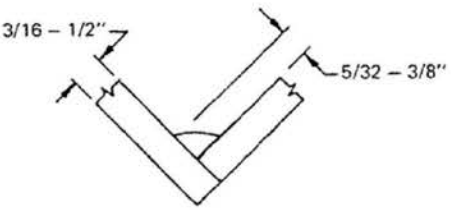


Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7028	E7028	E7028	E7028	E7028
Size	5/32	3/16	3/16	7/32	1/4
Current (amp) AC	215	260	280	330	400
Arc Speed (in./min)	13.5-15.0	13.5-15.0	11.0-12.0	10.0-12.0	8.5-9.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.104	0.147	0.208	0.285	0.437
Total Time (hr/ft of weld)	0.0140	0.0140	0.0175	0.0175	0.222

Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

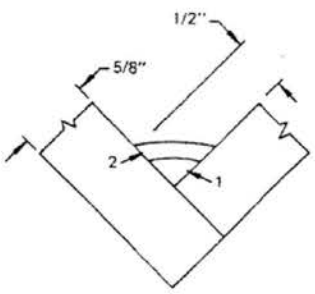
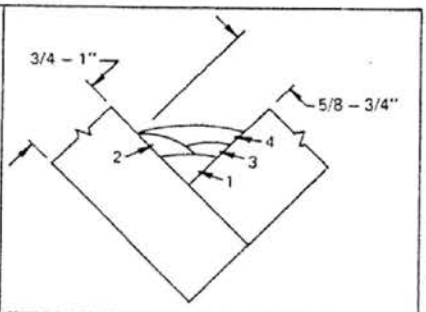
Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor



Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	3/16	7/32	7/32	1/4	1/4
Current (amp) AC	240	275	275	350	350
Arc Speed (in./min)	13.5-15.0	13.0-14.0	9.0-10.0	7.0-8.0	6.0-6.8
Electrode Req'd (lb/ft)	0.109	0.132	0.195	0.272	0.409
Total Time (hr/ft of weld)	0.0140	0.0149	0.0202	0.0270	0.0313

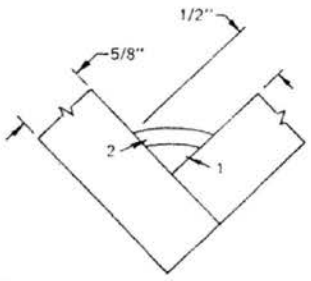
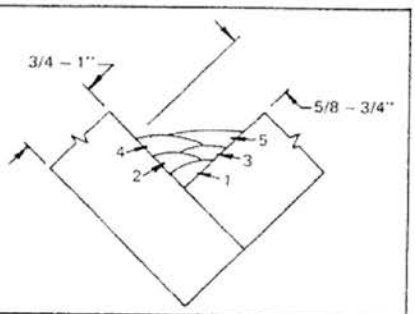
Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat Weld Quality Level: Code Steel Weldability: Poor			
Weld Size, L (in.)	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	5/8	3/4	1
Pass	1 & 2	1 – 3	1 – 4
Electrode Class	E7028	E7028	E7028
Size	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	400	400	400
Arc Speed (in./min)	9.5 – 11.5	9.0 – 11.0	9.0 – 11.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.776	1.24	1.79
Total Time (ht/ft of weld)	0.0384	0.0615	0.0887

Preheat may be necessary depending on plate material.

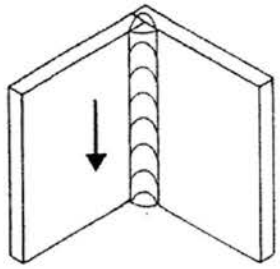
جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat Weld Quality Level: Code Steel Weldability: Poor			
Weld Size, L (in.)	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	5/8	3/4	1
Pass	1 & 2	1 – 4	1 – 5
Electrode Class	E7018	E7018	E7018
Size	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	350	350	350
Arc Speed (in./min)	6.9 – 7.6	6.7 – 7.5	6.6 – 7.4
Electrode Req'd (lb/ft)	0.727	1.14	1.50
Total Time (hr/ft of weld)	0.0555	0.114	0.123

Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good

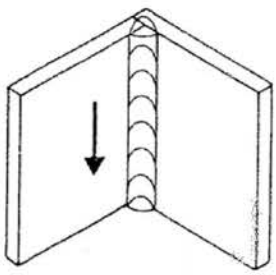


18 – 10 ga

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6012	E6012	E6012	E6012
Size	3/32	1/8	5/32	3/16	3/16
Current (amp) DC(–)	70	105	150	200	210
Arc Speed (in./min)	17 – 21	18 – 22	21 – 25	23 – 28	21 – 25
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0374	0.0542	0.0713	0.0792	0.0930
Total Time (hr/ft of weld)	0.0105	0.0100	0.00870	0.00785	0.00870

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Quality: Commercial
Weldability: Good

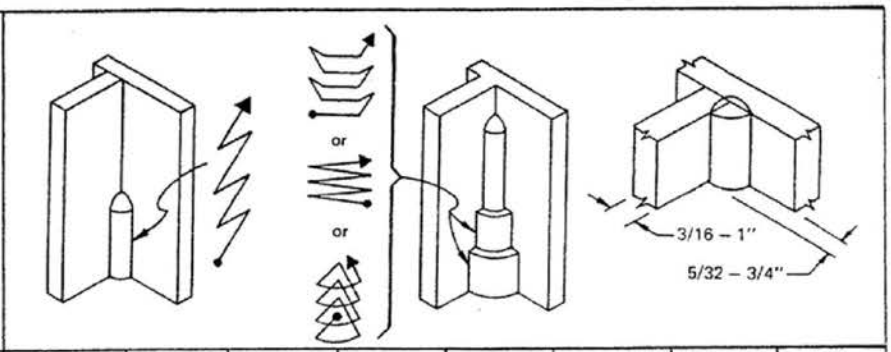


18 – 10 ga

Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6013	E6013	E6013	E6013
Size	3/32	1/8	5/32	5/32	3/16
Current (amp) AC	75	115	165	170	225
Arc Speed (in./min)	16 – 20	17 – 21	19 – 23	18 – 22	16 – 20
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0418	0.0463	0.0583	0.0636	0.0916
Total Time (hr/ft of weld)	0.0111	0.0105	0.00953	0.0100	0.0111

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good

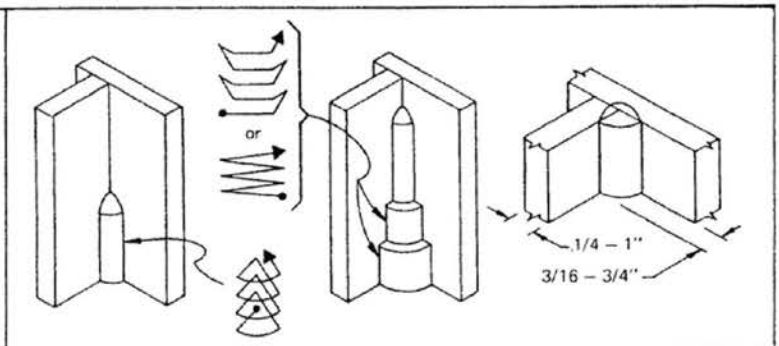


Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1	1	1	1	1	1 – 2	1 – 3	1 – 4
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	5/32	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	120	150	155	155	155	160	160	160
Arc Speed (in./min)	10.5-11.5	7.4-8.2	5.0-5.5	3.0-3.3	2.0-2.2	4.3-4.7*	4.3-4.7*	4.3-4.7*
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0712	0.137	0.211	0.346	0.514	0.850	1.31	1.93
Total Time (hr/ft of weld)	0.0182	0.0256	0.0381	0.0635	0.0952	0.147	0.227	0.333
Direction of welding	Down	Up	Up	Up	Up	Up	Up	Up

* First pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair

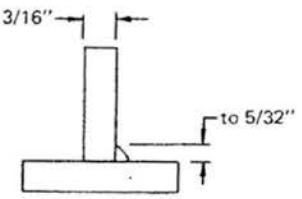


Weld Size, L (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1	1	1	1	1	1 – 2	1 – 3
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	1/8	1/8	1/8	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	135	140	140	150	150	150	150
Arc Speed (in./min)	5.4-5.8	3.8-4.2	2.3-2.5	1.8-2.0	1.1-1.3	1.9-2.1*	1.9-2.1*
Electrode Req'd (lb/ft)	0.155	0.231	0.371	0.556	0.925	1.41	2.11
Total Time (hr/ft of weld)	0.0357	0.0500	0.0833	0.105	0.167	0.261	0.389

* First pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

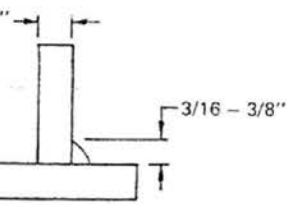
Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)				5/32	
Plate Thickness (in.)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)	3/16	
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	3/32	1/8	1/8	1/8	5/32
Current (amp) AC	95	150	160	180	210
Arc Speed (in./min)	14.0-16.0	16.0-18.5	16.0-18.5	14.5-16.5	15.5-18.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0495	0.0770	0.0833	0.104	0.119
Total Time (hr/ft of weld)	0.0133	0.0116	0.0116	0.0129	0.0119

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

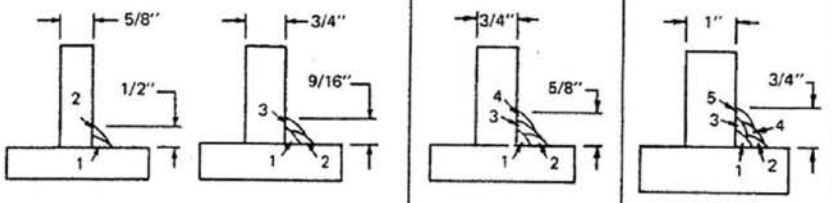
Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)	3/16		1/4		9/32	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	1/4		5/16		3/8		1/2
Pass	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	5/32	3/16	3/16	7/32	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	230	270	275	325	375	375	375
Arc Speed (in./min)	13.5-15.0	15.0-17.0	14.0-15.0	16.0-18.0	16.0-18.0	13.0-14.0	10.5-11.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.150	0.166	0.20	0.21	0.23	0.30	0.41
Total Time (hr/ft of weld)	0.0141	0.0125	0.0138	0.0118	0.0118	0.0148	0.0182

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

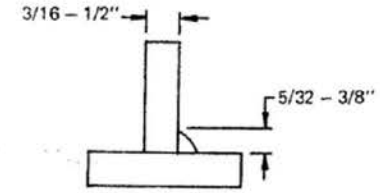
Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)	1/2		9/16		5/8		3/4	
Plate Thickness (in.)	5/8		3/4		3/4		1	
Pass	1	2 & 3	1	2 & 3	1	2 – 4	1	2 – 5
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	375	375	375	375	375	375	375	375
Arc Speed (in./min)	10.5-11.5	11.0-12.0	10.5-11.5	14.0-16.0	10.5-11.5	14.0-16.0	10.5-11.5	12.0-13.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.73		0.92		1.15		1.62	
Total Time (hr/ft of weld)	0.0356		0.0449		0.0582		0.0822	

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

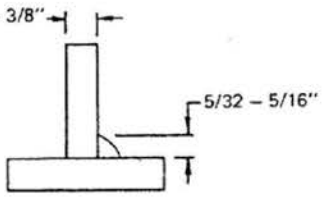
Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)	5/32	3/16		1/4		9/32	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4		5/16		3/8		1/2
Pass	1	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027	E6027
Size	5/32	5/32	3/16	3/16	7/32	7/32	7/32	1/4
Current (amp) AC	210	220	250	260	320	325	335	360
Arc Speed (in./min)	14.5-16.0	13.0-14.5	14.5-16.0	11.5-12.5	13.0-14.5	11.5-12.5	9.5-10.5	7.5-8.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.128	0.151	0.173	0.224	0.241	0.281	0.356	0.463
Total Time (hr/ft of weld)	0.0131	0.0145	0.0131	0.0167	0.0145	0.0167	0.0200	0.0250

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor

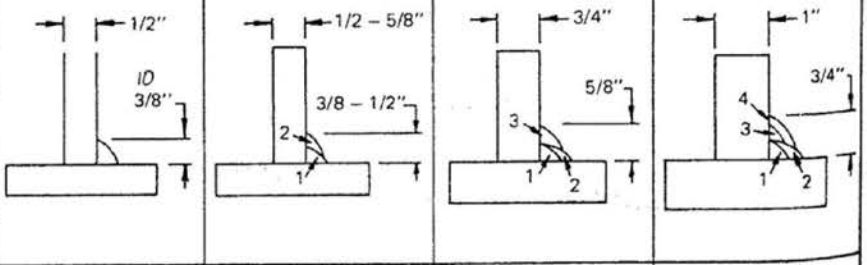


Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4		5/16	
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16		3/8	
Pass	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7028	E7028	E7028	E7028	E7028	E7028
Size	5/32	3/16	3/16	7/32	7/32	1/4
Current (amp) AC	215	260	280	335	335	390
Arc Speed (in./min)	12.5-13.5	11.5-12.5	9.5-10.5	12.0-13.0	9.5-10.5	11.5-12.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.112	0.157	0.235	0.236	0.320	0.330
Total Time (hr/ft of weld)	0.0152	0.0167	0.0200	0.0160	0.0200	0.0167

Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor



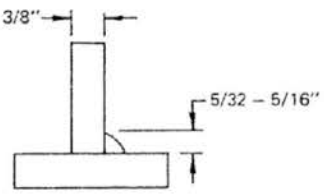
Weld Size, L (in.)	3/8*	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	1/2	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1	1 – 2	1 – 2	1 – 3	1 – 4
Electrode Class	E7028	E7028	E7028	E7028	E7028
Size	1/4	7/32	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	390	335	390	390	390
Arc Speed (in./min)	7.5 – 8.5	11.5 – 12.5	9.0 – 10.0	9.0 – 10.0	8.0 – 9.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.483	0.483	0.819	1.28	1.82
Total Time (hr/ft of weld)	0.0250	0.0333	0.0422	0.0633	0.0940

Preheat may be necessary depending on plate material.

* May not be full 3/8 in. on the vertical leg.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor

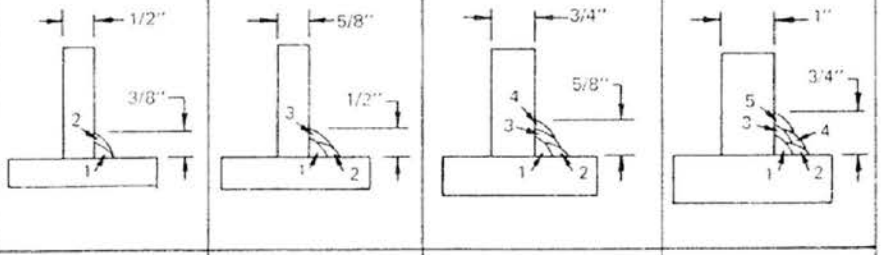


Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8
Pass	1	1	1	1
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	3/16	7/32	7/32	1/4
Current (amp) AC	240	275	275	350
Arc Speed (in./min)	12.5 – 13.5	11.0 – 12.0	8.5 – 9.5	6.5 – 7.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.111	0.140	0.203	0.335
Total Time (hr/ft of weld)	0.0154	0.0174	0.0222	0.0286

Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor

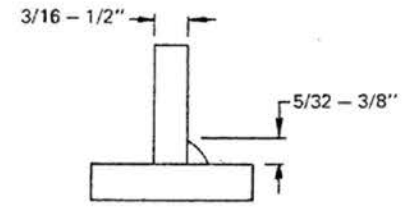


Weld Size, L (in.)	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1 & 2	1 – 3	1 – 4	1 – 5
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	1/4	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	350	350	350	350
Arc Speed (in./min)	9.5 – 11.5	9.5 – 10.5	8.0 – 9.0	7.0 – 8.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.480	0.785	1.18	1.62
Total Time (hr/ft of weld)	0.0390	0.0600	0.0940	0.133

Preheat may be necessary depending on plate material.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

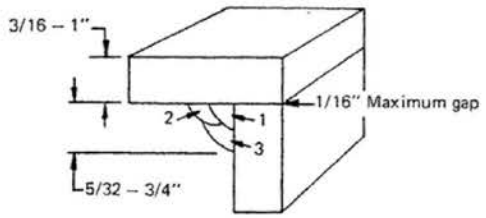
Position: Horizontal
Weld Quality Level:Commercial
Steel Weldability: Good



Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7014	E7014	E7014	E7014	E7014
Size	5/32	3/16	7/32	1/4	5/16
Current (amp) AC	200	250	310	370	450
Arc Speed (in./min)	10.5-11.5	11.5-12.5	11.0-12.0	9.0-10.0	7.0-8.0
Electrode Req'd (lb/ft)	0.128	0.127	0.191	0.270	0.388
Total Time (hr/ft of weld)	0.0182	0.0167	0.0174	0.0211	0.0267

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Overhead
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Good



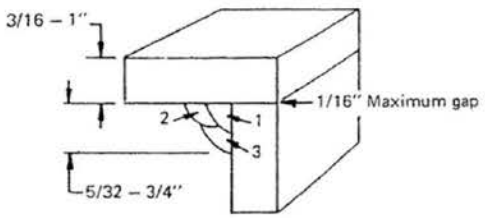
Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1	1	1	1 – 2	1 – 3	1 – 6	1 – 10	1 – 15
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	5/32	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16
Current (amp) DC(+)	130	170	170	170	170	170	170	170
Arc Speed (in./min)*	7.0-7.7	8.5-9.4	4.8-5.3	6.6-7.3	6.6-7.3	6.6-7.3	6.6-7.3	6.6-7.3
Electrode Req'd (lb/ft)	0.100	0.145	0.253	0.369	0.532	0.945 *	1.48	2.13
Total Time (hr/ft of weld)	0.0272	0.0223	0.0396	0.0567	0.0820	0.145	0.228	0.328

On 1/2 in. plate and thicker, place the first pass of each layer on the top plate.

* First pass only. Vary speed on succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Overhead
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Fair



Weld Size, L (in.)	5/32	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	1
Pass	1	1	1 – 2	1 – 3	1 – 4	1 – 6	1 – 10	1 – 15
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	170	170	170	170	170	170	170	170
Arc Speed (in./min)*	10.5-11.5	7.2-8.0	8.2-9.1	8.2-9.1	8.5-9.4	7.0-7.7	7.2-8.0	8.1-8.9
Electrode Req'd (lb/ft)	0.107	0.155	0.277	0.394	0.570	1.01	1.59	2.29
Total Time (hr/ft of weld)	0.0182	0.0264	0.0463	0.0670	0.0967	0.172	0.269	0.388

On 3/8 in. plate and thicker place the first pass of each layer on the top plate.

* First pass only. Vary succeeding passes to obtain proper weld size.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

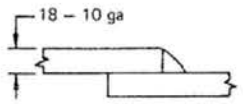
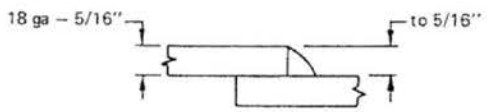


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6012	E6012	E6012	E6012
Size	3/32	1/8	5/32	3/16	3/16
Current (amp) DC(–)	70	105	145	200	210
Arc Speed (in./min)	19 – 23	21 – 26	20 – 24	18 – 22	14 – 18
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0339	0.0427	0.0717	0.101	0.134
Total Time (hr/ft of weld)	0.00953	0.00851	0.00910	0.0100	0.0125

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

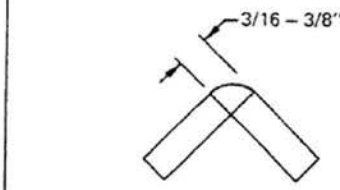
Position: Horizontal
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

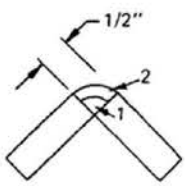


Weld Size, L (in.)						3/16	1/4	5/16
Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)	3/16	1/4	5/16
Pass	1	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6013	E6013	E6013	E6013	E7024	E7024	E7024
Size	3/32	1/8	5/32	5/32	3/16	3/16	7/32	7/32
Current (amp) AC	75	115	160	165	215	290	360	360
Arc Speed (in./min)	15 – 19	16 – 20	16 – 20	14 – 18	13 – 17	14 – 17	14 – 16	12 – 14
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0389	0.0490	0.0667	0.0773	0.103	0.170	0.211	0.253
Total Time (hr/ft of weld)	0.0118	0.0111	0.0111	0.0125	0.0133	0.0129	0.0133	0.0155

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side





Weld Size, L (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1 & 2
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	3/16	7/32	7/32	1/4	1/4
Current (amp) AC	250	320	350	400	410
Arc Speed (in./min)	21.0 – 25.0	18.0 – 22.0	14.5 – 17.5	13.0 – 16.0	11.5 – 14.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.101	0.133	0.198	0.240	0.530
Total Time (hr/ft of weld)	0.00870	0.0100	0.0125	0.0139	0.0308

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

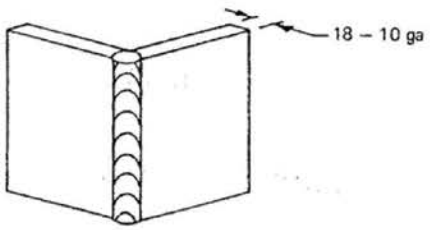


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(–)	50	90	95	120	170*
Arc Speed (in./min)	35 – 40	40 – 45	40 – 45	37 – 42	33 – 38
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0184	0.0278	0.0293	0.0436	0.0461
Total Time (hr/ft of weld)	0.00533	0.00471	0.00471	0.00507	0.00563

* DC(+)

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

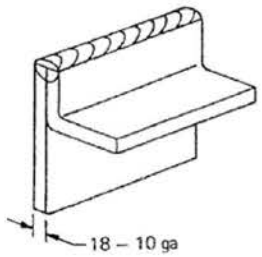


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(–)	50	80	85	115	140
Arc Speed (in/min)	45 – 50	43 – 48	40 – 45	40 – 45	37 – 42
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0145	0.0232	0.0263	0.0382	0.0476
Total Time (hr/ft of weld)	0.00421	0.00439	0.00471	0.00471	0.00505

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

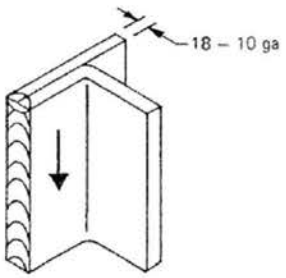


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(–)	55	90	95	125	155
Arc Speed (in./min)	53 – 58	50 – 55	47 – 52	47 – 52	43 – 48
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0141	0.0225	0.0251	0.0358	0.0473
Total Time (hr/ft of weld)	0.00361	0.00381	0.00404	0.00404	0.00439

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

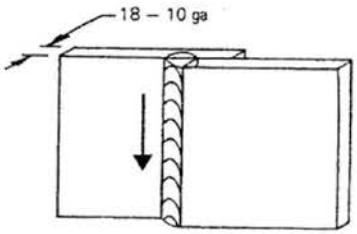


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6012	E6012	E6012	E6012
Size	3/32	1/8	5/32	3/16	3/16
Current (amp) DC(–)	75	115	155	210	220
Arc Speed (in./min)	22 – 27	27 – 32	27 – 32	25 – 30	22 – 27
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0316	0.0375	0.0576	0.0781	0.0930
Total Time (hr/ft of weld)	0.00817	0.00678	0.00678	0.00728	0.00817

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Vertical down
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

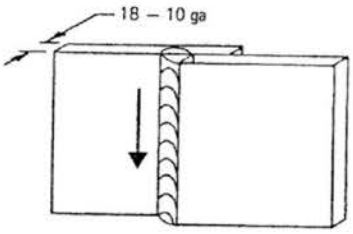


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6013	E6013	E6013	E6013	E6013
Size	3/32	1/8	5/32	5/32	3/16
Current (amp) AC	85	125	170	175	225
Arc Speed (in./min)	19 – 23	20 – 24	21 – 26	19 – 23	16 – 20
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0358	0.0444	0.0546	0.0631	0.0922
Total Time (hr/ft of weld)	0.00953	0.00910	0.00850	0.00953	0.0111

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side

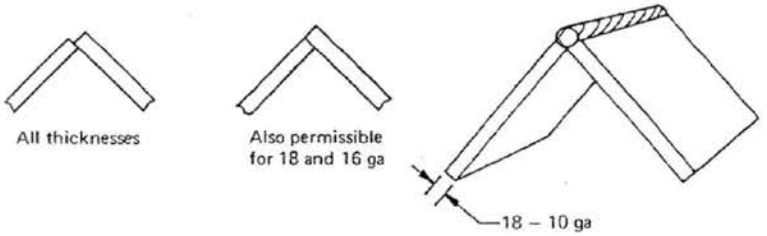
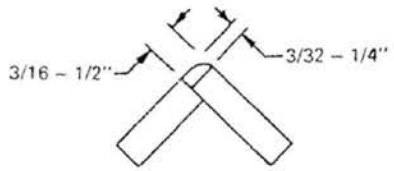


Plate Thickness (in.)	0.048 (18 ga)	0.060 (16 ga)	0.075 (14 ga)	0.105 (12 ga)	0.135 (10 ga)
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E6010	E6010	E6010	E6010	E6010
Size	3/32	1/8	1/8	5/32	3/16
Current (amp) DC(–)	45	80	85	110	155*
Arc Speed (in./min)	30 – 35	35 – 40	35 – 40	33 – 38	27 – 32
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0197	0.0282	0.0300	0.0432	0.0505
Total Time (hr/ft of weld)	0.00616	0.00533	0.00533	0.00563	0.00678

* Use DC(+)

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Position: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good
Welded From: One side



Weld Size, L (in.)	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Plate Thickness (in.)	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2
Pass	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	5/32	3/16	7/32	7/32	1/4
Current (amp) AC	215	275	350	360	410
Arc Speed (in./min)	22.0-27.0	19.0-23.0	18.5-22.5	16.5-19.5	14 – 17
Electrode Req'd (lb/ft)	0.0750	0.114	0.152	0.175	0.250
Total Time (hr/ft of weld)	0.00820	0.00952	0.00975	0.0111	0.0130

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Positon: Flat
Weld Quality Level: Commercial
Steel Weldability: Good

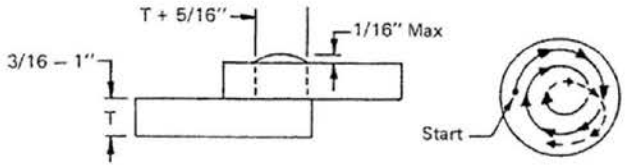


Plate Thickness (in.)	3/16	5/16	3/8	1/2	3/4	1
Electrode Class	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018	E7018
Size	1/8	3/16	3/16	7/32	1/4	1/4
Current (amp) AC	140	250	250	300	350	350
Arc Speed (in./min)						
Electrode Req'd*	0.0154	0.0440	0.0642	0.113	0.300	0.605
Total Time* (hr)	0.00417	0.00500	0.00731	0.0118	0.0236	0.0475

Weld with spiral motion and continue as long as slag can be kept molten or until the weld is completed.

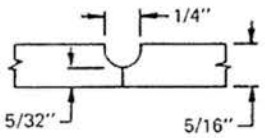
* Per weld

† Thickness of the weld may be reduced to 5/8 inch per AWS Structural Welding Code 2.8.8.

جوشکاری دستی با الکترود روکش‌دار

Special Procedures for ASTM A203 and A537 Steels

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor
Welded From: Two sides



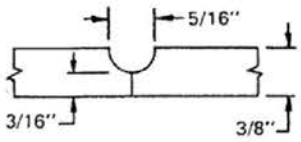


Plate Thickness (in.)	5/16		3/8	
Pass	1 & 2	3 & 4*	1 – 3	4 – 6*
Electrode Class†				
Size	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	150	150	150	150
Arc Speed (in./min)	9 – 11	8 – 10	9 – 11	8 – 10
Electrode Req'd (lb/ft)	0.48		0.65	
Total Time (hr/ft of weld)	0.0844		0.127	
Interpass Temperature, Max. (°F)	150		150	

Position: Flat
Weld Quality Level: Code
Steel Weldability: Poor
Welded From: Two sides

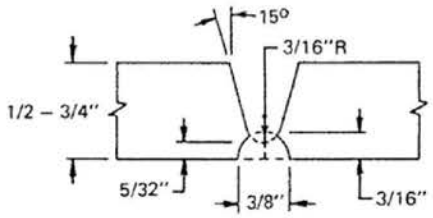


Plate Thickness (in.)	1/2		5/8		3/4	
Pass	1 – 5	6 – 8*	1 – 7	8 – 10*	1 – 10	11 – 13*
Electrode Class†						
Size	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32	5/32
Current (amp) DC(+)	150	150	150	150	150	150
Arc Speed (in./min)	7 – 9	8 – 10	7 – 9	8 – 10	7 – 9	8 – 10
Electrode Req'd (lb/ft)	1.40		1.79		2.25	
Total Time (hr/ft of weld)	0.188		0.238		0.313	
Interpass Temperature, Max. (°F)	175		200		225	

* Second side is gouged after first side is completed.

† See Tables 6-13 and 6-17.

۱۴ کنترل کیفی در ساختمان‌های کوچک

۱۴ـ۱ معرفی ۶۲۱
۱۴ـ۲ قانون ۵P ۶۲۲
۱۴ـ۳ بازرسی عینی (V.I) ۶۲۵
۱۴ـ۴ جوش خوب چیست ؟ ۶۲۷

۱۴ کنترل کیفی در ساختمان‌های کوچک

۱۴ـ۱ معرفی

در ذهن اکثر مهندسین این سؤال وجود دارد که آیا اصول کنترل کیفی ارایه شده در آیین‌نامه‌های جوشکاری می‌تواند در بخش مسکن و بخصوص در مقیاس کوچک و در حد منازل شخصی مورد استفاده قرار گیرد یا نه؟ آیا امکان بسیج نیروهای کنترل کیفی، شامل بازرس جوش و اپراتور آزمایش‌های غیرمخرب برای منازل مسکونی وجود دارد و یا در صورت امکان، اقتصادی است یا نه؟ اگر بخواهیم به‌موضوع با دید صلب نگاه کنیم می‌توانیم در یک کلمه بگوییم به‌هرحال اسکلت فولادی در هر مقیاس باید مورد بازرسی و کنترل کیفی قرار گیرد؛ خواه یک ساختمان ۳ طبقه یا یک مجتمع مسکونی انبوه‌سازی باشد و خواه یک ساختمان شخصی‌ساز مثلاً چهار طبقه. البته این دیدگاه منطبق بر اصول آیین‌نامه‌ای می‌باشد، لیکن منطبق بر عرف جامعه نیست و این انتظار وجود دارد که با سیستم نظارت متوسط به‌کیفیت مطلوب رسید. با توجه به‌قوانین جاری در امر نظارت ساختمان‌ها این تمایل وجود دارد که مهندسین ناظر با اجرای دستورالعمل‌های کارگاهی انتظارات مطلوب را برآورده نمایند.

در فصول گذشته این راهنما اطلاعات کافی در خصوص شناخت جوش، معایب جوش و سیستم‌های کنترل کیفی ارایه شده است. بدون شک آگاهی از تمام مطالب این فصول برای مهندسین شاغل در امر کنترل کیفی ضروری است، لیکن کاربرد دستورالعمل کنترل کیفی می‌باید با حجم کار و سیستم ساختمان متناسب باشد و باید این واقعیت را پذیرفت که سیستم کنترل کیفی ساختمان مسکونی کوچک نمی‌تواند و نمی‌باید همانند سیستم کنترل کیفی یک ساختمان بلندمرتبه باشد.

در این فصل سعی می‌شود با انتخاب بخش‌های مختلف این کتاب، دستورالعملی برای بازرسی اسکلت فولادی ساختمان‌های مسکونی کوچک ارایه نمود. این دستورالعمل‌ها توصیه‌هایی بر مبنای تجارب شخصی نگارنده است و نمی‌تواند به‌عنوان آیین‌نامه مورد استفاده قرار گیرد و بیشتر جنبه راهنمایی دارد. به‌هر حال مهندسی که اقدام به‌چنین بازرسی‌هایی می‌نماید، باید آشنایی و تسلط کافی با قسمت‌های مختلف این راهنما را داشته باشد.

۱۴ ـ ۲ قانون 5P

بلاجت از متخصصین به‌نام صنعت جوشکاری ساختمانی است. ایشان پیشنهاد می‌نماید که برای حصول جوش با کیفیت مناسب باید ۵ عامل که در زبان انگلیسی با حرف P شروع می‌شوند، رعایت گردند. این عوامل به‌شرح زیر می‌باشند:

۱ ـ Personnel یعنی وجود جوشکار ماهر
۲ ـ Process یعنی روش جوشکاری یا ماشین‌آلات جوشکاری مناسب
۳ ـ Preparation یعنی آماده‌سازی مناسب درز جوش و لبه‌های ورق در مجاور درز
۴ ـ Procedure یعنی وجود دستورالعمل جوشکاری
۵ ـ Proove یعنی بازرسی و تأیید

پنج عامل فوق به‌نام قانون 5P شناخته می‌شوند.

پرسنل جوشکاری

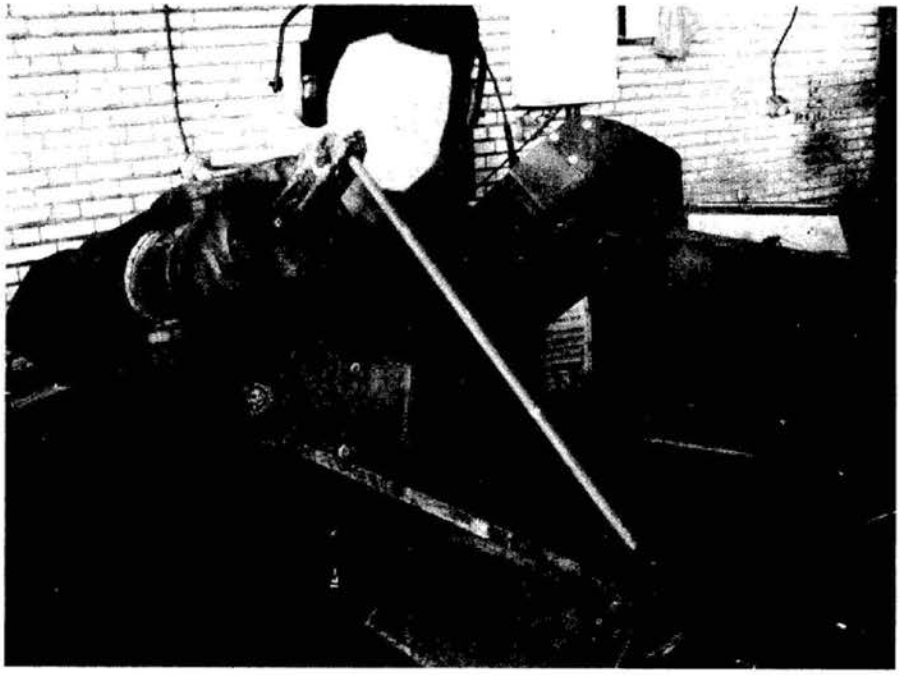
برای جوشکاری باید از جوشکار ماهر استفاده نمود. مهندس ناظر و صاحب کار نباید به‌این خیال خام باشند که هر شخص انبر به دستی، جوشکار است. ابتدا باید با قیمت کارشناسی مناسب، کار اسکلت ساختمان به‌پیمانکار کاردانی سپرده شود. بالا بودن ۱۰ درصد در دستمزد آهنگری تأثیر قابل توجهی در قیمت تمام‌شده ساختمان نخواهد داشت. بعد از انتخاب پیمانکار ذیصلاح، باید از وی خواسته شود که از جوشکاران ماهر استفاده نماید. مهندس می‌تواند به‌راحتی از جوشکار آزمایش بگیرد. معمولاً برای جوشکاری اسکلت ساختمانی وجود دو رده جوشکار لازم است. جوشکاران کفی (تخت) و سربالا. با اجرای جوش به‌طول حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و بازرسی عینی آن می‌توان به‌راحتی به‌تبحر جوشکار پی برد. در شکل ۱۴ ـ ۱ تست جوشکار در دو وضعیت کفی و سربالا نشان داده شده است.

ماشین‌آلات و تجهیزات جوشکاری مناسب

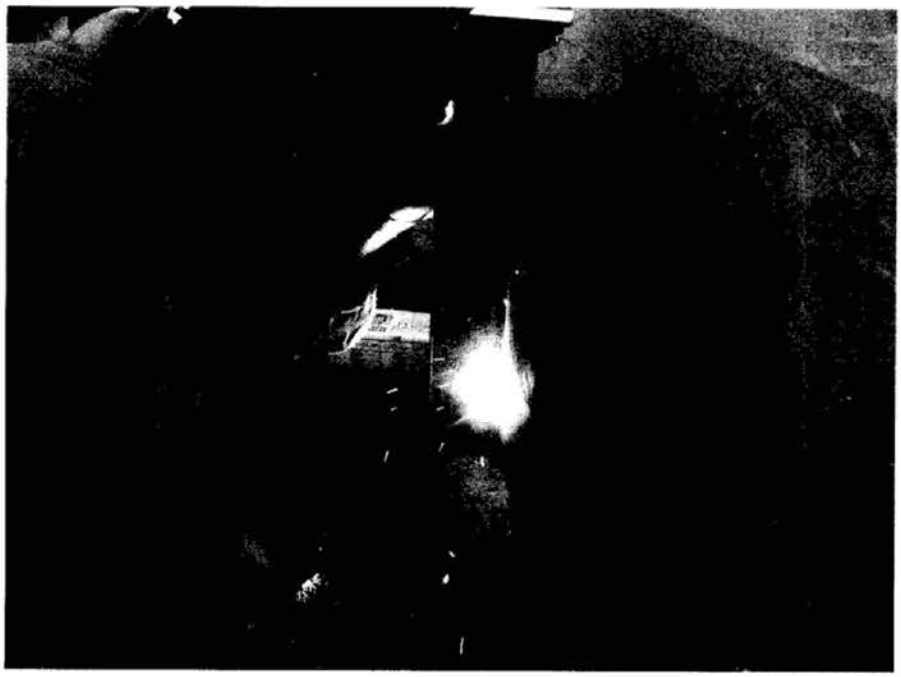
ماشین جوشکاری از نوع دیزل، بنزینی، دینام و یا رکتیفایر باید وضعیت مناسبی داشته و جریان یکنواختی برای جوشکاری تولید نماید.

سایر تجهیزات مانند الکترود، انبر، ماسک، دستکش، چکش گل‌زن، سنگ فرز، وایربرس، جعبه الکترود و احیاناً فلاسک خشک‌کن الکترود از ملزومات اساسی هستند که باید در کارگاه فراهم باشند. در شکل ۱۴ ـ ۲ مختصری از این تجهیزات نشان داده شده است .

در خرید الکترود دقت گردد. الکترود را حتماً از سازنده‌های معتبر خریداری کنید و محل خرید نمایندگی معتبر باشد. کارخانجات، الکترودهای مردود را برای جوشکاری در و پنجره جدا می‌نمایند. احتیاط نمایید از این الکترودها برای جوشکاری اسکلت استفاده نگردد.

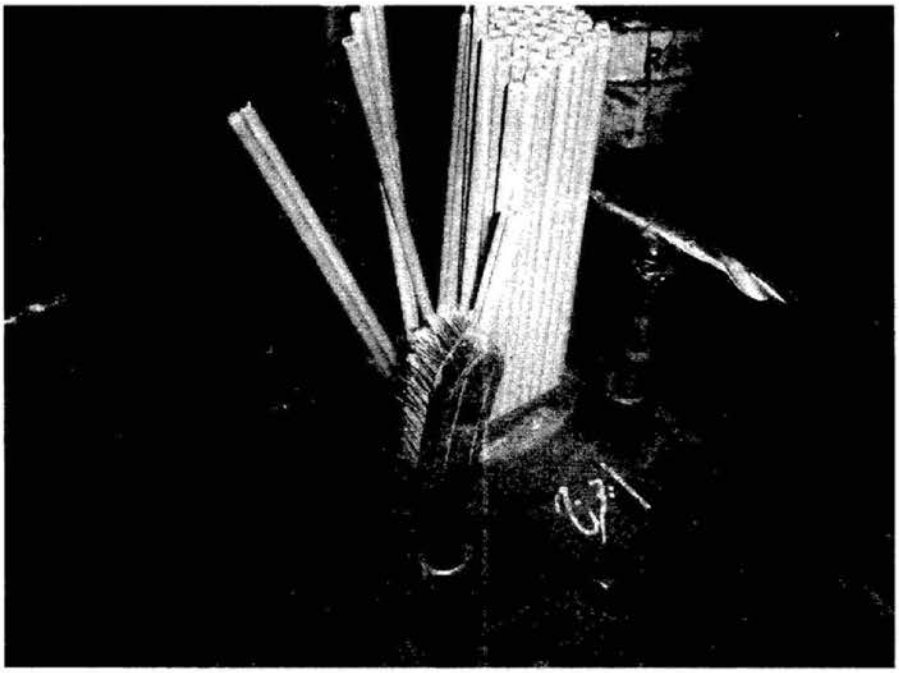


(الف) وضعیت تخت



(ب) وضعیت سربالا

شکل ۱۴ ـ ۱ تست جوشکار.



شکل ۱۴ ـ ۲ تجهیزات فردی جوشکاری.

آماده‌سازی درزها

لبه‌هایی که باید به‌هم جوش شوند باید مستقیم و عاری از کجی، لهیدگی و یا تضاریس ناشی از برشکاری باشند و کاملاً به‌هم جفت گردند. این بازرسی را می‌توان در هنگام مونتاژ و خال‌جوش کردن قطعات با دقت خوب انجام داد. بهتر است جهت جلوگیری از بروز معایب برشکاری دستی در کارگاه، قبل از شروع ساخت، لیست مصالح فولادی، اعم از ورق و پروفیل با اندازه‌های لازم، تهیه و برشکاری آنها از محل خرید توسط دستگاه‌های مناسب نظیر گیوتین و برش ریلی انجام شود.

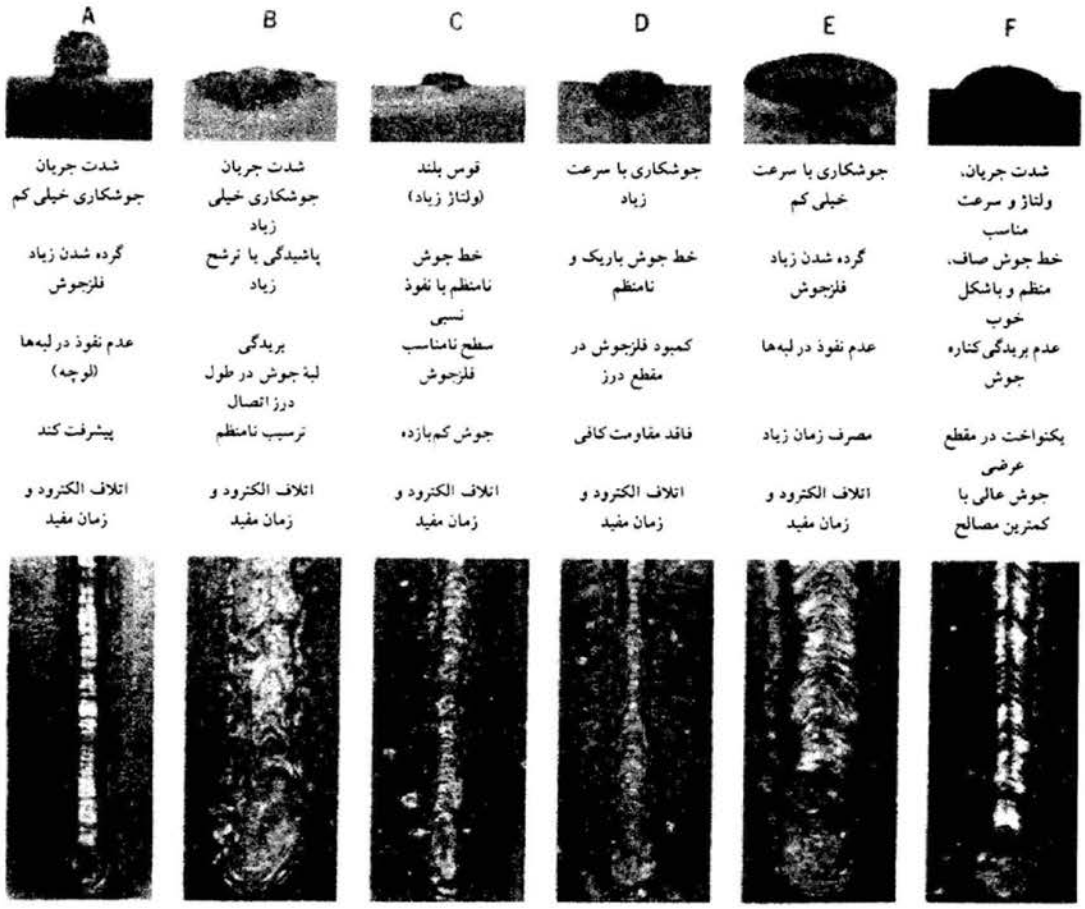
دستورالعمل جوشکاری

تنظیم دستورالعمل جوشکاری در کارگاه‌های کوچک مرسوم نیست، لیکن باید با استادکار جوش توافقاتی در زمینه قطر الکترود، آمپر، نوع الکترود و تعداد پاس‌ها انجام پذیرد. به‌جوشکار باید تفهیم شود که از آمپر زیاد استفاده ننماید و سرعت حرکت خود را در حد نرمال حفظ کند. شکل ۱۴ ـ ۳ تلفیق آمپر، ولتاژ و سرعت حرکت را برای حصول جوش مطلوب نشان می‌دهد.

بازرسی و تأیید

با مهیا کردن ۴ عامل قبلی، زمینه حصول جوش خوب در کارگاه وجود دارد و عملیات جوشکاری می‌تواند تحت نظارت مهندس ناظر یا بازرس جوش انجام شود. انتهای کار بازرسی، تأیید می‌باشد. مهندس ناظر در این مرحله از کار نقش

بازرس جوش را بازی می‌کند. آن چیزی که در ساختمان‌های کوتاه می‌تواند مورد استفاده عملی باشد، بازرسی عینی است. انجام بازرسی‌های پرتونگاری، فراصوت و میدان مغناطیسی، تقریباً نشدنی است. استفاده از رنگ نافذ می‌تواند کمک سهل و ساده‌ای برای بازرس جوش باشد. ابزار کار مناسب دیگر شامل ذره‌بین برای تشخیص ترک‌های سطحی، چراغ قوه و دستگاه اندازه‌گیر ابعادی جوش (گیج جوشکاری) می‌تواند کمک مؤثر برای بازرس باشد. به‌هر حال ناظر باید آگاه از اصول بازرسی عینی باشد. در مورد جوش‌های نفوذی استفاده از آزمون فراصوت باید در برنامه کار قرار گیرد.



شکل ۱۴ ـ ۳ ترکیب آثار شدت جریان (آمپر)، اختلاف پتانسیل (ولتاژ) و سرعت حرکت دست برای حصول جوش مطلوب.

۱۴ ـ ۳ بازرسی عینی[1] (V.I)

یکی از مؤثرترین روش‌های بازرسی جوش، بازرسی عینی عملیات جوشکاری توسط بازرسین و ناظرین آموزش‌دیده است. طبق دستورالعمل آیین‌نامه جوشکاری ساختمانی، صد درصد جوش‌های انجام‌شده باید بازرسی عینی گردند. بازرسی عینی اگر به‌درستی انجام شود، از ارکان مهم بازرسی جوش می‌باشد.

1. Visual inspection

بازرسی‌های عینی غالباً در سه مرحله قبل از جوشکاری، در حین جوشکاری و بعد از جوشکاری مورد توجه قرار می‌گیرند. آن دسته از بازرسی عینی که قبل از جوشکاری و در حین جوشکاری انجام می‌شود در برنامه تضمین کیفیت و آن دسته از بازرسی که بعد از جوشکاری انجام می‌شود در برنامه کنترل کیفی قرار می‌گیرد.

در تمام موارد اعتقاد همگانی بر این قرار دارد که پیشگیری مقدم بر درمان (یا در ادبیات فنی، تعمیر) است. اصل مهم در برنامه بازرسی عینی، تنظیم برنامه‌های پیشگیرانه است که در طی آن تعداد جوش‌هایی که مورد ترمیم قرار می‌گیرند، کاهش یابند.

بازرسی عینی قبل از جوشکاری

اقداماتی که لازم است توسط بازرس جوش قبل از جوشکاری انجام شوند، عبارتند از :

۱ ـ تنظیم برنامه ثبت نتایج
۲ ـ کنترل دستورالعمل‌های جوشکاری
۳ ـ ارزیابی جوشکاران
۴ ـ تعیین نقاط کنترل
۵ ـ تنظیم برنامهٔ ثبت نتایج
۶ ـ کنترل مصالح فلز پایه و فلز جوش
۷ ـ کنترل زاویهٔ پخ، هندسهٔ درز، هم‌راستایی و همباد بودن درزها
۸ ـ کنترل پیش‌گرمایش لازم
۹ ـ کنترل عملیات برشکاری و تضاریس ناشی از برشکاری
۱۰ ـ شرایط عمومی کارگاه جوشکاری

بازرسی عینی در حین جوشکاری

اقداماتی که توسط بازرس جوش در حین جوشکاری انجام می‌شود، عبارتند از:

۱ ـ کنترل کیفیت نوار ریشه
۲ ـ کنترل هندسه درز جوش قبل از جوشکاری روی دیگر
۳ ـ دمای پیش‌گرمایش و دمای پاس‌های میانی
۴ ـ توالی جوش‌ها
۵ ـ کنترل ظاهر جوش
۶ ـ تمیزکاری جوش و گل جوش بین دو پاس متوالی
۷ ـ کنترل آمپراژ، ولتاژ و سرعت حرکت دست جوشکار
۸ ـ نوسان عرضی دست جوشکار (حداکثر ۲/۵ برابر ضخامت مفتول الکترود)

بازرسی عینی بعد از جوشکاری

اقداماتی که توسط بازرس جوش بعد از جوشکاری انجام می‌شود، عبارتند از:

۱ ـ ظاهر نهایی جوش

۲ ـ اندازه نهایی جوش

۳ ـ طول جوش

۴ ـ دقت‌های ابعادی

۵ ـ میزان اعوجاج

۶ ـ اصلاحات حرارتی

۷ ـ عیوب ظاهری شامل:

۷ ـ ۱ تخلخل ظاهری (تخلخل سوزنی)

۷ ـ ۲ عدم امتزاج کامل

۷ ـ ۳ عدم نفوذ کامل جوش در فلز پایه

۷ ـ ۴ بریدگی پای جوش

۷ ـ ۵ لوچه

۷ ـ ۶ ترک‌های سطحی

۷ ـ ۷ گرده بیش از حد جوش

بازرس جوش باید مجهز به‌ابزاری شامل اندازه‌گیر جوش، متر، کولیس، و چراغ قوه و ذره‌بین باشد.

۱۴ ـ ۴ جوش خوب چیست؟

برای اینکه جوشی قابل پذیرش بوده و به‌عنوان جوش خوب پذیرفته شود باید دارای صفات زیر باشد. اغلب این صفات را می‌توان در بازرسی عینی تأیید و یا مردود نمود.

۱ ـ زنجیره جوش دارای هندسه منظمی بوده و توازن کامل بین سرعت حرکت، آمپراژ و ولتاژ برقرار باشد. اگر این توازن برقرار نباشد، عیوب بعدی در جوش قابل ملاحظه خواهد بود .

۲ ـ جوش در فلز پایه نفوذ کافی و متقارن در دو طرف درز جوش داشته باشد. جوشی که نفوذ کافی ندارد همانند دمل دارای برجستگی زیاد خواهد بود. جوشی که به‌علت آمپر زیاد دارای نفوذ بیش از حد باشد، کاملاً در فلز پایه فرو رفته و ولو می‌شود.

۳ ـ هندسه و ابعاد جوش کامل باشد. با گوشه یک مقوا می‌توان وسیله مناسبی برای اندازه‌گیری ابعادی جوش تهیه نمود و نیاز به‌اندازه‌گیر پیشرفته نمی‌باشد (شکل ۱۴ ـ ۴).

۴ ـ بریدگی در لبه‌های جوش وجود نداشته باشد. بریدگی ناشی از آمپراژ زیاد دستگاه می‌باشد.

۵ ـ پاشیدگی در اطراف نوار وجود نداشته باشد، پاشیدگی به‌علت آمپر بالا و کثیف بودن درز به‌وجود می‌آید.

۶ ـ ترک سطحی وجود نداشته باشد.

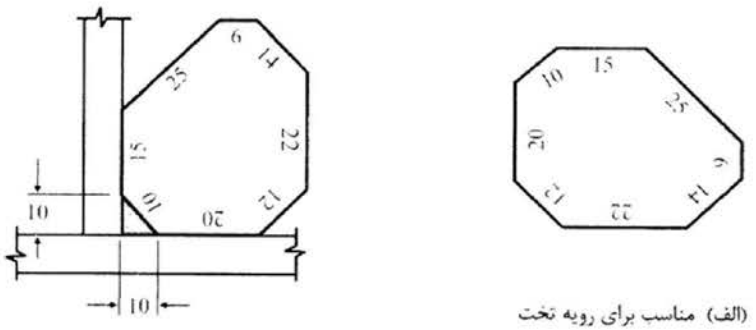
۷ ـ حفرات سطحی (کرمو بودن سطحی) وجود نداشته باشد.

۸ ـ ترک‌های عمقی و حفرات عمقی با بازرسی عینی قابل مشاهده نیستند.

۹ ـ جوش لوچه نشده باشد، لوچه شدن در اثر امتزاج ناقص با یکی از سطوح مجاور درز می‌باشد.

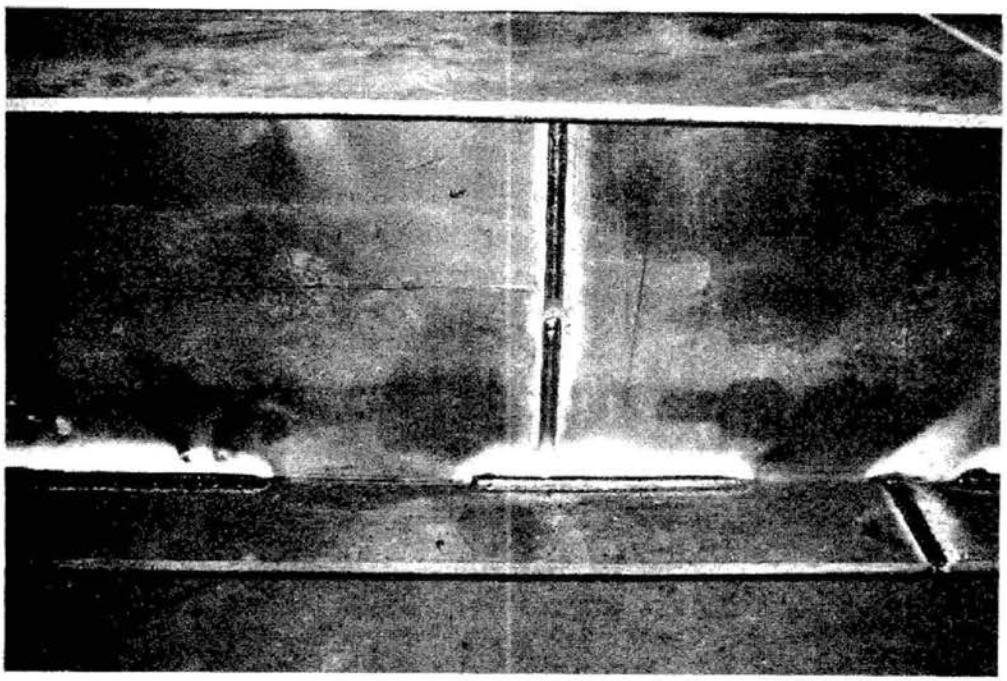
حالت F در شکل ۱۴ ـ ۳ الگوی مناسب برای نوار جوش قابل پذیرش است. اهمال و سستی در انجام وظیفه نظارت قابل بخشش نیست ولی وسواس زیاد نیز ترمزی برای جریان روان کار است و با اعتماد به‌نفس مناسب می‌توان کارگاه را پذیرای جوش خوب نمود.

در ادامه تصاویری برای الگوسازی جوش‌های قابل پذیرش و مردود ارایه می‌شود (شکل‌های ۱۴ ـ ۵ تا ۱۴ ـ ۱۶).

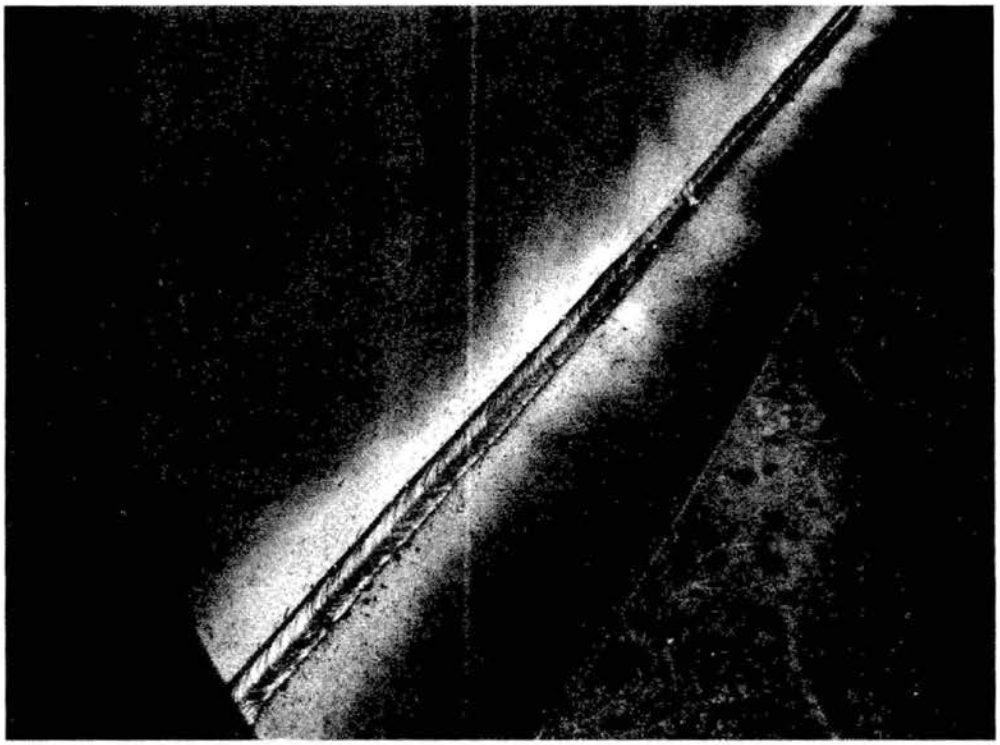


(الف) مناسب برای رویه تخت

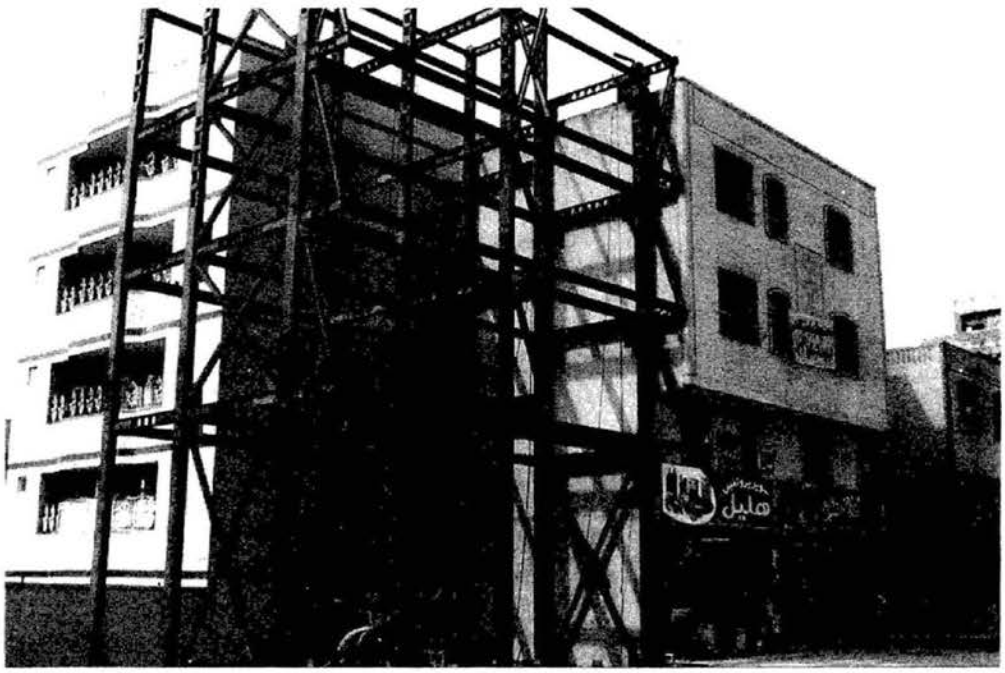
شکل ۱۴ ـ ۴ اندازه‌گیری ساده جوش.



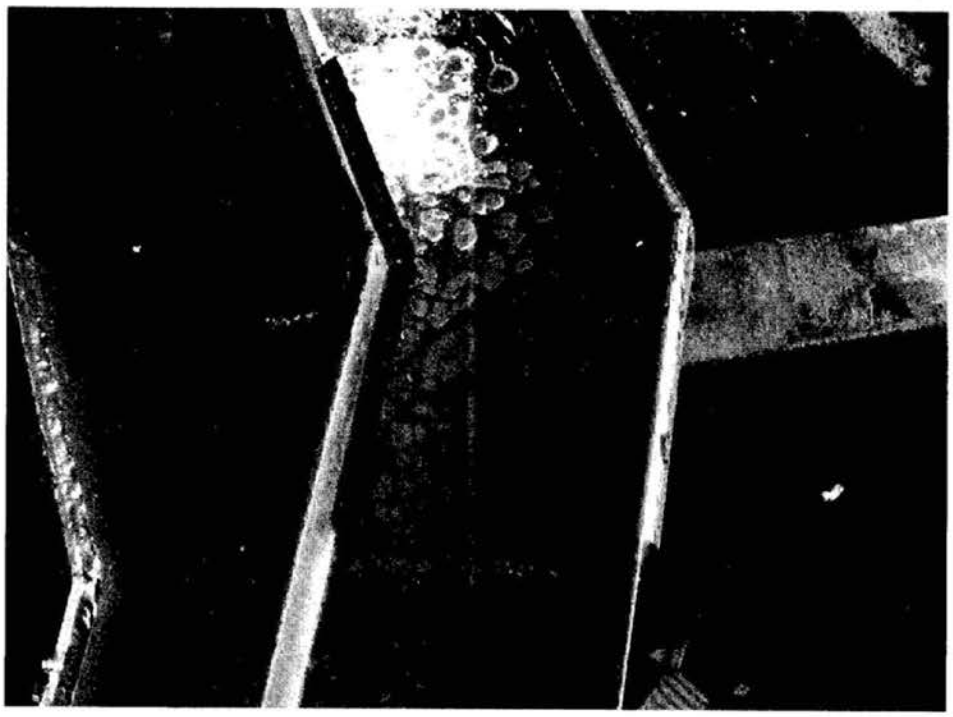
شکل ۱۴ ـ ۵ وصله لب به‌لب مناسب تیر.



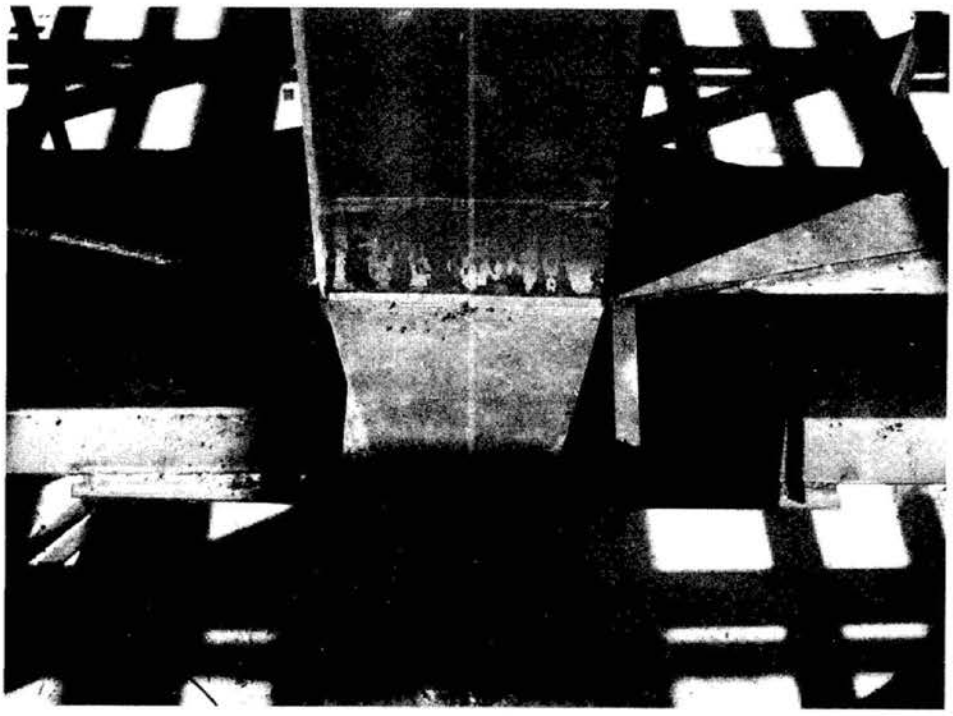
شکل ۱۴ ـ ۶ جوش بال به‌جان مناسب.



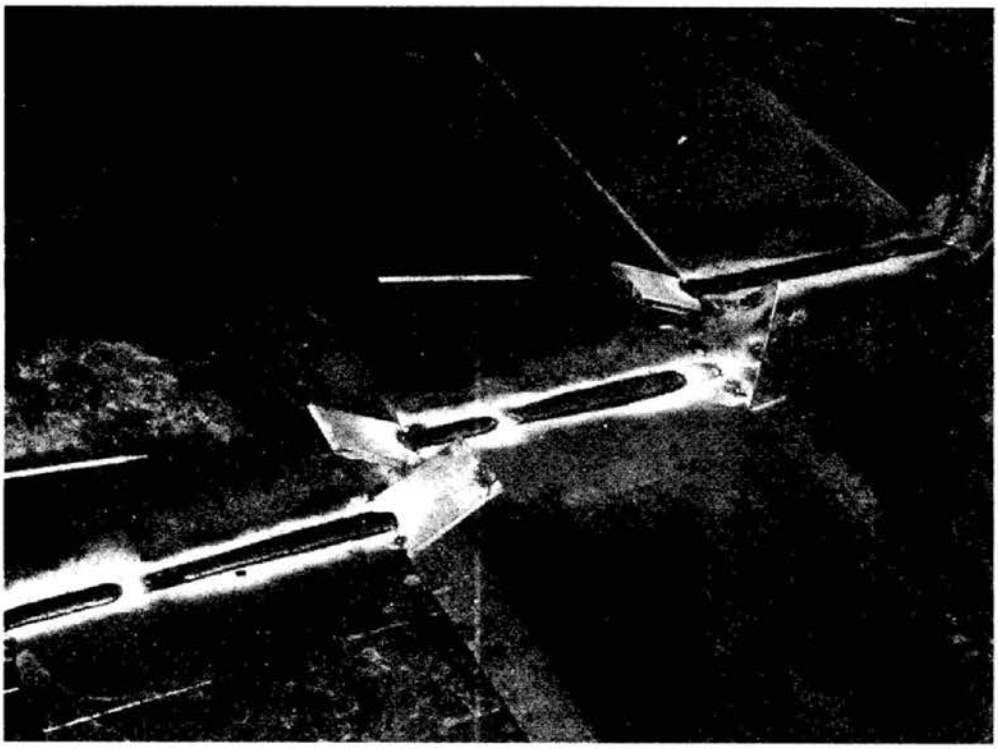
شکل ۱۴ ـ ۷ اسکلت فولادی مناسب با تیرهای لانه‌زنبوری.



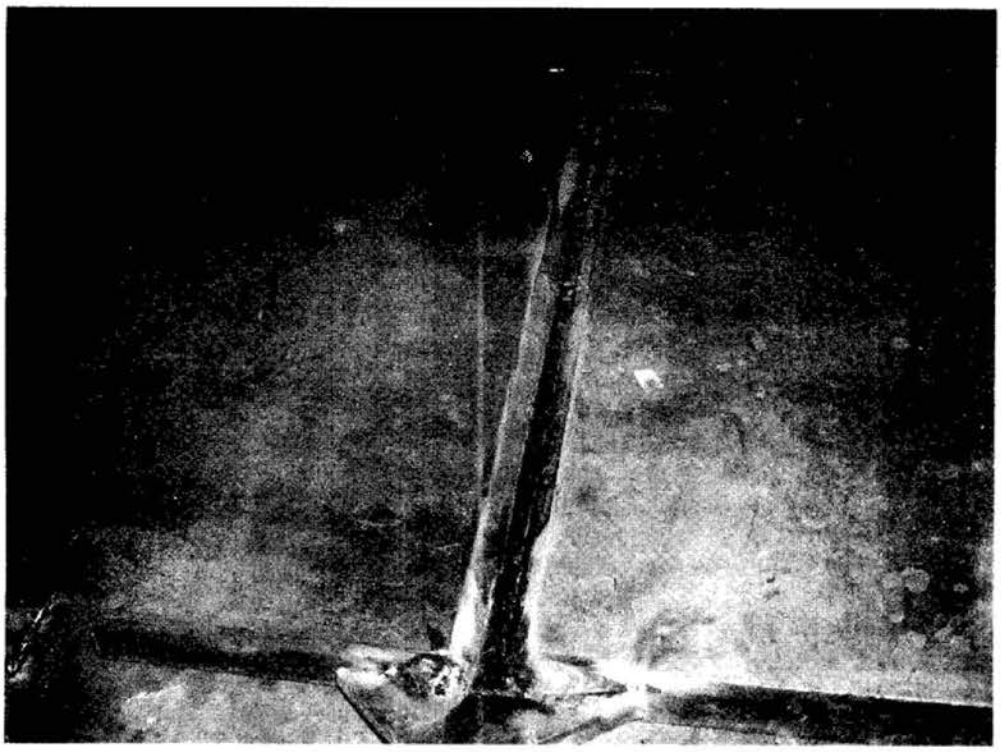
شکل ۱۴ ـ ۸ جوش مناسب شمشیری راه پله.



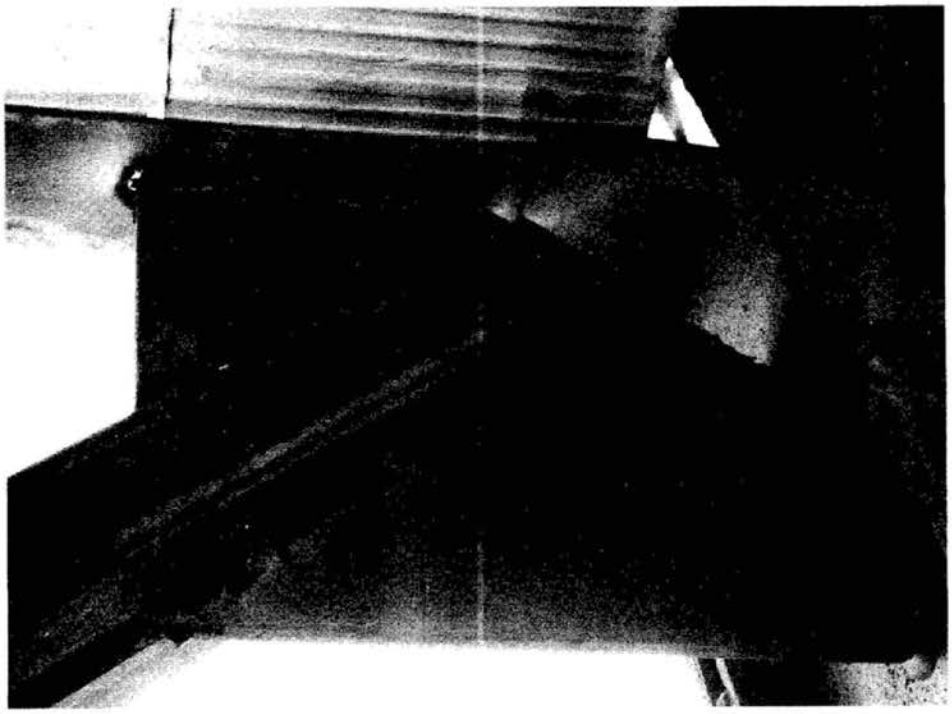
شکل ۱۴ ـ ۹ ورق روسری اتصال تیر به‌ستون با جوش مناسب.



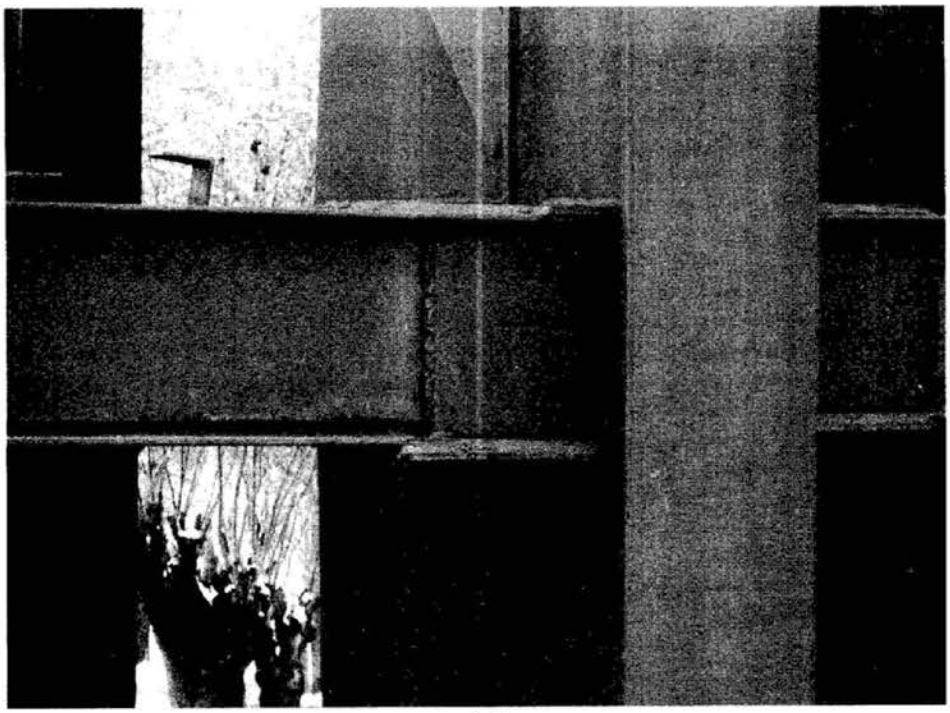
شکل ۱۴ ـ ۱۰ جوش شیاری مناسب.



شکل ۱۴ ـ ۱۱ جوش مناسب برای عبور اول در اتصال لب به‌لب دو ورق.

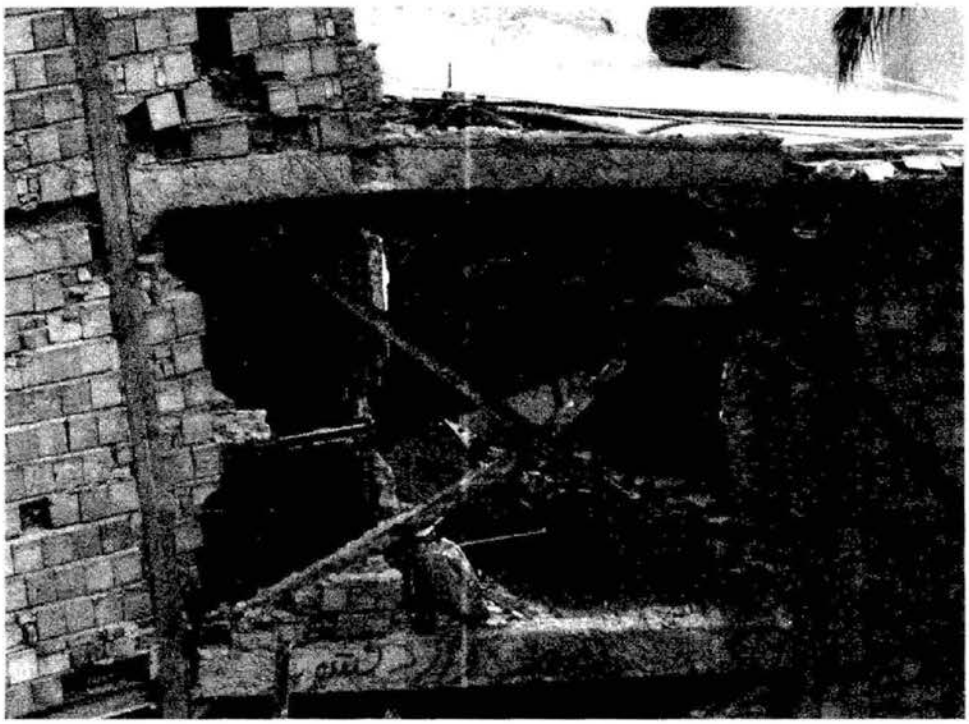


(الف)

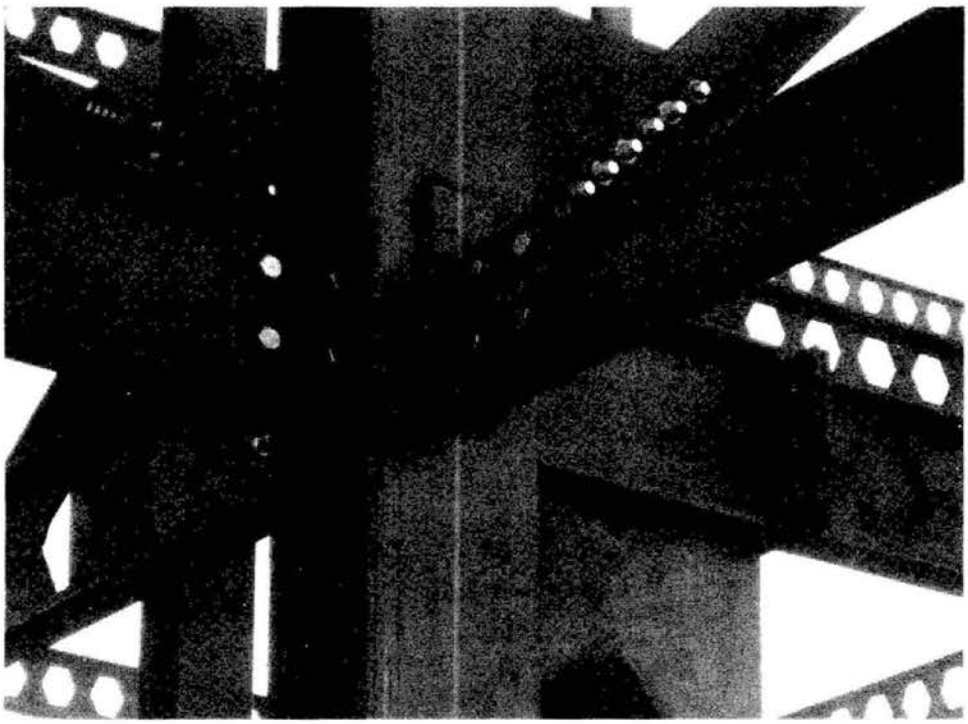


(ب)

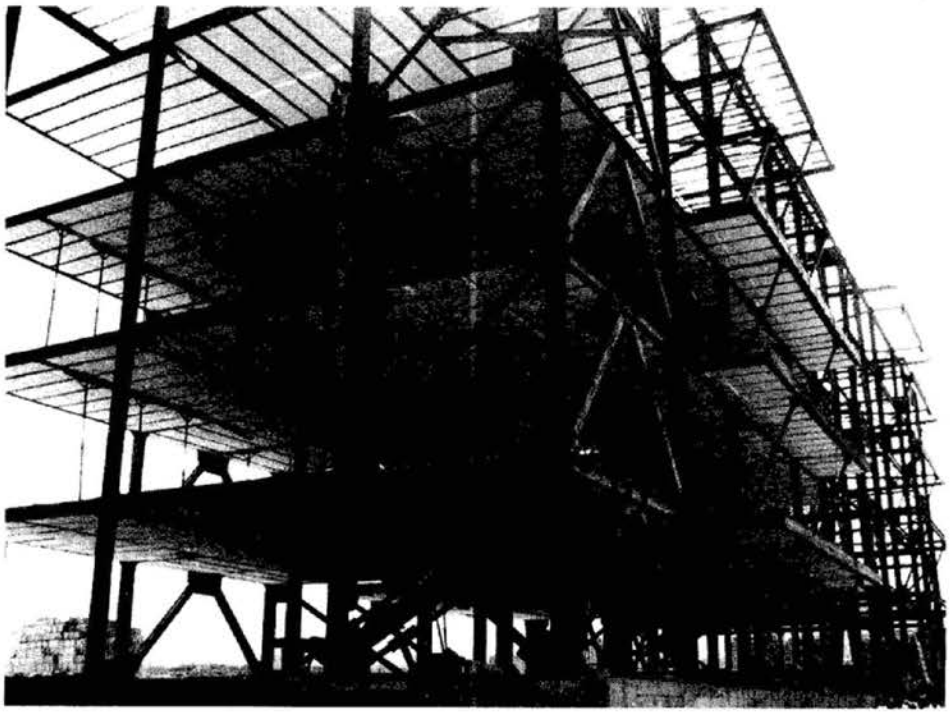
شکل ۱۴ ـ ۱۲ اجرای نامناسب جوش‌های سربالا.



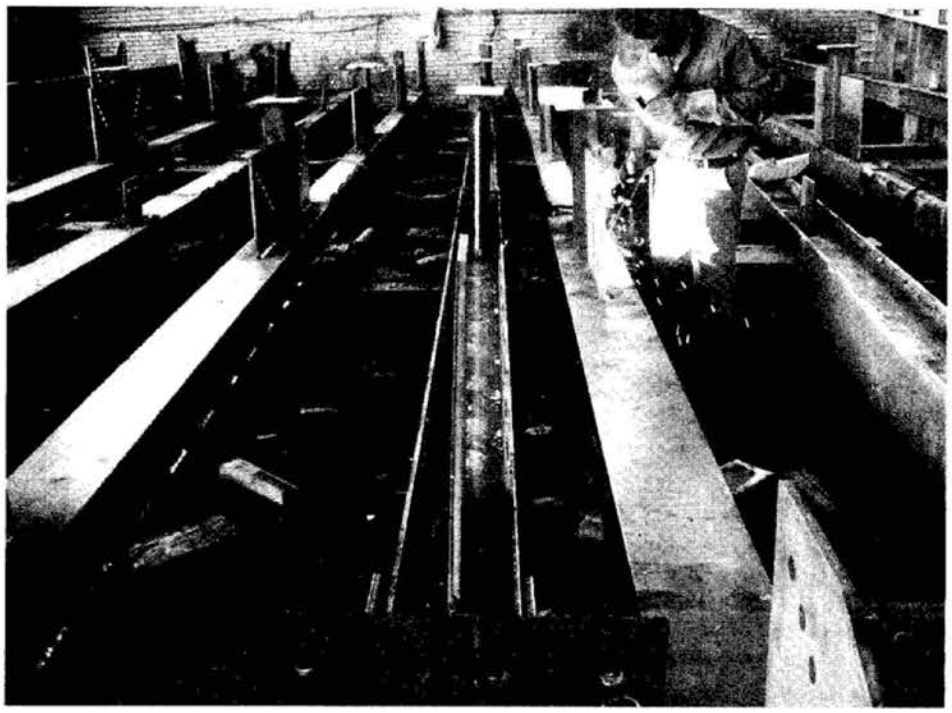
شکل ۱۴ ـ ۱۳ جوش ناقص ورق اتصال به‌ستون که سبب کنده شدن ورق تحت نیروی جانبی زلزله شده است (زلزله بم).



شکل ۱۴ ـ ۱۴ اجرای مناسب اسکلت فولادی.



شکل ۱۴ ـ ۱۵ اجرای مناسب اسکلت فولادی.



شکل ۱۴ ـ ۱۶ تمهیدات مناسب برای جوشکاری.

۱۵ برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

برنامه‌ریزی آزمایش‌ها ۱۵

یکی از سؤالات مهمی که در برنامه‌ریزی آزمایش‌های جوش پیش می‌آید، تعیین درصدی از جوش‌ها می‌باشند که باید مورد آزمایش غیرمخرب قرار گیرند. آیین‌نامه جوشکاری ساختمانی در متن اصلی خود اشاره صریحی به این موضوع نکرده است، لیکن به‌روشنی از آزمایش کامل، آزمایش جزیی و خال آزمایش نام برده است. در تعیین میزان آزمایش‌ها دو واقعیت اثر متقابل برهم دارند، هزینه آزمایش‌ها، و سلامتی و ایمنی جوش‌ها. بدون شک روشی که با حداقل هزینه، حداکثر ایمنی مطلوب را به‌وجود آورد، مورد توجه خواهد بود. در جدول ۱۵ـ ۱ دستورالعملی که در اکثر قراردادهای ساخت قطعات فولادی مورد استناد قرار می‌گیرد، ارایه شده است.

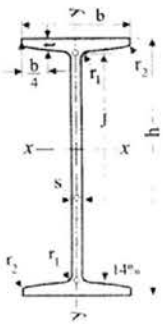
جدول ۱۵ ـ ۱ میزان آزمایش‌های غیرمخرب هنگام تولید*

نوع جوش مورد آزمایش	نوع آزمایش
۱ ـ صد درصد کلیه جوش‌ها	بازرسی عینی
۲ ـ صد درصد جوش‌های لب به‌لب عرضی بال‌های کششی، اعضای کششی خرپاها، $\frac{1}{6}$ ارتفاع جان تیرها در مجاورت بال کششی*	پرتونگاری یا فراصوت
۳ ـ ده درصد جوش‌های لب به‌لب طولی بال‌های کششی و اعضای کششی خرپاها	پرتونگاری یا فراصوت
۴ ـ بیست درصد جوش‌های لب به‌لب عرضی و طولی در بال‌های فشاری و اعضای فشاری خرپاها	پرتونگاری یا فراصوت
۵ ـ بیست درصد جوش‌های لب به‌لب عرضی جان تیرها که شامل بند ۲ فوق نمی‌باشد و جوش‌های لب به‌لب طولی جان تیرها	پرتونگاری یا فراصوت
۶ ـ ده درصد جوش گوشه بال به‌جان	براده مغناطیسی یا رنگ نافذ

* در صورت حصول نتایج مثبت، مهندس ناظر می‌تواند دستور تقلیل آزمایش‌ها را تا سقف ۳۰ درصد صادر نماید. در صورت بروز نامنظمی در نتایج آزمایش و حضور جوش‌های معیوب، درصد بازرسی مجدداً به‌وضعیت جدول برمی‌گردد.

۱ مشخصات هندسی نیمرخ‌های ساختمانی

نیمرخ معمولی INP



A = سطح مقطع

G = وزن واحد طول

U = سطح جانبی واحد طول

I = ممان اینرسی

S = اساس مقطع

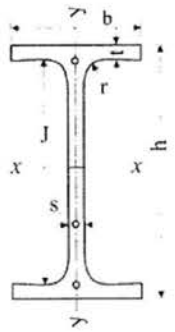
r = شعاع ژیراسیون

Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی (محور x)

J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

ابعاد به‌میلی‌متر						A	G	U	x−x			y−y			Q	J
l	h	b	$s=r_1$	t	r_2	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm
۸۰	۸۰	۴۲	۳/۹	۵/۹	۲/۳	۷/۵۷	۵/۹۴	۰/۳۰۴	۷۷/۸	۱۹/۵	۳/۲۰	۶/۲۹	۳/۰۰	۰/۹۱	۱۱/۴	۶/۸۴
۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۴/۵	۶/۸	۲/۷	۱۰/۶	۸/۳۴	۰/۳۷۰	۱۷۱	۳۴/۲	۴/۰۱	۱۲/۲	۴/۸۸	۱/۰۷	۱۹/۹	۸/۵۷
۱۲۰	۱۲۰	۵۸	۵/۱	۷/۷	۳/۱	۱۴/۲	۱۱/۱	۰/۴۳۹	۳۲۸	۵۴/۷	۴/۸۱	۲۱/۵	۷/۴۱	۱/۲۳	۳۱/۸	۱۰/۳
۱۴۰	۱۴۰	۶۶	۵/۷	۸/۶	۳/۴	۱۸/۲	۱۴/۳	۰/۵۰۲	۵۷۳	۸۱/۹	۵/۶۱	۳۵/۲	۱۰/۷	۱/۴۰	۴۷/۷	۱۲/۰
۱۶۰	۱۶۰	۷۴	۶/۳	۹/۵	۳/۸	۲۲/۸	۱۷/۹	۰/۵۷۵	۹۳۵	۱۱۷	۶/۴۰	۵۴/۷	۱۴/۸	۱/۵۵	۶۸/۰	۱۳/۷
۱۸۰	۱۸۰	۸۲	۶/۹	۱۰/۴	۴/۱	۲۷/۹	۲۱/۹	۰/۶۴۰	۱۴۵۰	۱۶۱	۷/۲۰	۸۱/۳	۱۹/۸	۱/۷۱	۹۳/۴	۱۵/۵
۲۰۰	۲۰۰	۹۰	۷/۵	۱۱/۳	۴/۵	۳۳/۴	۲۶/۲	۰/۷۰۹	۲۱۴۰	۲۱۴	۸/۰۰	۱۱۷	۲۶/۰	۱/۸۷	۱۲۵	۱۷/۲
۲۲۰	۲۲۰	۹۸	۸/۱	۱۲/۲	۴/۹	۳۹/۵	۳۱/۱	۰/۷۷۵	۳۰۶۰	۲۷۸	۸/۸۰	۱۶۲	۳۳/۱	۲/۰۲	۱۶۲	۱۸/۹
۲۴۰	۲۴۰	۱۰۶	۸/۷	۱۳/۱	۵/۲	۴۶/۱	۳۶/۲	۰/۸۴۴	۴۲۵۰	۳۵۴	۹/۵۹	۲۲۱	۴۱/۷	۲/۲۰	۲۰۶	۲۰/۶
۲۶۰	۲۶۰	۱۱۳	۹/۴	۱۴/۱	۵/۶	۵۳/۳	۴۱/۹	۰/۹۰۶	۵۷۴۰	۴۴۲	۱۰/۴	۲۸۸	۵۱/۰	۲/۳۲	۲۵۷	۲۲/۳
۲۸۰	۲۸۰	۱۱۹	۱۰/۱	۱۵/۲	۶/۱	۶۱/۰	۴۷/۹	۰/۹۶۶	۷۵۹۰	۵۴۲	۱۱/۱	۳۶۴	۶۱/۲	۲/۴۵	۳۱۶	۲۴/۰
۳۰۰	۳۰۰	۱۲۵	۱۰/۸	۱۶/۲	۶/۵	۶۹/۰	۵۴/۲	۱/۰۳	۹۸۰۰	۶۵۳	۱۱/۹	۴۵۱	۷۲/۲	۲/۵۶	۳۸۱	۲۵/۷
۳۲۰	۳۲۰	۱۳۱	۱۱/۵	۱۷/۳	۶/۹	۷۷/۷	۶۱/۰	۱/۰۹	۱۲۵۱۰	۷۸۳	۱۲/۷	۵۵۵	۸۴/۷	۲/۶۷	۴۵۷	۲۷/۴
۳۴۰	۳۴۰	۱۳۷	۱۲/۲	۱۸/۳	۷/۳	۸۶/۷	۶۸/۰	۱/۱۵	۱۵۷۰۰	۹۲۳	۱۳/۳	۶۷۴	۹۸/۴	۲/۸۰	۵۴۰	۲۹/۱
۳۶۰	۳۶۰	۱۴۳	۱۳/۰	۱۹/۵	۷/۸	۹۷/۰	۷۶/۱	۱/۲۱	۱۹۶۱۰	۱۰۹۰	۱۴/۲	۸۱۸	۱۱۴	۲/۹۰	۶۳۸	۳۰/۷
۳۸۰	۳۸۰	۱۴۹	۱۳/۷	۲۰/۵	۸/۲	۱۰۷	۸۴/۰	۱/۲۷	۲۴۰۱۰	۱۲۶۰	۱۵/۰	۹۷۵	۱۳۱	۳/۰۲	۷۴۱	۳۲/۴
۴۰۰	۴۰۰	۱۵۵	۱۴/۴	۲۱/۶	۸/۶	۱۱۸	۹۲/۴	۱/۳۳	۲۹۳۱۰	۱۴۶۰	۱۵/۷	۱۱۶۰	۱۴۹	۳/۱۳	۸۵۷	۳۴/۱
۴۲۵	۴۲۵	۱۶۳	۱۵/۳	۲۳/۰	۹/۲	۱۳۲	۱۰۴	۱/۴۱	۳۶۹۷۰	۱۷۴۰	۱۶/۷	۱۴۴۰	۱۷۶	۳/۳۰	۱۰۲۰	۳۶/۲
۴۵۰	۴۵۰	۱۷۰	۱۶/۲	۲۴/۳	۹/۷	۱۴۷	۱۱۵	۱/۴۸	۴۵۸۵۰	۲۰۴۰	۱۷/۷	۱۷۳۰	۲۰۳	۳/۴۳	۱۲۰۰	۳۸/۳
۴۷۵	۴۷۵	۱۷۸	۱۷/۱	۲۵/۶	۱۰/۳	۱۶۳	۱۲۸	۱/۵۵	۵۶۴۸۰	۲۳۸۰	۱۸/۶	۲۰۹۰	۲۳۵	۳/۶۰	۱۴۰۰	۴۰/۴
۵۰۰	۵۰۰	۱۸۵	۱۸/۰	۲۷/۰	۱۰/۸	۱۷۹	۱۴۱	۱/۶۳	۶۸۷۴۰	۲۷۵۰	۱۹/۶	۲۴۸۰	۲۶۸	۳/۷۲	۱۶۲۰	۴۲/۴
۵۵۰	۵۵۰	۲۰۰	۱۹/۰	۳۰/۰	۱۱/۹	۲۱۲	۱۶۶	۱/۸۰	۹۹۱۸۰	۳۶۱۰	۲۱/۶	۳۴۹۰	۳۴۹	۴/۰۲	۲۱۲۰	۴۶/۸
۶۰۰	۶۰۰	۲۱۵	۲۱/۶	۳۲/۴	۱۳/۰	۲۵۴	۱۹۹	۱/۹۲	۱۳۹۰۰۰	۴۶۳۰	۲۳/۴	۴۶۷۰	۴۳۴	۴/۳۰	۲۷۳۰	۵۰/۹

نیمرخ نیم‌پهن IPE

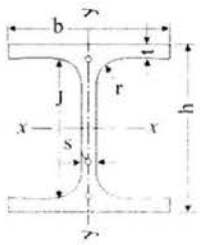


A = سطح مقطع
G = وزن واحد طول
U = سطح جانبی واحد طول
I = ممان اینرسی
S = اساس مقطع
r = شعاع ژیراسیون
Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی (محور x)
J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

IPE	ابعاد به‌میلی‌متر					A	G	U	x−x			y−y			Q	J
	h	b	s	t	r	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm
۸۰	۸۰	۴۶	۳/۸	۵/۲	۵	۷/۶۴	۶/۰۰	۰/۳۲۸	۸۰/۱	۲۰/۰	۳/۲۴	۸/۴۹	۳/۶۹	۱/۰۵	۱۱/۶	۶/۹۰
۱۰۰	۱۰۰	۵۵	۴/۱	۵/۷	۷	۱۰/۳	۸/۱۰	۰/۴۰۰	۱۷۱	۳۴/۲	۴/۰۷	۱۵/۹	۵/۷۹	۱/۲۴	۱۹/۷	۸/۶۸
۱۲۰	۱۲۰	۶۴	۴/۴	۶/۳	۷	۱۳/۲	۱۰/۴	۰/۴۷۵	۳۱۸	۵۳/۰	۴/۹۰	۲۷/۷	۸/۶۵	۱/۴۵	۳۰/۴	۱۰/۵
۱۴۰	۱۴۰	۷۳	۴/۷	۶/۹	۷	۱۶/۴	۱۲/۹	۰/۵۵۱	۵۴۱	۷۷/۳	۵/۷۴	۴۴/۹	۱۲/۳	۱/۶۵	۴۴/۲	۱۲/۳
۱۶۰	۱۶۰	۸۲	۵/۰	۷/۴	۹	۲۰/۱	۱۵/۸	۰/۶۲۳	۸۶۹	۱۰۹	۶/۵۸	۶۸/۳	۱۶/۷	۱/۸۴	۶۱/۹	۱۴/۰
۱۸۰	۱۸۰	۹۱	۵/۳	۸/۰	۹	۲۳/۹	۱۸/۸	۰/۶۹۸	۱۳۲۰	۱۴۶	۷/۴۳	۱۰۱	۲۲/۲	۲/۰۵	۸۳/۲	۱۵/۸
۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵/۶	۸/۵	۱۲	۲۸/۵	۲۲/۴	۰/۷۶۸	۱۹۴۰	۱۹۴	۸/۲۶	۱۴۲	۲۸/۵	۲/۲۴	۱۱۰	۱۷/۶
۲۲۰	۲۲۰	۱۱۰	۵/۹	۹/۲	۱۲	۳۳/۴	۲۶/۲	۰/۸۴۸	۲۷۷۰	۲۵۲	۹/۱۱	۲۰۵	۳۷/۳	۲/۴۸	۱۴۳	۱۹/۴
۲۴۰	۲۴۰	۱۲۰	۶/۲	۹/۸	۱۵	۳۹/۱	۳۰/۷	۰/۹۲۲	۳۸۹۰	۳۲۴	۹/۹۷	۲۸۴	۴۷/۳	۲/۶۹	۱۸۳	۲۱/۲
۲۷۰	۲۷۰	۱۳۵	۶/۶	۱۰/۲	۱۵	۴۵/۹	۳۶/۱	۱/۰۴۱	۵۷۹۰	۴۲۹	۱۱/۲	۴۲۰	۶۲/۲	۳/۰۲	۲۴۲	۲۳/۹
۳۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۷/۱	۱۰/۷	۱۵	۵۳/۸	۴۲/۲	۱/۱۵۹	۸۳۶۰	۵۵۷	۱۲/۵	۶۰۴	۸۰/۵	۳/۳۵	۳۱۴	۲۶/۶
۳۳۰	۳۳۰	۱۶۰	۷/۵	۱۱/۵	۱۸	۶۲/۶	۴۹/۱	۱/۲۵۴	۱۱۷۷۰	۷۱۳	۱۳/۷	۷۸۸	۹۸/۵	۳/۵۵	۴۰۲	۲۹/۳
۳۶۰	۳۶۰	۱۷۰	۸/۰	۱۲/۷	۱۸	۷۲/۷	۵۷/۱	۱/۳۵۳	۱۶۲۷۰	۹۰۴	۱۵/۰	۱۰۴۰	۱۲۳	۳/۷۹	۵۱۰	۳۱/۹
۴۰۰	۴۰۰	۱۸۰	۸/۶	۱۳/۵	۲۱	۸۴/۵	۶۶/۳	۱/۴۶۷	۲۳۱۳۰	۱۱۶۰	۱۶/۵	۱۳۲۰	۱۴۶	۳/۹۵	۶۵۴	۳۵/۴
۴۵۰	۴۵۰	۱۹۰	۹/۴	۱۴/۶	۲۱	۹۸/۸	۷۷/۶	۱/۶۰۵	۳۳۷۴۰	۱۵۰۰	۱۸/۵	۱۶۸۰	۱۷۶	۴/۱۲	۸۵۱	۳۹/۷
۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰/۲	۱۶/۰	۲۱	۱۱۶	۹۰/۷	۱/۷۴۴	۴۸۲۰۰	۱۹۳۰	۲۰/۴	۲۱۴۰	۲۱۴	۴/۳۱	۱۱۰۰	۴۳/۹
۵۵۰	۵۵۰	۲۱۰	۱۱/۱	۱۷/۲	۲۴	۱۳۴	۱۰۶	۱/۸۷۷	۶۷۱۲۰	۲۴۴۰	۲۲/۳	۲۶۷۰	۲۵۴	۴/۴۵	۱۳۹۰	۴۸/۲
۶۰۰	۶۰۰	۲۲۰	۱۲/۰	۱۹/۰	۲۴	۱۵۶	۱۲۲	۲/۰۱۵	۹۲۰۸۰	۳۰۷۰	۲۴/۳	۳۳۹۰	۳۰۸	۴/۶۶	۱۷۶۰	۵۲/۴

نیمرخ بال پهن سبک IPB_1

معادل HE-A

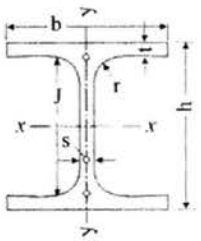


A = سطح مقطع
G = وزن واحد طول
U = سطح جانبی واحد طول
I = ممان اینرسی
S = اساس مقطع
r = شعاع ژیراسیون
Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی (محور x)
J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

IPB_1	ابعاد به‌میلی‌متر					A	G	U	x−z			y−y			Q	J
	h	b	s	t	r	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm
۱۰۰	۹۶	۱۰۰	۵	۸	۱۲	۲۱/۲	۱۶/۷	۰/۵۶۱	۳۴۹	۷۲/۸	۴/۰۶	۱۳۴	۲۶/۸	۲/۵۱	۴۱/۵	۸/۴۱
۱۲۰	۱۱۴	۱۲۰	۵	۸	۱۲	۲۵/۳	۱۹/۹	۰/۶۷۷	۶۰۶	۱۰۶	۴/۸۹	۲۳۱	۳۸/۵	۳/۰۲	۵۰/۷	۱۰/۱
۱۴۰	۱۳۳	۱۴۰	۵/۵	۸/۵	۱۲	۳۱/۴	۲۴/۷	۰/۷۹۴	۱۰۳۰	۱۵۵	۵/۷۳	۳۸۹	۵۵/۶	۳/۵۲	۸۵/۷	۱۱/۹
۱۶۰	۱۵۲	۱۶۰	۶	۹	۱۵	۳۸/۸	۳۰/۴	۰/۹۰۶	۱۶۷۰	۲۲۰	۶/۵۷	۶۱۶	۷۶/۹	۳/۹۸	۱۲۳	۱۳/۶
۱۸۰	۱۷۱	۱۸۰	۶	۹/۵	۱۵	۴۵/۳	۳۵/۵	۱/۰۲	۲۵۱۰	۲۹۴	۷/۴۵	۹۲۵	۱۰۳	۴/۵۲	۱۶۲	۱۵/۵
۲۰۰	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۱۸	۵۳/۸	۴۲/۳	۱/۱۴	۳۶۹۰	۳۸۹	۸/۲۸	۱۳۴۰	۱۳۴	۴/۰۸	۲۱۵	۱۷/۲
۲۲۰	۲۱۰	۲۲۰	۷	۱۱	۱۸	۶۴/۳	۵۰/۵	۱/۲۶	۵۴۱۰	۶۱۵	۹/۱۷	۱۹۵۰	۱۷۸	۵/۵۱	۲۸۴	۱۹/۰
۲۴۰	۲۳۰	۲۴۰	۷/۵	۱۲	۲۱	۷۶/۸	۶۰/۳	۱/۳۷	۷۷۸۰	۶۷۵	۱۰/۱	۲۷۷۰	۲۳۱	۶/۰۰	۳۷۲	۲۰/۹
۲۶۰	۲۵۰	۲۶۰	۷/۵	۱۲/۵	۲۴	۸۶/۸	۶۸/۲	۱/۴۸	۱۰۴۵۰	۸۳۶	۱۱/۰	۳۶۷۰	۲۸۲	۶/۵۰	۴۶۰	۲۲/۷
۲۸۰	۲۷۰	۲۸۰	۸	۱۳	۲۴	۹۷/۳	۷۶/۴	۱/۶۰	۱۳۶۷۰	۱۰۱۰	۱۱/۹	۴۷۶۰	۳۴۰	۷/۰۰	۵۵۶	۲۴/۶
۳۰۰	۲۹۰	۳۰۰	۸/۵	۱۴	۲۷	۱۱۳	۸۸/۳	۱/۷۲	۱۸۲۶۰	۱۲۶۰	۱۲/۷	۶۳۱۰	۴۲۱	۷/۴۹	۶۹۲	۲۶/۴
۳۲۰	۳۱۰	۳۰۰	۹	۱۵/۵	۲۷	۱۲۴	۹۷/۵	۱/۷۶	۲۳۹۳۰	۱۴۸۰	۱۳/۶	۶۹۹۰	۴۶۶	۷/۴۹	۸۱۴	۲۸/۲
۳۴۰	۳۳۰	۳۰۰	۹/۵	۱۶/۵	۲۷	۱۳۳	۱۰۵	۱/۷۹	۲۷۶۹۰	۱۶۸۰	۱۴/۴	۷۴۴۰	۴۹۶	۷/۴۶	۹۲۵	۲۹/۹
۳۶۰	۳۵۰	۳۰۰	۱۰	۱۷/۵	۲۷	۱۴۳	۱۱۲	۱/۸۳	۳۳۰۹۰	۱۸۹۰	۱۵/۲	۷۸۹۰	۵۲۶	۷/۴۳	۱۰۴۰	۳۱/۷
۴۰۰	۳۹۰	۳۰۰	۱۱	۱۹	۲۷	۱۵۹	۱۲۵	۱/۹۱	۴۵۰۷۰	۲۳۱۰	۱۶/۸	۸۵۶۰	۵۷۱	۷/۳۴	۱۳۸۰	۳۵/۲
۴۵۰	۴۴۰	۳۰۰	۱۱/۵	۲۱	۲۷	۱۷۸	۱۴۰	۲/۰۱	۶۳۷۲۰	۲۹۰۰	۱۸/۹	۹۴۷۰	۶۳۱	۷/۲۹	۱۶۱۰	۳۹/۶
۵۰۰	۴۹۰	۳۰۰	۱۲	۲۳	۲۷	۱۹۸	۱۵۵	۲/۱۱	۸۶۹۷۰	۳۵۵۰	۲۱/۰	۱۰۳۷۰	۶۹۱	۷/۲۴	۱۹۷۰	۴۴/۱
۵۵۰	۵۴۰	۳۰۰	۱۲/۵	۲۴	۲۷	۲۱۲	۱۶۶	۲/۲۱	۱۱۱۹۰۰	۴۱۵۰	۲۳/۰	۱۰۸۲۰	۷۲۱	۷/۱۵	۲۳۱۰	۴۸/۴
۶۰۰	۵۹۰	۳۰۰	۱۳	۲۵	۲۷	۲۲۶	۱۷۸	۲/۳۱	۱۴۱۲۰۰	۴۷۹۰	۲۵/۰	۱۱۲۷۰	۷۵۱	۷/۰۵	۲۶۸۰	۵۲/۸
۶۵۰	۶۴۰	۳۰۰	۱۳/۵	۲۶	۲۷	۲۴۲	۱۹۰	۲/۴۱	۱۷۵۲۰۰	۵۴۷۰	۲۶/۹	۱۱۷۲۰	۷۸۲	۶/۹۷	۳۰۷۰	۵۷/۱
۷۰۰	۶۹۰	۳۰۰	۱۴/۵	۲۷	۲۷	۲۶۰	۲۰۴	۲/۵۰	۲۱۵۳۰۰	۶۲۴۰	۲۸/۸	۱۳۱۸۰	۸۱۲	۶/۸۴	۳۵۲۰	۶۱/۲
۸۰۰	۷۹۰	۳۰۰	۱۵	۲۸	۳۰	۲۸۶	۲۲۴	۲/۷۰	۳۰۳۴۰۰	۷۶۸۰	۳۲/۶	۱۲۶۴۰	۸۴۳	۶/۶۵	۴۳۵۰	۶۹/۸
۹۰۰	۸۹۰	۳۰۰	۱۶	۳۰	۳۰	۳۲۱	۲۵۲	۲/۹۰	۴۲۲۱۰۰	۹۴۸۰	۳۶/۳	۱۳۵۵۰	۹۰۳	۶/۵۰	۵۴۱۰	۷۸/۱
۱۰۰۰	۹۹۰	۳۰۰	۱۶/۵	۳۱	۳۰	۳۴۷	۲۷۲	۳/۱۰	۵۵۳۸۰۰	۱۱۱۹۰	۴۰/۰	۱۴۰۰۰	۹۳۴	۶/۳۵	۶۴۱۰	۸۶/۴

نیمرخ بال‌پهن معمولی IPB

معادل HE-B

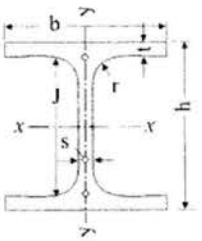


A = سطح مقطع
G = وزن واحد طول
U = سطح جانبی واحد طول
I = ممان اینرسی
S = اساس مقطع
r = شعاع ژیراسیون
Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی (محور x)
J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

IPB	ابعاد به‌میلی‌متر						A	G	U	x−x			y−y			Q	J
	h	b	s	t	r_1	r_2	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶	۱۰	۱۲	-	۲۶/۰	۲۰/۴	۰/۵۶۷	۴۵۰	۸۹/۹	۴/۱۶	۱۶۷	۳۳/۵	۲/۵۳	۵۲/۱	۸/۶۳
۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۶/۵	۱۱	۱۲	-	۳۴/۰	۲۶/۷	۰/۶۸۶	۸۶۴	۱۴۴	۵/۰۴	۳۱۸	۵۲/۹	۳/۰۶	۸۲/۶	۱۰/۵
۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۷	۱۲	۱۲	-	۴۳/۰	۳۳/۷	۰/۸۰۵	۱۵۱۰	۲۱۶	۵/۹۳	۵۵۰	۷۸/۵	۳/۵۸	۱۲۳	۱۲/۳
۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۸	۱۳	۱۵	-	۵۴/۳	۴۲/۶	۰/۹۱۸	۲۴۹۰	۳۱۱	۶/۷۸	۸۸۹	۱۱۱	۴/۰۵	۱۷۷	۱۴/۱
۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۸/۵	۱۴	۱۵	-	۶۵/۳	۵۱/۲	۱/۰۴	۳۸۳۰	۴۲۶	۷/۶۶	۱۳۶۰	۱۵۱	۴/۵۷	۲۴۱	۱۵/۹
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۹	۱۵	۱۸	-	۷۸/۱	۶۱/۳	۱/۱۵	۵۷۰۰	۵۷۰	۸/۵۴	۲۰۰۰	۲۰۰	۵/۰۷	۳۳۱	۱۷/۷
۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۹/۵	۱۶	۱۸	-	۹۱/۰	۷۱/۵	۱/۲۷	۸۰۹۰	۷۳۶	۹/۴۳	۲۸۴۰	۲۵۸	۵/۵۹	۴۱۴	۱۹/۶
۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	۱۰	۱۷	۲۱	-	۱۰۶	۸۳/۲	۱/۳۸	۱۱۲۶۰	۹۳۸	۱۰/۳	۳۹۲۰	۳۲۷	۶/۰۸	۵۲۷	۲۱/۴
۲۶۰	۲۶۰	۲۶۰	۱۰	۱۷/۵	۲۴	-	۱۱۸	۹۳/۰	۱/۵۰	۱۴۹۲۰	۱۱۵۰	۱۱/۲	۵۱۳۰	۳۹۵	۶/۵۸	۶۴۱	۲۳/۳
۲۸۰	۲۸۰	۲۸۰	۱۰/۵	۱۸	۲۴	-	۱۳۱	۱۰۳	۱/۶۲	۱۹۲۷۰	۱۳۸۰	۱۲/۱	۶۵۹۰	۴۷۱	۷/۰۹	۷۶۷	۲۵/۱
۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۱۱	۱۹	۲۷	-	۱۴۹	۱۱۷	۱/۷۳	۲۵۱۷۰	۱۶۸۰	۱۳/۰	۸۵۶۰	۵۷۱	۷/۵۸	۹۳۴	۲۶/۹
۳۲۰	۳۲۰	۳۰۰	۱۱/۵	۲۰/۵	۲۷	-	۱۶۱	۱۲۷	۱/۷۷	۳۰۸۲۰	۱۹۳۰	۱۳/۸	۹۲۴۰	۶۱۶	۷/۵۷	۱۰۷۰	۲۸/۷
۳۴۰	۳۴۰	۳۰۰	۱۲	۲۱/۵	۲۷	-	۱۷۱	۱۳۴	۱/۸۱	۳۶۶۶۰	۲۱۶۰	۱۴/۶	۹۶۹۰	۶۴۶	۷/۵۳	۱۲۰۰	۳۰/۴
۳۶۰	۳۶۰	۳۰۰	۱۲/۵	۲۲/۵	۲۷	-	۱۸۱	۱۴۲	۱/۸۵	۴۳۱۹۰	۲۴۰۰	۱۵/۵	۱۰۱۴۰	۶۷۶	۷/۴۹	۱۳۴۰	۳۳/۲
۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۱۳/۵	۲۴	۲۷	-	۱۹۸	۱۵۵	۱/۹۳	۵۷۶۸۰	۲۸۸۰	۱۷/۱	۱۰۸۲۰	۷۲۱	۷/۴۰	۱۶۲۰	۳۵/۷
۴۵۰	۴۵۰	۳۰۰	۱۴	۲۶	۲۷	-	۲۱۸	۱۷۱	۲/۰۳	۷۹۸۹۰	۳۵۵۰	۱۹/۱	۱۱۷۲۰	۷۸۱	۷/۳۳	۱۹/۰	۴۰/۱
۵۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۱۴/۵	۲۸	۲۷	-	۲۳۹	۱۸۷	۲/۱۲	۱۰۷۲۰۰	۴۲۹۰	۲۱/۲	۱۲۶۲۰	۸۴۲	۷/۲۷	۲۴۱۰	۴۴/۵
۵۵۰	۵۵۰	۳۰۰	۱۵	۲۹	۲۷	-	۲۵۴	۱۹۹	۲/۲۲	۱۳۶۷۰۰	۴۹۷۰	۲۳/۲	۱۳۰۸۰	۸۷۲	۷/۱۷	۲۸۰۰	۴۸/۹
۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۱۵/۵	۳۰	۲۷	-	۲۷۰	۲۱۲	۲/۳۲	۱۷۱۰۰۰	۵۷۰۰	۲۵/۲	۱۳۵۳۰	۹۰۲	۷/۰۸	۳۲۱۰	۵۳/۲
۶۵۰	۶۵۰	۳۰۰	۱۶	۳۱	۲۷	-	۲۸۶	۲۲۵	۲/۴۲	۲۱۰۶۰۰	۶۴۸۰	۲۷/۱	۱۳۹۸۰	۹۳۲	۶/۹۹	۳۶۶۰	۵۷/۵
۷۰۰	۷۰۰	۳۰۰	۱۷	۳۲	۲۷	-	۳۰۶	۲۴۱	۲/۵۲	۲۵۶۹۰۰	۷۳۴۰	۲۹/۰	۱۴۴۴۰	۹۶۳	۶/۸۷	۴۱۶۰	۶۱/۷
۸۰۰	۸۰۰	۳۰۰	۱۷/۵	۳۳	۳۰	-	۳۳۴	۲۶۲	۲/۷۱	۳۵۹۱۰۰	۸۹۸۰	۳۲/۸	۱۴۹۰۰	۹۹۴	۶/۶۸	۵۱۱۰	۷۰/۲
۹۰۰	۹۰۰	۳۰۰	۱۸/۵	۳۵	۳۰	-	۳۷۱	۲۹۱	۲/۹۱	۴۹۴۱۰۰	۱۰۹۸۰	۳۶/۵	۱۵۸۲۰	۱۰۵۰	۶/۵۳	۶۲۹۰	۷۸/۵
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰	۱۹	۳۶	۳۰	-	۴۰۰	۳۱۴	۳/۱۱	۶۴۴۷۰۰	۱۲۸۹۰	۴۰/۱	۱۶۲۸۰	۱۰۹۰	۶/۳۸	۷۴۳۰	۸۶/۸

نیمرخ بال‌پهن سنگین IPB_v

معادل HE-M



A = سطح مقطع
G = وزن واحد طول
U = سطح جانبی واحد طول
I = ممان اینرسی
S = اساس مقطع
r = شعاع ژیراسیون
Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی (محور x)
J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

	ابعاد به‌میلی‌متر					A	G	U	x−x			y−y			Q	J
IPB_v	h	b	s	t	r	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm
۱۰۰	۱۲۰	۱۰۶	۱۲	۲۰	۱۲	۵۳/۲	۴۱/۸	۰/۶۱۹	۱۱۴۰	۱۹۰	۴/۶۳	۳۹۹	۷۵/۳	۲/۷۴	۱۱۸	۹/۶۹
۱۲۰	۱۴۰	۱۲۶	۱۲/۵	۲۱	۱۲	۶۶/۴	۵۲/۱	۰/۷۳۸	۲۰۲۰	۲۸۸	۵/۵۱	۷۰۳	۱۱۲	۳/۲۵	۱۷۵	۱۱/۵
۱۴۰	۱۶۰	۱۴۶	۱۳	۲۲	۱۲	۸۰/۶	۶۳/۲	۰/۸۵۷	۳۲۹۰	۴۱۱	۶/۳۹	۱۱۴۰	۱۵۷	۳/۷۷	۲۴۷	۱۳/۳
۱۶۰	۱۸۰	۱۶۶	۱۴	۲۳	۱۵	۹۷/۱	۷۶/۳	۰/۹۷۰	۵۱۰۰	۵۶۶	۷/۲۵	۱۷۶۰	۲۱۲	۴/۲۶	۳۳۷	۱۵/۱
۱۸۰	۲۰۰	۱۸۶	۱۴/۵	۲۴	۱۵	۱۱۳	۸۸/۹	۱/۰۹	۷۴۸۰	۷۴۸	۸/۱۳	۲۵۸۰	۲۷۷	۴/۷۷	۴۴۲	۱۶/۹
۲۰۰	۲۲۰	۲۰۶	۱۵	۲۵	۱۸	۱۳۱	۱۰۳	۱/۲۰	۱۰۶۴۰	۹۶۷	۹/۰۰	۳۶۵۰	۳۵۴	۵/۳۷	۵۶۸	۱۸/۷
۲۲۰	۲۴۰	۲۲۶	۱۵/۵	۲۶	۱۸	۱۴۹	۱۱۷	۱/۳۲	۱۴۶۰۰	۱۲۲۰	۹/۸۹	۵۰۱۰	۴۴۴	۵/۷۹	۷۱۰	۲۰/۶
۲۴۰	۲۷۰	۲۴۸	۱۸	۳۲	۲۱	۲۰۰	۱۵۷	۱/۴۶	۲۴۲۹۰	۱۸۰۰	۱۱/۰	۸۱۵۰	۶۵۷	۶/۳۹	۱۰۶۰	۲۲/۹
۲۶۰	۲۹۰	۲۶۸	۱۸	۳۲/۵	۲۴	۲۲۰	۱۷۲	۱/۵۷	۳۱۳۱۰	۲۱۶۰	۱۱/۹	۱۰۴۵۰	۷۸۰	۶/۹۰	۱۲۶۰	۲۴/۸
۲۸۰	۳۱۰	۲۸۸	۱۸/۵	۳۳	۲۴	۲۴۰	۱۸۹	۱/۶۹	۳۹۵۵۰	۲۵۵۰	۱۲/۸	۱۳۱۶۰	۹۱۴	۷/۴۰	۱۴۸۰	۲۶/۷
۳۰۰	۳۴۰	۳۱۰	۲۱	۳۹	۲۷	۳۰۳	۲۳۸	۱/۸۲	۵۹۲۰۰	۳۴۸۰	۱۴/۰	۱۹۴۰۰	۱۲۵۰	۸/۰۰	۲۰۴۰	۲۹/۰
۳۲۰/۳۰۵	۳۲۰	۳۰۵	۱۶	۲۹	۲۷	۲۲۵	۱۷۷	۱/۷۸	۴۰۹۵۰	۲۵۶۰	۱۳/۵	۱۳۷۴۰	۹۰۱	۷/۸۱	۱۴۶۰	۲۸/۰
۳۲۰	۳۵۹	۳۰۹	۲۱	۴۰	۲۷	۳۱۲	۲۴۵	۱/۸۷	۶۸۱۳۰	۳۸۰۰	۱۴/۸	۱۹۷۱۰	۱۲۸۰	۷/۹۵	۲۲۲۰	۳۰/۷
۳۴۰	۳۷۷	۳۰۹	۲۱	۴۰	۲۷	۳۱۶	۲۴۸	۱/۹۰	۷۶۳۷۰	۴۰۵۰	۱۵/۶	۱۹۷۱۰	۱۲۸۰	۷/۹۰	۲۳۶۰	۳۲/۴
۳۷۰	۳۹۵	۳۰۸	۲۱	۴۰	۲۷	۳۱۹	۲۵۰	۱/۹۳	۸۴۸۷۰	۴۳۰۰	۱۶/۳	۱۹۵۲۰	۱۲۷۰	۷/۸۳	۲۴۹۰	۳۴/۰
۴۰۰	۴۳۲	۳۰۷	۲۱	۴۰	۲۷	۳۲۶	۲۵۶	۲/۰۰	۱۰۴۱۰۰	۴۸۲۰	۱۷/۹	۱۹۳۴۰	۱۲۶۰	۷/۷۰	۲۷۹۰	۳۷/۴
۴۵۰	۴۷۸	۳۰۷	۲۱	۴۰	۲۷	۳۳۵	۲۶۳	۲/۱۰	۱۳۱۵۰۰	۵۵۰۰	۱۹/۸	۱۹۳۴۰	۱۲۶۰	۷/۵۹	۳۱۷۰	۴۱/۵
۵۰۰	۵۲۴	۳۰۶	۲۱	۴۰	۲۷	۳۴۴	۲۷۰	۲/۱۸	۱۶۱۹۰۰	۶۱۸۰	۲۱/۷	۱۹۱۵۰	۱۲۵۰	۷/۴۶	۳۵۵۰	۴۵/۷
۵۵۰	۵۷۲	۳۰۶	۲۱	۴۰	۲۷	۳۵۴	۲۷۸	۲/۲۸	۱۹۸۰۰۰	۶۹۲۰	۲۳/۶	۱۹۱۶۰	۱۲۵۰	۷/۳۵	۳۹۷۰	۴۹/۹
۶۰۰	۶۲۰	۳۰۵	۲۱	۴۰	۲۷	۳۶۴	۲۸۵	۲/۳۷	۲۳۷۴۰۰	۷۶۶۰	۲۵/۶	۱۸۹۸۰	۱۲۴۰	۷/۲۲	۴۳۹۰	۵۴/۱
۶۵۰	۶۶۸	۳۰۵	۲۱	۴۰	۲۷	۳۷۴	۲۹۳	۲/۴۷	۲۸۱۷۰۰	۸۴۳۰	۲۷/۵	۱۸۹۸۰	۱۲۴۰	۷/۱۳	۴۸۳۰	۵۸/۳
۷۰۰	۷۱۶	۳۰۴	۲۱	۴۰	۲۷	۳۸۳	۳۰۱	۲/۵۶	۳۲۹۳۰۰	۹۲۰۰	۲۹/۳	۱۸۸۰۰	۱۲۴۰	۷/۰۱	۵۲۷۰	۶۲/۵
۸۰۰	۸۱۴	۳۰۳	۲۱	۴۰	۳۰	۴۰۴	۳۱۷	۲/۷۵	۴۴۲۶۰۰	۱۰۸۷۰	۳۳/۱	۱۸۶۳۰	۱۲۳۰	۶/۷۹	۶۲۴۰	۷۰/۹
۹۰۰	۹۱۰	۳۰۲	۲۱	۴۰	۳۰	۴۲۴	۳۳۳	۲/۹۳	۵۷۰۴۰۰	۱۲۵۴۰	۳۶/۷	۱۸۴۵۰	۱۲۲۰	۶/۶۰	۷۲۲۰	۷۹/۰
۱۰۰۰	۱۰۰۸	۳۰۲	۲۱	۴۰	۳۰	۴۴۴	۳۴۹	۳/۱۳	۷۲۲۳۰۰	۱۴۳۳۰	۴۰/۳	۱۸۴۰۰	۱۲۲۰	۶/۴۵	۸۲۸۰	۸۷/۳

نیمرخ ناودانی UNP

A = سطح مقطع

G = وزن واحد طول

U = سطح جانبی واحد طول

I = ممان اینرسی

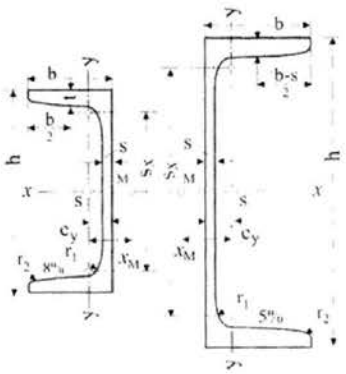
S = اساس مقطع

r = شعاع ژیراسیون

Q = لنگر استاتیک نصف مقطع حول محور خنثی

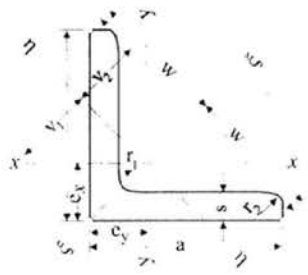
J = فاصلهٔ بین مراکز نیروهای کششی و فشاری

x_m = محل مرکز برش



ابعاد به‌میلی‌متر						A	G	U	x−x			y−y			Q	J	c_y	x_m
U	h	b	s	$t=r_1$	r_2	cm^2	kg/m	m^2/m	I_x cm^4	S_x cm^3	r_x cm	I_y cm^4	S_y cm^3	r_y cm	cm^3	cm	cm	cm
۳۰×۱۵	۳۰	۱۵	۴	۴/۵	۲	۲/۲۱	۱/۷۴	۰/۱۰۳	۲/۵۳	۱/۶۹	۱/۰۷	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۴۲	-	-	۰/۵۲	۰/۷۴
۳۰	۳۰	۳۳	۵	۷	۳/۵	۵/۴۴	۴/۲۷	۰/۱۷۴	۶/۳۹	۴/۲۶	۱/۰۸	۵/۳۳	۲/۶۸	۰/۹۹	-	-	۱/۳۱	۲/۲۲
۴۰×۲۰	۴۰	۲۰	۵	۵/۵	۲/۵	۳/۶۶	۲/۸۷	۰/۱۴۲	۷/۵۸	۳/۷۹	۱/۴۴	۱/۱۴	۰/۸۶	۰/۵۶	-	-	۰/۶۷	۱/۰۱
۴۰	۴۰	۳۵	۵	۷	۳/۵	۶/۲۱	۴/۸۷	۰/۱۹۹	۱۴/۱	۷/۰۵	۱/۵۰	۶/۶۸	۳/۰۸	۱/۰۴	-	-	۱/۳۳	۲/۳۲
۵۰×۲۵	۵۰	۲۵	۵	۶	۳	۴/۹۲	۳/۸۵	۰/۱۸۱	۱۶/۸	۶/۷۳	۱/۸۵	۲/۴۹	۱/۴۸	۰/۷۱	-	-	۰/۸۱	۱/۳۴
۵۰	۵۰	۳۸	۶	۷	۳/۵	۷/۱۲	۵/۵۹	۰/۲۳۲	۲۶/۴	۱۰/۶	۱/۹۲	۹/۱۲	۳/۷۵	۱/۱۳	-	-	۱/۳۷	۲/۴۷
۶۰	۶۰	۳۰	۶	۶	۳	۶/۴۶	۵/۰۷	۰/۲۱۵	۳۱/۶	۱۰/۵	۲/۲۱	۴/۵۱	۲/۱۶	۰/۸۴	-	-	۰/۹۱	۱/۵۰
۶۵	۶۵	۴۲	۵/۵	۷/۵	۴	۹/۰۳	۷/۰۹	۰/۲۷۳	۵۷/۵	۱۷/۷	۲/۵۲	۱۴/۱	۵/۰۷	۱/۲۵	-	-	۱/۴۲	۲/۶۰
۸۰	۸۰	۴۵	۶	۸	۴	۱۱/۰	۸/۶۴	۰/۳۱۲	۱۰۶	۲۶/۵	۳/۱۰	۱۹/۴	۶/۳۶	۱/۳۳	۱۵/۹	۶/۶۵	۱/۴۵	۲/۶۷
۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۶	۸/۵	۴/۵	۱۳/۵	۱۰/۶	۰/۳۷۲	۲۰۶	۴۱/۲	۳/۹۱	۲۹/۳	۸/۴۹	۱/۴۷	۲۴/۵	۸/۴۲	۱/۵۵	۲/۹۳
۱۲۰	۱۲۰	۵۵	۷	۹	۴/۵	۱۷/۰	۱۳/۴	۰/۴۳۴	۳۶۴	۶۰/۷	۴/۶۲	۴۳/۲	۱۱/۱	۱/۵۹	۳۶/۳	۱۰/۰	۱/۶۰	۳/۰۳
۱۴۰	۱۴۰	۶۰	۷	۱۰	۵	۲۰/۴	۱۶/۰	۰/۴۸۹	۶۰۵	۸۶/۴	۵/۴۵	۶۲/۷	۱۴/۸	۱/۷۵	۵۱/۴	۱۱/۸	۱/۷۵	۳/۳۷
۱۶۰	۱۶۰	۶۵	۷/۵	۱۰/۵	۵/۵	۲۴/۰	۱۸/۸	۰/۵۴۵	۹۲۵	۱۱۶	۶/۲۱	۸۵/۳	۱۸/۳	۱/۸۲	۶۸/۸	۱۳/۳	۱/۸۴	۳/۵۶
۱۸۰	۱۸۰	۷۰	۸	۱۱	۵/۵	۲۸/۰	۲۲/۰	۰/۶۱۱	۱۳۵۰	۱۵۰	۶/۹۶	۱۱۴	۲۲/۴	۲/۰۲	۸۹/۵	۱۵/۱	۱/۹۲	۳/۷۵
۲۰۰	۲۰۰	۷۵	۸/۵	۱۱/۵	۶	۳۲/۲	۲۵/۳	۰/۶۶۱	۱۹۱۰	۱۹۱	۷/۷۰	۱۴۸	۲۷/۰	۲/۱۴	۱۱۴	۱۶/۸	۲/۰۱	۳/۹۴
۲۲۰	۲۲۰	۸۰	۹	۱۲/۵	۶/۵	۳۷/۴	۲۹/۴	۰/۷۱۸	۲۶۹۰	۲۴۵	۸/۴۸	۱۹۷	۳۳/۶	۲/۳۰	۱۴۶	۱۸/۵	۲/۱۴	۴/۲۰
۲۴۰	۲۴۰	۸۵	۹/۵	۱۳	۶/۵	۴۲/۳	۳۳/۲	۰/۷۷۵	۳۶۰۰	۳۰۰	۹/۲۲	۲۴۸	۳۹/۶	۲/۴۲	۱۷۹	۲۰/۱	۲/۲۳	۴/۳۹
۲۶۰	۲۶۰	۹۰	۱۰	۱۴	۷	۴۸/۳	۳۷/۹	۰/۸۳۴	۴۸۲۰	۳۷۱	۹/۹۹	۳۱۷	۴۷/۷	۲/۵۶	۲۲۱	۲۱/۸	۲/۳۶	۴/۶۶
۲۸۰	۲۸۰	۹۵	۱۰	۱۵	۷/۵	۵۳/۳	۴۱/۸	۰/۸۹۰	۶۲۸۰	۴۴۸	۱۰/۹	۳۹۹	۵۷/۲	۲/۷۴	۲۶۶	۲۳/۶	۲/۵۳	۵/۰۲
۳۰۰	۳۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۶	۸	۵۸/۸	۴۶/۲	۰/۹۵۰	۸۰۳۰	۵۳۵	۱۱/۷	۴۹۵	۶۷/۸	۲/۹۰	۳۱۶	۲۵/۴	۲/۷۰	۵/۴۱
۳۲۰	۳۲۰	۱۰۰	۱۴	۱۷/۵	۸/۷۵	۷۵/۸	۵۹/۵	۰/۹۸۲	۱۰۸۷۰	۶۷۹	۱۲/۱	۵۹۷	۸۰/۵	۲/۸۱	۴۱۳	۲۶/۳	۲/۶۰	۴/۸۲
۳۵۰	۳۵۰	۱۰۰	۱۴	۱۶	۸	۷۷/۳	۶۰/۵	۱/۰۴۷	۱۲۸۴۰	۷۳۴	۱۲/۹	۵۷۰	۷۵/۰	۲/۷۲	۴۵۹	۲۸/۶	۲/۴۰	۴/۴۵
۳۸۰	۳۸۰	۱۰۲	۱۳/۵	۱۶	۸	۸۰/۴	۶۳/۱	۱/۱۱۰	۱۵۷۶۰	۸۲۹	۱۴/۰	۶۱۵	۷۸/۷	۲/۷۷	۵۰۷	۳۱/۱	۲/۳۸	۴/۵۸
۴۰۰	۴۰۰	۱۱۰	۱۴	۱۸	۹	۹۱/۵	۷۱/۸	۱/۱۸۲	۲۰۳۵۰	۱۰۲۰	۱۴/۹	۸۴۶	۱۰۲	۳/۰۴	۶۱۸	۳۲/۹	۲/۶۵	۵/۱۱

نیمرخ نبشی با بال‌های مساوی



A = سطح مقطع

G = وزن واحد طول

U = سطح جانبی واحد طول

I = ممان اینرسی

S = اساس مقطع

r = شعاع ژیراسیون

محور $\eta-\eta$ محور اصلی حداقل نیمرخ است

L.	ابعاد به‌میلی‌متر a	s	r_1	r_2	A cm^2	G kg/m	U m^2/m	e cm	w cm	v_1 cm	v_2 cm	x−x=y−y $I_x=I_y$ cm^4	$S_x=S_y$ cm^3	$r_x=r_y$ cm	ε−ε I_ε cm^4	r_ε cm	η−η I_η cm^4	S_η cm^3	r_η (min) cm
۲۰×۳	۲۰	۳	۳/۵	۲	۱/۱۲	۰/۸۸	۰/۰۷۷	۰/۶۰	۱/۴۱	۰/۸۵	۰/۷۰	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۶۲	۰/۷۴	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۳۷
۴		۴			۱/۴۵	۱/۱۴		۰/۶۴		۰/۹۰	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۵۸	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۳۶
۲۵×۳	۲۵	۳	۳/۵	۲	۱/۴۲	۱/۱۲	۰/۰۹۷	۰/۷۳	۱/۷۷	۱/۰۳	۰/۸۷	۰/۷۹	۰/۴۵	۰/۷۵	۱/۲۷	۰/۹۵	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۴۷
۴		۴			۱/۸۵	۱/۴۵		۰/۷۶		۱/۰۸	۰/۸۹	۱/۰۱	۰/۵۸	۰/۷۴	۱/۶۱	۰/۹۳	۰/۴۰	۰/۳۷	۰/۴۷
۵		۵			۲/۲۶	۱/۷۷		۰/۸۰		۱/۱۳	۰/۹۱	۱/۱۸	۰/۶۹	۰/۷۲	۱/۸۷	۰/۹۱	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۴۷
۳۰×۳	۳۰	۳	۵	۲/۵	۱/۷۴	۱/۳۶	۰/۱۱۶	۰/۸۴	۲/۱۲	۱/۱۸	۱/۰۴	۱/۴۱	۰/۶۵	۰/۹۰	۲/۲۴	۱/۱۴	۰/۵۷	۰/۴۸	۰/۵۷
۴		۴			۲/۲۷	۱/۷۸		۰/۸۹		۱/۲۴	۱/۰۵	۱/۸۱	۰/۸۶	۰/۸۹	۲/۸۵	۱/۱۲	۰/۷۶	۰/۶۱	۰/۵۸
۵		۵			۲/۷۸	۲/۱۸		۰/۹۲		۱/۳۰	۱/۰۷	۲/۱۶	۱/۰۴	۰/۸۸	۳/۴۱	۱/۱۱	۰/۹۱	۰/۷۰	۰/۵۷
۳۵×۳	۳۵	۳	۵	۲/۵	۲/۰۴	۱/۶۰	۰/۱۳۶	۰/۹۶	۲/۴۷	۱/۳۶	۱/۲۳	۲/۲۹	۰/۹۰	۱/۰۶	۳/۶۳	۱/۳۴	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۶۸
۴		۴			۲/۶۷	۲/۱۰		۱/۰۰		۱/۴۱	۱/۲۴	۲/۹۶	۱/۱۸	۱/۰۵	۴/۶۸	۱/۳۳	۱/۲۴	۰/۸۸	۰/۶۸
۵		۵			۳/۲۸	۲/۵۷		۱/۰۴		۱/۴۷	۱/۲۵	۳/۵۶	۱/۴۵	۱/۰۴	۵/۶۳	۱/۳۱	۱/۴۹	۱/۱۰	۰/۶۷
۶		۶			۳/۸۷	۳/۰۴		۱/۰۸		۱/۵۳	۱/۲۷	۴/۱۴	۱/۷۱	۱/۰۴	۶/۵۰	۱/۳۰	۱/۷۷	۱/۱۶	۰/۶۸
۴۰×۳	۴۰	۳	۶	۳	۲/۳۵	۱/۸۴	۰/۱۵۵	۱/۰۷	۳/۸۳	۱/۵۲	۱/۴۰	۳/۴۵	۱/۱۸	۱/۲۱	۵/۴۵	۱/۵۲	۱/۴۴	۰/۹۵	۰/۷۸
۴		۴			۳/۰۸	۲/۴۲		۱/۱۲		۱/۵۸	۱/۴۰	۴/۴۸	۱/۵۶	۱/۲۱	۷/۰۹	۱/۵۲	۱/۸۶	۱/۱۸	۰/۷۸
۵		۵			۳/۷۹	۲/۹۷		۱/۱۶		۱/۶۴	۱/۴۲	۵/۴۳	۱/۹۱	۱/۲۰	۸/۶۴	۱/۵۱	۲/۲۲	۱/۳۵	۰/۷۷
۶		۶			۴/۴۸	۳/۵۲		۱/۲۰		۱/۷۰	۱/۴۳	۶/۳۳	۲/۲۶	۱/۱۹	۹/۹۸	۱/۴۹	۲/۶۷	۱/۵۷	۰/۷۷
۴۵×۴	۴۵	۴	۷	۳/۵	۳/۴۹	۲/۷۴	۰/۱۷۴	۱/۲۳	۳/۱۸	۱/۷۵	۱/۵۷	۶/۴۳	۱/۹۷	۱/۳۶	۱۰/۲	۱/۷۱	۲/۶۸	۱/۵۳	۰/۸۸
۵		۵			۴/۳۰	۳/۳۸		۱/۲۸		۱/۸۱	۱/۵۸	۷/۸۳	۲/۴۳	۱/۳۵	۱۲/۴	۱/۷۰	۳/۲۵	۱/۸۰	۰/۸۷
۶		۶			۵/۰۹	۴/۰۰		۱/۳۲		۱/۸۷	۱/۵۹	۹/۱۶	۲/۸۸	۱/۳۴	۱۴/۵	۱/۶۹	۳/۸۳	۲/۰۵	۰/۸۷
۷		۷			۵/۸۰	۴/۶۰		۱/۳۶		۱/۹۳	۱/۶۱	۱۰/۴	۳/۳۱	۱/۳۳	۱۶/۴	۱/۶۷	۴/۳۹	۲/۲۹	۰/۸۷
۵۰×۴	۵۰	۴	۷	۳/۵	۳/۸۹	۳/۰۶	۰/۱۹۴	۱/۳۶	۳/۵۴	۱/۹۲	۱/۷۵	۸/۹۷	۲/۴۶	۱/۵۲	۱۴/۲	۱/۹۱	۳/۷۳	۱/۹۴	۰/۹۸
۵		۵			۴/۸۰	۳/۷۷		۱/۴۰		۱/۹۸	۱/۷۶	۱۱/۰	۳/۰۵	۱/۵۱	۱۷/۴	۱/۹۰	۴/۵۹	۲/۳۲	۰/۹۸
۶		۶			۵/۶۹	۴/۴۷		۱/۴۵		۲/۰۴	۱/۷۷	۱۳/۸	۳/۶۱	۱/۵۰	۲۰/۴	۱/۸۹	۵/۲۴	۲/۵۷	۰/۹۶
۷		۷			۶/۵۶	۵/۱۵		۱/۴۹		۲/۱۱	۱/۷۸	۱۴/۶	۴/۱۵	۱/۴۹	۲۳/۱	۱/۸۸	۶/۰۲	۲/۸۵	۰/۹۶
۸		۸			۷/۴۱	۵/۸۲		۱/۵۲		۲/۱۶	۱/۸۰	۱۶/۳	۴/۶۸	۱/۴۸	۲۵/۷	۱/۸۶	۶/۸۷	۳/۱۹	۰/۹۶
۹		۹			۸/۲۴	۶/۴۷		۱/۵۶		۲/۲۱	۱/۸۳	۱۷/۹	۵/۳۰	۱/۴۷	۲۸/۱	۱/۸۵	۷/۶۷	۳/۴۷	۰/۹۷
۵۵×۵	۵۵	۵	۸	۴	۵/۳۲	۴/۱۸	۰/۲۱۳	۱/۵۲	۳/۸۹	۲/۱۵	۱/۹۳	۱۴/۷	۳/۷۰	۱/۶۵	۲۳/۳	۲/۰۹	۶/۱۱	۲/۸۴	۱/۰۷
۶		۶			۶/۳۱	۴/۹۵		۱/۵۶		۲/۲۱	۱/۹۴	۱۷/۳	۴/۴۰	۱/۶۶	۲۷/۴	۲/۰۸	۷/۲۴	۳/۲۸	۱/۰۷
۸		۸			۸/۲۳	۶/۴۶		۱/۶۴		۲/۳۲	۱/۹۷	۲۲/۱	۵/۷۲	۱/۶۴	۳۴/۸	۲/۰۶	۹/۳۵	۴/۰۳	۱/۰۷
۱۰		۱۰			۱۰/۱	۷/۹۰		۱/۷۲		۲/۴۳	۲/۰۰	۲۶/۳	۶/۹۷	۱/۶۲	۴۱/۱	۲/۰۲	۱۱/۳	۴/۶۵	۱/۰۶
۶۰×۵	۶۰	۵	۸	۴	۵/۸۲	۴/۵۷	۰/۲۳۳	۱/۶۴	۴/۲۴	۲/۳۲	۲/۱۱	۱۹/۴	۴/۴۵	۱/۸۲	۳۰/۷	۲/۳۰	۸/۰۳	۳/۴۵	۱/۱۷
۶		۶			۶/۹۱	۵/۴۲		۱/۶۹		۲/۳۹	۲/۱۱	۲۲/۸	۵/۲۹	۱/۸۲	۳۶/۱	۲/۲۹	۹/۴۳	۳/۹۵	۱/۱۷
۸		۸			۹/۰۳	۷/۰۹		۱/۷۷		۲/۵۰	۲/۱۴	۲۹/۱	۶/۸۸	۱/۸۰	۴۵/۱	۲/۲۶	۱۲/۱	۴/۸۴	۱/۱۶
۱۰		۱۰			۱۱/۱	۸/۶۹		۱/۸۵		۲/۶۲	۲/۱۷	۳۴/۹	۸/۴۱	۱/۷۸	۵۵/۱	۲/۳۳	۱۴/۶	۵/۵۷	۱/۱۵

ابعاد به‌میلی‌متر												$x-x=y-y$			$\varepsilon-\varepsilon$		$\eta-\eta$		
L	a	s	r_1	r_2	F	G	U	e	w	v_1	v_2	$I_x=I_y$	$S_x=S_y$	$r_x=r_y$	I_ε	r_ε	I_η	s_η	$r_\eta=(\min)$
					cm^2	kg/m	m^2/m	cm	cm	cm	cm	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm	cm^4	cm^3	cm
۶		۶			۷/۵۳	۵/۹۱		۱/۸۰		۲/۵۵	۳/۲۸	۲۹/۲	۶/۲۱	۱/۹۷	۴۶/۳	۲/۴۸	۱۲/۱	۴/۴۷	۱/۲۷
۷		۷			۸/۷۰	۶/۸۳		۱/۸۵		۲/۶۲	۳/۲۹	۳۳/۴	۷/۱۸	۱/۹۶	۵۳/۰	۲/۴۷	۱۳/۸	۵/۲۷	۱/۲۶
۸ ×۶۵	۶۵	۸	۹	۴/۵	۹/۸۵	۷/۷۳	۰/۲۵۲	۱/۸۹	۴/۶۰	۲/۶۷	۳/۳۱	۳۷/۵	۸/۱۳	۱/۹۵	۵۹/۴	۲/۴۶	۱۵/۶	۵/۸۴	۱/۲۶
۹		۹			۱۱/۰	۸/۶۲		۱/۹۳		۲/۷۳	۳/۳۲	۴۱/۳	۹/۰۴	۱/۹۴	۶۵/۴	۲/۴۴	۱۷/۲	۶/۳۰	۱/۲۵
۱۱		۱۱			۱۳/۲	۱۰/۳		۲/۰۰		۲/۸۳	۳/۳۶	۴۸/۸	۱۰/۸	۱/۹۱	۷۶/۸	۲/۴۲	۲۰/۷	۷/۳۱	۱/۲۵
۶		۶			۸/۱۳	۶/۳۸		۱/۹۳		۲/۷۳	۳/۴۶	۳۶/۹	۷/۲۷	۲/۱۳	۵۸/۵	۲/۶۸	۱۵/۳	۵/۶۰	۱/۳۷
۷		۷			۹/۴۰	۷/۳۸		۱/۹۷		۲/۷۹	۳/۴۷	۴۲/۴	۸/۴۳	۲/۱۲	۶۷/۱	۲/۶۷	۱۷/۶	۶/۳۱	۱/۳۷
۷۰۰× ۹	۷۰	۹	۹	۴/۵	۱۱/۹	۹/۳۴	۰/۲۷۲	۲/۰۵	۴/۹۵	۲/۹۰	۳/۵۰	۵۳/۶	۱۰/۶	۲/۱۰	۸۳/۱	۲/۶۴	۲۲/۰	۷/۵۹	۱/۳۶
۱۱		۱۱			۱۴/۳	۱۱/۲		۳/۱۳		۳/۰۱	۳/۵۳	۶۱/۸	۱۲/۷	۲/۸	۹۷/۶	۲/۶۱	۲۶/۰	۸/۶۴	۱/۳۵
۶		۶			۸/۷۵	۶/۸۷		۲/۰۴		۲/۸۹	۳/۶۳	۴۵/۶	۸/۳۵	۲/۳۸	۷۲/۲	۲/۸۷	۱۸/۹	۶/۵۴	۱/۴۷
۷		۷			۱۰/۱	۷/۹۴		۲/۰۹		۲/۹۵	۳/۶۳	۵۲/۴	۹/۶۷	۲/۳۸	۸۳/۶	۲/۸۸	۲۱/۱	۷/۱۵	۱/۴۵
۷۵× ۸	۷۵	۸	۱۰	۵	۱۱/۵	۹/۰۳	۰/۲۹۱	۲/۱۳	۵/۳۰	۳/۰۱	۲/۶۵	۵۸/۹	۱۱/۰	۲/۲۶	۹۳/۳	۲/۸۵	۲۴/۴	۸/۱۱	۱/۴۶
۱۰		۱۰			۱۴/۱	۱۱/۱		۲/۲۱		۳/۱۲	۲/۶۸	۷۱/۴	۱۳/۵	۲/۲۵	۱۱۳	۲/۸۳	۲۹/۸	۹/۵۵	۱/۴۵
۱۲		۱۲			۱۶/۷	۱۳/۱		۲/۲۹		۳/۳۴	۲/۷۱	۸۲/۴	۱۵/۸	۲/۲۲	۱۳۰	۲/۷۹	۳۴/۷	۱۰/۷	۱/۴۴
۷		۷			۱۰/۸	۸/۴۹		۲/۳۱		۳/۱۳	۲/۸۳	۶۴/۲	۱۱/۱	۲/۴۴	۱۰۲	۳/۰۷	۲۶/۵	۸/۴۸	۱/۵۷
۸		۸			۱۲/۳	۹/۶۶		۲/۲۶		۳/۲۰	۲/۸۲	۷۲/۳	۱۲/۶	۲/۴۲	۱۱۵	۳/۰۶	۲۹/۶	۹/۲۵	۱/۵۵
۸۰× ۱۰	۸۰	۱۰	۱۰	۵	۱۵/۱	۱۱/۹	۰/۳۱۱	۲/۳۴	۵/۶۶	۳/۳۱	۲/۸۵	۸۷/۵	۱۵/۵	۲/۴۱	۱۳۹	۳/۰۳	۳۵/۹	۱۰/۹	۱/۵۴
۱۲		۱۲			۱۷/۹	۱۴/۱		۲/۴۱		۳/۴۱	۲/۸۹	۱۰۲	۱۸/۲	۲/۳۹	۱۶۱	۳/۰۰	۴۳/۰	۱۲/۶	۱/۵۳
۱۴		۱۴			۲۰/۶	۱۶/۱		۲/۴۸		۳/۵۱	۲/۹۳	۱۱۵	۲۰/۸	۲/۳۶	۱۸۱	۲/۹۶	۴۸/۶	۱۳/۹	۱/۵۴
۸		۸			۱۳/۹	۱۰/۹		۲/۵۰		۳/۵۳	۳/۱۷	۱۰۴	۱۶/۱	۲/۷۴	۱۶۵	۳/۴۵	۴۳/۵	۱۲/۳	۱/۷۷
۹		۹			۱۵/۵	۱۲/۲		۲/۵۴		۳/۵۹	۳/۱۸	۱۱۶	۱۸/۰	۲/۷۴	۱۸۴	۳/۴۵	۴۷/۸	۱۳/۳	۱/۷۶
۹۰× ۱۱	۹۰	۱۱	۱۱	۵/۵	۱۸/۷	۱۴/۷	۰/۳۵۱	۲/۶۲	۶/۳۶	۳/۷۰	۳/۲۱	۱۳۸	۲۱/۶	۲/۷۲	۲۱۸	۳/۴۱	۵۷/۱	۱۵/۴	۱/۷۵
۱۳		۱۳			۲۱/۸	۱۷/۱		۲/۷۰		۳/۸۱	۳/۲۴	۱۵۸	۲۵/۱	۲/۶۹	۲۵۰	۳/۳۹	۶۵/۹	۱۷/۳	۱/۷۴
۱۶		۱۶			۲۶/۴	۲۰/۷		۳/۸۱		۳/۹۷	۳/۲۹	۱۸۶	۳۰/۱	۲/۶۶	۲۹۴	۳/۳۴	۷۹/۱	۱۹/۹	۱/۷۳
۸		۸			۱۵/۵	۱۲/۲		۲/۷۴		۳/۸۷	۳/۵۲	۱۴۵	۱۹/۹	۳/۰۶	۲۳۰	۳/۸۵	۵۹/۹	۱۵/۵	۱/۹۶
۱۰		۱۰			۱۹/۲	۱۵/۱		۲/۸۲		۳/۹۹	۳/۵۴	۱۷۷	۲۴/۷	۳/۰۴	۲۸۰	۳/۸۲	۷۳/۳	۱۸/۴	۱/۹۵
۱۰۰× ۱۲	۱۰۰	۱۲	۱۲	۶	۲۲/۷	۱۷/۸	۰/۳۹۰	۲/۹۰	۷/۰۷	۴/۱۰	۳/۵۷	۲۰۷	۲۹/۲	۳/۰۲	۳۲۸	۳/۸۰	۸۶/۲	۲۱/۰	۱/۹۵
۱۴		۱۴			۲۶/۲	۲۰/۶		۲/۹۸		۴/۲۱	۳/۶۰	۲۳۵	۳۳/۵	۳/۰۰	۳۷۲	۳/۷۷	۹۸/۳	۲۳/۴	۱/۹۴
۱۶		۱۶			۲۹/۶	۲۳/۲		۳/۰۶		۴/۳۲	۳/۶۳	۲۶۲	۳۷/۷	۲/۹۷	۴۱۳	۳/۷۴	۱۱۱	۲۵/۶	۱/۹۳
۲۰		۲۰			۳۶/۲	۲۸/۴		۳/۲۰		۴/۵۳	۳/۷۱	۳۱۱	۴۵/۷	۲/۹۳	۴۸۷	۳/۶۷	۱۳۵	۲۹/۸	۱/۹۳
۱۰	۱۱۰	۱۰			۲۱/۲	۱۶/۵		۳/۰۷		۴/۳۴	۳/۸۹	۲۳۹	۳۰/۱	۳/۳۶	۳۷۹	۴/۲۳	۹۸/۶	۲۲/۷	۲/۱۶
۱۱۰× ۱۲		۱۲	۱۲	۶	۲۵/۱	۱۹/۷	۰/۴۳۰	۳/۱۵	۷/۷۸	۴/۴۵	۳/۹۳	۲۸۰	۳۵/۷	۳/۳۴	۴۴۴	۴/۲۱	۱۱۶	۲۶/۱	۲/۱۵
۱۴		۱۴			۲۹/۰	۲۲/۸		۳/۲۱		۴/۵۴	۳/۹۸	۳۱۹	۴۱/۰	۳/۳۲	۵۰۵	۴/۱۸	۱۳۳	۲۹/۳	۲/۱۴
۱۱		۱۱			۲۵/۴	۱۹/۹		۳/۳۶		۴/۷۵	۴/۲۴	۳۴۱	۳۹/۵	۳/۶۶	۵۴۱	۴/۶۳	۱۴۰	۲۹/۵	۲/۳۵
۱۲۰× ۱۲	۱۲۰	۱۲	۱۳	۶/۵	۲۷/۵	۲۱/۶	۰/۴۶۹	۳/۴۰	۸/۴۹	۴/۸۰	۴/۲۶	۳۶۸	۴۲/۷	۳/۶۵	۵۸۴	۴/۶۰	۱۵۲	۳۱/۶	۲/۳۵
۱۳		۱۳			۲۹/۷	۲۳/۳		۳/۴۴		۴/۸۶	۴/۲۷	۳۹۴	۴۶/۰	۳/۶۴	۶۲۵	۴/۵۹	۱۶۲	۳۳/۳	۲/۳۴
۱۵		۱۵			۳۳/۹	۲۶/۶		۳/۵۱		۴/۹۶	۴/۳۱	۴۴۶	۵۲/۵	۳/۶۳	۷۰۵	۴/۵۶	۱۸۶	۳۷/۵	۲/۳۴
۱۲		۱۲			۳۰/۰	۲۳/۶		۳/۶۴		۵/۱۵	۴/۶۰	۴۷۲	۵۰/۴	۳/۹۷	۷۵۰	۵/۰۰	۱۹۴	۳۷/۷	۲/۵۴
۱۴× ۱۳	۱۳۰	۱۴	۱۴	۷	۳۴/۷	۲۷/۲	۰/۵۰۸	۳/۷۲	۹/۱۹	۵/۲۶	۴/۶۳	۵۴۰	۵۸/۲	۳/۹۴	۸۵۷	۴/۹۷	۲۲۳	۴۲/۴	۲/۵۳
۱۶		۱۶			۳۹/۳	۳۰/۹		۳/۸۰		۵/۳۷	۴/۶۶	۶۰۵	۶۵/۸	۳/۹۲	۹۵۹	۴/۹۴	۲۵۱	۴۶/۷	۲/۵۲
۱۳	۱۴۰	۱۳	۱۵	۷/۵	۳۵/۰	۲۷/۵	۰/۵۴۷	۳/۹۳	۹/۹۰	۵/۵۴	۴/۹۶	۶۳۸	۶۳/۳	۴/۲۷	۱۰۱۰	۵/۳۸	۲۶۲	۴۷/۳	۲/۷۴
۱۴× ۱۵		۱۵			۴۰/۰	۳۱/۴		۴/۰۰		۵/۶۶	۴/۹۹	۷۲۳	۷۲/۳	۴/۲۵	۱۱۵۰	۵/۳۶	۲۹۸	۵۲/۷	۲/۷۳

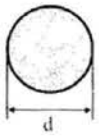
(ادامهٔ جدول قبل)

ابعاد به‌میلی‌متر											x−x=y−y			ε−ε		η−η		
L	a	s	r_1	r_2	F	G	U	e	w	v_1	v_2	$I_x=I_y$	$S_x=S_y$	$r_x=r_y$	I_ε	r_ε	I_η	s_η	$r_\eta=(min)$
					cm^2	kg/m	m^2/m	cm	cm	cm	cm	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm	cm^4	cm^3	cm
۱۲	۱۵۰	۱۲	۱۶	۸	۳۴/۸	۲۷/۳	۰/۵۸۶	۴/۱۲	۱۰/۶	۵/۸۳	۵/۲۹	۷۳۷	۶۷/۷	۴/۶۰	۱۱۷۰	۵/۸۰	۳۰۳	۵۲/۰	۲/۹۵
۱۴		۱۴			۴۰/۳	۳۱/۶		۴/۲۱		۵/۹۵	۵/۳۱	۸۴۵	۷۸/۲	۴/۵۸	۱۳۴۰	۵/۷۷	۳۴۷	۵۸/۳	۲/۹۴
۱۵		۱۵			۴۳/۰	۳۳/۸		۴/۲۵		۶/۰۱	۵/۳۳	۸۹۸	۸۳/۵	۴/۵۷	۱۴۳۰	۵/۷۶	۳۷۰	۶۱/۶	۲/۹۳
۱۶ ×۱۵۰		۱۶			۴۵/۷	۳۵/۹		۴/۲۹		۶/۰۷	۵/۳۴	۹۴۹	۸۸/۷	۴/۵۶	۱۵۱۰	۵/۷۴	۳۹۱	۶۴/۴	۲/۹۳
۱۸		۱۸			۵۱/۰	۴۰/۱		۴/۳۶		۶/۱۷	۵/۳۸	۱۰۵۰	۹۹/۳	۴/۵۴	۱۶۷۰	۵/۷۰	۴۳۸	۷۱/۰	۲/۹۳
۲۰		۲۰			۵۶/۳	۴۴/۲		۴/۴۴		۶/۲۸	۵/۴۱	۱۱۵۰	۱۰۹	۴/۵۱	۱۸۲۰	۵/۶۸	۴۷۷	۷۶/۰	۲/۹۱
۱۵		۱۵			۴۶/۱	۳۶/۲		۴/۴۹		۶/۳۵	۵/۶۷	۱۱۰۰	۹۵/۶	۴/۸۸	۱۷۵۰	۶/۱۵	۴۵۳	۷۱/۳	۳/۱۴
۱۷ ×۱۶۰	۱۶۰	۱۷	۱۷	۸/۵	۵۱/۸	۴۰/۷	۰/۶۲۵	۴/۵۷	۱۱/۳	۶/۴۶	۵/۷۰	۱۲۳۰	۱۰۸	۴/۸۶	۱۹۵۰	۶/۱۳	۵۰۶	۷۸/۳	۳/۱۳
۱۹		۱۹			۵۷/۵	۴۵/۱		۴/۶۵		۶/۵۸	۵/۷۳	۱۳۵۰	۱۱۸	۴/۸۴	۲۱۴۰	۶/۱۰	۵۵۸	۸۴/۸	۳/۱۲
۱۶		۱۶			۵۵/۴	۴۳/۵		۵/۰۲		۷/۱۱	۶/۳۹	۱۶۸۰	۱۳۰	۵/۵۱	۲۶۹۰	۶/۹۶	۶۷۰	۹۵/۵	۳/۵۰
۱۸		۱۸			۶۱/۹	۴۸/۶		۵/۱۰		۷/۲۲	۶/۴۱	۱۸۷۰	۱۴۵	۵/۴۹	۲۹۷۰	۶/۹۳	۷۵۷	۱۰۵	۳/۴۰
۲۰ ×۱۸۰	۱۸۰	۲۰	۱۸	۹	۶۸/۴	۵۳/۷	۰/۷۰۵	۵/۱۸	۱۲/۷	۷/۳۳	۶/۴۴	۲۰۴۰	۱۶۰	۵/۴۷	۳۲۶۰	۶/۹۰	۸۳۰	۱۱۳	۳/۴۰
۲۲		۲۲			۷۴/۷	۵۸/۶		۵/۲۶		۷/۴۴	۶/۴۷	۲۲۱۰	۱۷۴	۵/۴۴	۳۵۱۰	۶/۸۶	۹۱۸	۱۲۳	۳/۵۰
۱۶		۱۶			۶۱/۸	۴۸/۵		۵/۵۲		۷/۸۰	۷/۰۹	۲۳۴۰	۱۶۲	۶/۱۵	۳۷۴۰	۷/۷۸	۹۴۳	۱۲۱	۳/۹۱
۱۸		۱۸			۶۹/۱	۵۴/۳		۵/۶۰		۷/۹۲	۷/۱۲	۲۶۰۰	۱۸۱	۶/۱۳	۴۱۵۰	۷/۷۵	۱۰۵۰	۱۳۳	۳/۹۰
۲۰ ×۲۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۸	۹	۷۶/۴	۵۹/۹	۰/۷۸۵	۵/۶۸	۱۴/۱	۸/۰۴	۷/۱۵	۲۸۵۰	۱۹۹	۶/۱۱	۴۵۴۰	۷/۷۲	۱۱۶۰	۱۴۴	۳/۸۹
۲۴		۲۴			۹۰/۶	۷۱/۱		۵/۸۴		۸/۲۶	۷/۲۱	۳۳۳۰	۲۳۵	۶/۰۶	۵۲۸۰	۷/۶۴	۱۳۸۰	۱۶۷	۳/۹۰
۲۸		۲۸			۱۰۵	۸۲/۰		۵/۹۹		۸/۴۷	۷/۲۸	۳۷۸۰	۲۷۰	۶/۰۲	۵۹۹۰	۷/۵۷	۱۵۸۰	۱۸۶	۳/۸۹

اساس مقطع خمیری نیمرخ‌ها

نیمرخ INP		نیمرخ IPE		نیمرخ IPB	
نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$	نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$	نمرهٔ نیمرخ	$Z(cm^3)$
100	40	100	39	100	104.2
120	63	120	60	120	165.2
140	95	140	88	140	246
160	136	160	123	160	354
180	186	180	166	180	482
200	250	200	220	200	642
220	324	220	286	220	828
240	412	240	366	240	1054
260	514	270	484	260	1282
280	632	300	628	280	1534
300	762	330	804	300	1868
320	914	360	1020	320	2140
340	1080	400	1308	340	2400
360	1276	450	1702	360	2680
380	1482	500	2200	400	3240
400	1714	550	2780	450	3980
450	2400	600	3520	500	4820
500	3240			550	5600
550	4240			600	6420
600	5460			650	7320

میلگرد و چهارسو



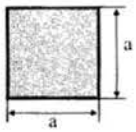
A = سطح مقطع

G = وزن واحد طول

U = سطح جانبی واحد طول

d	A	G	U	d	A	G	U	d	A	G	U	d	A	G	U
mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m
۵*	۰/۱۹۶	۰/۱۵۴	۱۵۷	۲۰/۵	۳/۳۰	۲/۵۹	۶۴۴	۴۱	۱۳۰۲	۱۰۰۴	۱۲۹۰	۷۵	۴۴۱۲	۳۴۰۷	۲۳۶۰
۵.۵	۰.۲۳۸	۰/۱۸۷	۱۷۳	۲۱	۳/۴۶	۲/۷۲	۶۶۰	۴۲	۱۳۰۹	۱۰۰۹	۱۳۲۰	۷۶	۴۵/۴	۳۵۶	۲۳۹۰
۶*	۰.۲۸۳	۰/۲۲۲	۱۸۸	۲۱.۵	۳/۶۳	۲.۸۵	۶۷۵	۴۳	۱۴۰۵	۱۱۰۴	۱۳۵۰	۷۸	۴۷/۸	۳۷۰۵	۲۴۵۰
۶/۵	۰.۳۳۲	۰/۲۶۰	۲۰۴	۲۲*	۳/۸۰	۲.۹۸	۶۹۱	۴۴	۱۵۲	۱۱۰۹	۱۳۸۰	۸۰	۵۰۳	۳۹۰۵	۲۵۱۰
۷*	۰.۳۸۵	۰/۳۰۲	۲۲۰	۲۲/۵	۳/۹۸	۳/۱۲	۷۰۷	۴۵*	۱۵/۹	۱۲۰۵	۱۴۱۰	۸۳	۵۴/۱	۴۲۰۵	۲۶۱۰
۷.۵	۰.۴۴۲	۰.۳۴۷	۲۳۶	۲۳	۴/۱۵	۳/۲۶	۷۲۳	۴۶	۱۶/۶	۱۳۰	۱۴۵۰	۸۵	۵۶۷	۴۴۰۵	۲۶۷۰
۸*	۰.۵۰۳	۰.۳۹۵	۲۵۱	۲۳/۵	۴/۳۴	۳/۴۰	۷۳۸	۴۷	۱۷/۳	۱۳/۶	۱۴۸۰	۸۸	۶۰۸	۴۷۰۷	۲۷۶۰
۸.۵	۰/۵۶۷	۰.۴۴۵	۲۶۷	۲۴*	۴/۵۲	۳.۵۵	۷۵۴	۴۸	۱۸۰۱	۱۴۰۲	۱۵۱۰	۹۰	۶۳۶	۴۹۰۹	۲۸۳۰
۹	۰/۶۳۶	۰.۴۹۹	۲۸۳	۲۴/۵	۴/۷۱	۳/۷۰	۷۷۰	۴۹	۱۸/۹	۱۴/۸	۱۵۴۰	۹۵	۷۰۹	۵۵۶	۲۹۸۰
۹.۵	۰.۷۰۹	۰.۵۵۶	۲۹۸	۲۵	۴/۹۱	۳/۸۵	۷۸۵	۵۰*	۱۹۶	۱۵۴	۱۵۷۰				
۱۰*	۰.۷۸۵	۰.۶۱۷	۳۱۴									۱۰۰	۷۸۵	۶۱۷	۳۱۴۰
				۲۵/۵	۵/۱۱	۴۰۱	۸۰۱	۵۱	۲۰/۴	۱۶۰	۱۶۰۰	۱۰۵	۸۶۶	۶۸۰	۳۳۰۰
۱۰.۵	۰.۸۶۶	۰.۶۸۰	۳۳۰	۲۶*	۵/۳۱	۴/۱۷	۸۱۷	۵۲	۲۱/۲	۱۶۷	۱۶۳۰	۱۱۰	۹۵۰	۷۴۶	۳۴۶۰
۱۱	۰.۹۵۰	۰.۷۴۶	۳۴۶	۲۶/۵	۵/۵۲	۴/۳۳	۸۳۳	۵۳	۲۲۰۱	۱۷/۳	۱۶۷۰	۱۱۵	۱۰۴	۸۱۵	۳۶۱۰
۱۱/۵	۱.۰۴	۰.۸۱۵	۳۶۱	۲۷	۵/۷۳	۴/۴۹	۸۴۸	۵۴	۲۲/۹	۱۸۰	۱۷۰۰	۱۲۰	۱۱۳	۸۸۸	۳۷۷۰
۱۲*	۱.۱۳	۰.۸۸۸	۳۷۷	۲۷/۵	۵.۹۴	۴/۶۶	۸۶۴	۵۵	۲۳/۸	۱۸۰۷	۱۷۳۰	۱۲۵	۱۲۳	۹۶۳	۳۹۳۰
۱۲/۵	۱.۲۳	۰.۹۶۳	۳۹۳	۲۸*	۶۰۱۶	۴۰۸۳	۸۸۰	۵۶	۲۴۰۶	۱۹۰۳	۱۷۶۰	۱۳۰	۱۳۳	۱۰۴	۴۰۸۰
۱۳	۱.۳۳	۱.۰۴	۴۰۸	۲۸/۵	۶۰۳۸	۵۰۰۱	۸۹۵	۵۷	۲۵۰۵	۲۰۰	۱۷۹۰	۱۳۵	۱۴۳	۱۱۲	۴۲۴۰
۱۳/۵	۱.۴۳	۱.۱۲	۴۲۴	۲۹	۶۰۶۱	۵۰۱۹	۹۱۱	۵۸	۲۶۰۴	۲۰۰۷	۱۸۲۰	۱۴۰	۱۵۴	۱۲۱	۴۴۰۰
۱۴*	۱.۵۴	۱.۲۱	۴۴۰	۲۹/۵	۶۰۸۳	۵۰۳۷	۹۲۷	۵۹	۲۷۰۳	۲۱۰۵	۱۸۵۰	۱۴۵	۱۶۵	۱۳۰	۴۵۶۰
۱۴/۵	۱.۶۵	۱.۳۰	۴۵۶	۳۰*	۷۰۰۷	۵۰۵۵	۹۴۲	۶۰	۲۸۰۳	۲۲۰۲	۱۸۸۰	۱۵۰	۱۷۷	۱۳۹	۴۷۱۰
۱۵	۱.۷۷	۱.۳۹	۴۷۱									۱۵۵	۱۸۹	۱۴۸	۴۸۷
				۳۱	۷۰۵۵	۵۰۹۲	۹۷۴	۶۲	۳۰۰۳	۲۳۰۷	۱۹۵۰				
۱۵/۵	۱.۸۹	۱.۴۸	۴۸۷	۳۱.۵	۷۰۷۹	۶۰۱۲	۹۹۰	۶۳	۳۱۰۲	۲۴۰۵	۱۹۸۰	۱۶۰	۲۰۰۱	۱۵۸	۵۰۳۰
۱۶*	۲۰۰۱	۱.۵۸	۵۰۳	۳۲*	۸۰۰۴	۶۰۳۱	۱۰۰۱۰	۶۴	۳۲۰۲	۲۵۰۳	۲۰۰۱۰	۱۶۵	۲۱۴	۱۶۸	۵۱۸۰
۱۶.۵	۲۰۱۴	۱.۶۸	۵۱۸	۳۳	۸۰۵۵	۶۰۷۱	۱۰۴۰	۶۵	۳۳۰۲	۲۶۰۰	۲۰۴۰	۱۷۰	۲۲۷	۱۷۸	۵۳۴۰
۱۷	۲۰۲۷	۱.۷۸	۵۳۴	۳۴*	۹۰۰۸	۷۰۱۳	۱۰۷۰	۶۶	۳۴۰۲	۲۶۰۸	۲۰۷۰	(۱۷۵)	۲۴۱	۱۸۹	۵۵۰۰
۱۷.۵	۲۰۴۱	۱.۸۹	۵۵۰	۳۵	۹۰۶۲	۷۰۵۵	۱۱۰۰	۶۷	۳۵۰۳	۲۷۰۷	۲۱۰۰	۱۸۰	۲۵۴	۲۰۰	۵۶۵۰
۱۸*	۲۰۵۴	۲۰۰	۵۶۵	۳۶*	۱۰۰۲	۷۰۹۹	۱۱۳۰	۶۸	۳۶۰۳	۲۸۰۵	۲۱۴۰	(۱۸۵)	۲۶۹	۲۱۱	۵۸۱۰
۱۸.۵	۲۰۶۹	۲۰۱۱	۵۸۱	۳۷	۱۰۰۸	۸۰۴۴	۱۱۶۰	۷۰	۳۸۰۵	۳۰۰۲	۲۲۰۰	۱۹۰	۲۸۴	۲۲۳	۵۹۷۰
۱۹	۲۰۸۴	۲۰۲۳	۵۹۷	۳۸*	۱۱۰۳	۸۰۹	۱۱۹۰					۲۰۰	۳۱۴	۲۴۷	۶۲۸۰
۱۹.۵	۲۰۹۹	۲۰۳۴	۶۱۳	۳۹	۱۱۰۹	۹۰۳۸	۱۲۳۰	۷۲	۴۰۰۷	۳۲۰	۲۲۶۰	۲۱۰	۳۴۶	۲۷۲	۶۶۰۰
۲۰*	۳۰۱۴	۲۰۴۷	۶۲۸	۴۰*	۱۲۰۶	۹۰۸۶	۱۲۶۰	۷۳	۴۱۰۹	۳۲۰۹	۲۲۹۰	۲۲۰	۳۸۰	۲۹۸	۶۹۱۰

میلگرد و چهارسو



A = سطح مقطع
G = وزن واحد طول
U = سطح جانبی واحد طول

a	A	G	U	a	A	G	U	a	A	G	U	a	A	G	U
mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m	mm	cm^2	kg/m	cm^2/m
۶	۰/۳۶۰	۰/۲۸۳	۲۴۰	۲۱/۵	۴/۶۲	۳/۶۳	۸۶۰	۳۸	۱۴/۴	۱۱/۳	۱۵۲۰	۷۰	۴۹/۰	۳۸/۵	۲۸۰۰
۷	۰/۴۹۰	۰/۳۸۵	۲۸۰	۲۲	۴/۸۴	۳/۸۰	۸۸۰	۴۰	۱۶/۰	۱۲/۶	۱۶۰۰				
۸	۰/۶۴۰	۰/۵۰۲	۳۲۰	۲۳	۵/۲۹	۴/۱۵	۹۲۰					(۷۳)	۵۳/۳	۴۱/۸	۲۹۲۰
۹	۰/۸۱۰	۰/۶۳۶	۳۶۰	۲۴	۵/۷۶	۴/۵۲	۹۶۰	۴۲	۱۷/۶	۱۳/۸	۱۶۸۰	۷۵	۵۶/۳	۴۴/۲	۳۰۰۰
۱۰	۱/۰۰	۰/۷۸۵	۴۰۰	۲۵	۶/۲۵	۴/۹۱	۱۰۰۰	۴۳	۱۸/۵	۱۴/۵	۱۷۲۰	۸۰	۶۴/۰	۵۰/۲	۳۲۰۰
								۴۵	۲۰/۳	۱۵/۹	۱۸۰۰	(۸۳)	۶۸/۹	۵۴/۱	۳۳۲۰
(۱۱)	۱/۲۱	۰/۹۵۰	۴۴۰	۲۶	۶/۷۶	۵/۳۱	۱۰۴۰					۸۵	۷۲/۳	۵۶/۷	۳۴۰۰
۱۲	۱/۴۴	۱/۱۳	۴۸۰	۲۶/۵	۷/۰۲	۵/۵۱	۱۰۶۰	۴۷	۲۲/۱	۱۷/۳	۱۸۸۰	۹۰	۸۱/۰	۶۳/۶	۳۶۰۰
۱۳	۱/۶۹	۱/۳۳	۵۲۰	۲۸	۷/۸۴	۶/۱۵	۱۱۲۰	۴۸	۲۳/۰	۱۸/۱	۱۹۲۰	(۹۳)	۸۶/۵	۶۷/۹	۳۷۲۰
۱۴	۱/۹۶	۱/۵۴	۵۶۰	۲۹	۸/۴۱	۶/۶۰	۱۱۶۰	۵۰	۲۵/۰	۱۹/۶	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۸/۵	۴۰۰۰
۱۵	۲/۲۵	۱/۷۷	۶۰۰	۳۰	۹/۰۰	۷/۰۷	۱۲۰۰								
۱۶	۲/۵۶	۲/۰۱	۶۴۰					۵۲	۲۷/۰	۲۱/۲	۲۰۸۰	(۱۰۳)	۱۰۶	۸۳/۳	۴۱۲۰
۱۷	۲/۸۹	۲/۲۷	۶۸۰	۳۲	۱۰/۲	۸/۰۴	۱۲۸۰	۵۵	۳۰/۳	۲۳/۷	۲۲۰۰	۱۱۰	۱۲۱	۹۵/۰	۴۴۰۰
۱۸	۳/۲۴	۲/۵۴	۷۲۰	(۳۳)	۱۰/۹	۸/۵۵	۱۳۲۰	۵۶	۳۱/۴	۲۴/۶	۲۲۴۰	۱۲۰	۱۴۴	۱۱۳	۴۸۰۰
۱۹	۳/۶۱	۲/۸۳	۷۶۰	۳۴	۱۱/۶	۹/۰۷	۱۳۶۰	(۵۷)	۳۲/۵	۲۵/۵	۲۲۸۰	۱۳۰	۱۶۹	۱۳۳	۵۲۰۰
۲۰	۴/۰۰	۳/۱۴	۸۰۰	۳۵	۱۲/۳	۹/۶۲	۱۴۰۰	۶۰	۳۶/۰	۲۸/۳	۲۴۰۰	۱۴۰	۱۹۶	۱۵۴	۵۶۰۰
				(۳۶)	۱۳/۰	۱۰/۲	۱۴۴۰	۶۳	۳۹/۷	۳۱/۲	۲۵۲۰	۱۵۰	۲۲۵	۱۷۷	۶۰۰۰
۲۱	۴/۴۱	۳/۴۶	۸۴۰	۳۷	۱۳/۷	۱۰/۷	۱۴۸۰	۶۵	۴۲/۳	۳۳/۲	۲۶۰۰				

۲ فرم‌های استاندارد

گزارش آزمایش ذرات مغناطیسی

پروژه .....

ضوابط ارزیابی ـ شماره مقطع .....

گزارش به .....

محل جوش و معرفی طرح جوش

مقدار: ..... کل جوش تأییدی: ..... کل جوش مردودی: .....

تاریخ	مشخصهٔ جوش	سطح آزمایش		گزارش		اصلاح		توضیحات
		کامل	ویژه	تأیید	مردود	تأیید	مردود	

مقدمات آزمایش

آماده‌سازی سطحی: .....

تجهیزات:

از صنایع: ..... مدل: ..... شماره مسلسل: .....

روش بازرسی: □ خشک □ مرطوب □ مرئی □ فلورسنت

وضعیت محیط .....

□ مانده □ پیوسته □ پیوسته کامل

□ AC □ DC □ نیم‌موج

□ یوک □ کابل عایق‌دار □ سایر .....

جهت میدان: □ حلقوی □ طولی

مقاومت میدان: .....

آمپراژ، چگالی میدان، نیروی مغناطیسی، تعداد و تناوب نیروهای اعمالی

مؤخرات آزمایش:

تکنیک تخریب (در صورت لزوم): .....

تمیز کردن: ..... روش علامت‌گذاری: .....

ما، امضاءکنندگان، صحت نتایج مندرج در این برگه و تطبیق آماده‌سازی، جوشکاری و آزمایش قطعات نمونه را مطابق دستورالعمل آیین‌نامه، تأیید می‌نماییم.

اپراتور: ..... پیمانکار یا سازنده: .....

گزارش: ..... معرفی به‌وسیلهٔ: .....

تاریخ آزمایش: ..... تاریخ: .....

گزارش آزمایش ارزیابی جوشکاران، اپراتورهای جوشکاری و خال‌جوشکاران

نوع جوشکار .....

نام: ..... شماره شناسنامه: .....

شماره دستورالعمل جوشکاری ..... اصلاح ..... تاریخ .....

متغیرها	محدودهٔ ارزیابی	ثبت مقادیر واقعی مورد استفاده در ارزیابی
نوع / روش		
الکترود (تک یا چندگانه)		
جریان / قطبیت		
موقعیت		
موقعیت جوشکاری		
پشت بند (بله، خیر)		
نوع مصالح		
مصالح پایه		
ضخامت (ورق) شیاری		
ضخامت (ورق) گوشه		
ضخامت (لوله) شیاری		
ضخامت (لوله) گوشه		
قطر (لوله) شیاری		
قطر (لوله) گوشه		
مصالح پُرکننده		
شمارهٔ مشخصه		
رده		
نوع گدازآور / گاز		
سایر موارد		

بازرسی عینی

مورد تأیید □ مردود □

نتایج آزمایش خمش هدایت‌شده

نوع	نتیجه	نوع	نتیجه

نتایج آزمایش جوش گوشه

اندازهٔ جوش _____ ظاهر جوش _____

زخم _____ آزمایش شکست نفوذ ریشه _____

شرح مکان، نوع و اندازهٔ هرگونه ترک ایجاد شده در نمونهٔ آزمایشی

شمارهٔ آزمایش _____ بازرسی به‌وسیلهٔ _____

تاریخ _____ مؤسسه _____

نتایج آزمایش پرتونگاری

شمارهٔ فیلم	نتیجه	علامت	شمارهٔ فیلم	نتیجه	علامت

شمارهٔ آزمایش _____ بازرسی به‌وسیلهٔ _____

تاریخ _____ مؤسسه _____

ما امضاءکنندگان، صحت نتایج مندرج در این برگه و تطبیق آماده‌سازی، جوشکاری و آزمایش قطعات نمونه را مطابق دستورالعمل آیین‌نامه، تأیید می‌نماییم.

سازنده یا پیمانکار .....

معرفی به‌وسیلهٔ .....

تاریخ .....

گزارش آزمایش ارزیابی دستورالعمل جوشکاری (مخرب)

آزمایش کششی

شماره نمونه	عرض	ضخامت	سطح	بار کششی نهایی (kg)	تنش حد نهایی kg/cm^2	نوع و موقعیت شکست

آزمایش خمش هدایت‌شده

شماره نمونه	نوع خمش	نتیجه	توضیحات

بازرسی چشمی:

ظاهر جوش .....

بریدگی کناری .....

تخلخل حفره‌ای .....

تقعر .....

تاریخ آزمایش .....

گواهی‌کننده .....

آزمایش‌های دیگر

آزمایش پرتونگاری ـ فراصوتی

شماره گزارش RT: ..... نتیجه .....

شماره گزارش UT: ..... نتیجه .....

نتایج آزمایش جوش گوشه

حداقل بعد چندپاسه زخم‌دار ..... حداکثر بعد تک‌پاسه زخم‌دار .....

۱. ۲. ۳. ۱. ۲. ۳.

آزمایش کشش فلزجوش

مقاومت کششی (kg/cm^2) .....

مقاومت تسلیم (kg/cm^2) .....

افزایش طول در ۵۰ میلی‌متر، ٪ .....

شماره آزمایش .....

شماره تأیید .....

آزمایشگاه .....

نام جوشکار .....

تأیید آزمایش توسط .....

شماره آزمایش .....

هر .....

ما، امضاءکنندگان، صحت نتایج مندرج در این برگه و تطبیق آماده‌سازی، جوشکاری و آزمایش قطعات نمونه را مطابق دستورالعمل آیین‌نامه، تأیید می‌نماییم.

سازنده یا پیمانکار .....

امضاء

معرفی به‌وسیلهٔ .....

عنوان .....

تاریخ .....

گزارش آزمایش پرتونگاری

پروژه .....
ضوابط ارزیابی ـ شماره مقطع .....
گزارش به .....

محل و هندسهٔ جوش

تکنیک عکاسی .....
چشمه .....
فاصلهٔ چشمه تا فیلم .....
زمان تابش .....
صفحات .....
نوع فیلم .....

(شرح طول، عرض و ضخامت کلیهٔ درزهای پرتونگاری شده)

تاریخ	مشخصهٔ جوش	سطح	گزارش		اصلاح شده		توضیحات
			تأیید	مردود	تأیید	مردود	

ما، امضاءکنندگان، صحت نتایج مندرج در این برگه و تطبیق آماده‌سازی، جوشکاری و آزمایش قطعات نمونه را مطابق دستورالعمل آیین‌نامه، تأیید می‌نماییم.

پرتونگار: ..... پیمانکار یا سازنده: .....
گزارش: ..... معرفی به‌وسیلهٔ: .....
تاریخ آزمایش: ..... تاریخ: .....

فرم استاندارد دستورالعمل جوشکاری WPS

نام شرکت ..... شماره تجدیدنظر ..... تاریخ ..... توسط .....

شماره دستورالعمل ..... تأییدکننده ..... تاریخ .....

روش جوشکاری ..... دستی ☐ نیمه‌خودکار ☐ خودکار ☐

نوع درز

نوع: یک‌رو ☐ دو رو ☐

پشت‌بند: بله ☐ خیر ☐

مصالح پشت‌بند .....

بازشدگی ریشه ..... ضخامت ریشه .....

زاویه شیار ..... شعاع .....

شیارزنی پشت: بله ☐ خیر ☐ روش .....

وضعیت

جوش شیاری ..... گوشه .....

جوشکاری قائم: سربالا ☐ سرپایین ☐

فلز پایه

مشخصات فنی .....

نوع یا رده .....

ضخامت .....

خواص الکتریکی

نوع انتقال (GXAW):

مدار کوتاه ☐ قطره‌ای ☐ پاشیدنی ☐

جریان: AC ☐ DCEP ☐ DCEN ☐ ضربه‌ای ☐

غیره .....

الکترود تنگستن (GTAW):

اندازه .....

نوع .....

مصالح الکترود

مشخصات فنی AWS

رده طبق AWS

تکنیک جوشکاری

زنجیری ☐ زیگ‌زاگ ☐

یک‌پاسه ☐ چندپاسه ☐

تعداد الکترود .....

فواصل الکترود: طولی .....

عرضی .....

زاویه .....

فاصله با قطعه کار .....

تمیزی میان پاس .....

پوشش

نوع پودر ..... گاز .....

ترکیب .....

نوع روکش الکترود .....

پیش‌گرمایش

دمای پیش‌گرمایش، حداقل .....

دمای میان پاس، حداقل ..... حداکثر .....

عملیات پس‌گرمایش

درجه‌حرارت .....

زمان .....

هندسهٔ درز	جریان			الکترود		روش جوشکاری	عبور
	سرعت حرکت mm/min	ولتاژ	آمپراژ	نوع و قطبیت	قطر	رده		
								۱
								۲
								۳

۳ آزمون جوشکاران ساختمانی طبق استاندارد ملّی ایران

آزمون و امتحان

۱ ـ نظارت

جوشکاری و آزمون قطعه آزمون باید در حضور یک آزمایشگر یا سازمان آزمون‌گیرنده مورد قبول طرفین قرارداد انجام شود. ناظر ممکن است اعضایی از شرکت سازنده، خریدار و یا طرف سوم (بازرس مستقل) باشد.

بر روی قطعه‌های آزمون باید مشخصات جوشکار و آزمایشگر، پیش از شروع جوشکاری حک شود. آزمایشگر می‌تواند در مواردی که شرایط جوشکاری درست نیست یا هنگامی که مشاهده شود جوشکار صلاحیت فنی انجام امور مطابق با شرایط استاندارد را ندارد، آزمون را متوقف کند. به‌عنوان مثال در شرایطی که جوشکار بر روی قطعه جوشکاری شده، تعمیرات زیادی انجام می‌دهد.

۲ ـ شکل و ابعاد قطعه آزمون

شکل و ابعاد قطعه‌های آزمون باید مطابق شکل‌های ۱ و ۲ باشد.

۳ ـ شرایط جوشکاری

آزمون تأیید جوشکار باید با شرایط مورد استفاده در تولید و به‌دست آمده از WPS یا pWPS[1] تهیه شده براساس استاندارد ملی ایران باشد.

در تهیه WPS یا pWPS شرایط زیر باید مورد توجه قرار گیرند:

الف ـ آزمون باید براساس فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده در تولید انجام شود.

ب ـ فلز پُرکننده باید با فرآیند جوشکاری و حالت جوشکاری مطابقت داشته باشد.

پ ـ آماده‌سازی لبه ورق برای قطعه آزمون باید مطابق شرایط مورد استفاده در تولید باشد.

ت ـ ابعاد قطعه آزمون باید براساس اشکال این استاندارد باشد.

ث ـ جوشکاری باید در حالت‌ها و زوایای اتصال‌ها انجام شود که عموماً در تولید استفاده می‌شوند.

ج ـ جوش باید مطابق با بند ۵ ارزیابی شود.

چ ـ مدت زمان جوشکاری، برای قطعه آزمون باید با مدت زمان مورد استفاده در تولید (جهت انجام جوشکاری) یکسان باشد.

---

1. *prequalified Welding Procedure Specification* دستورالعمل جوشکاری پیش‌پذیرفته

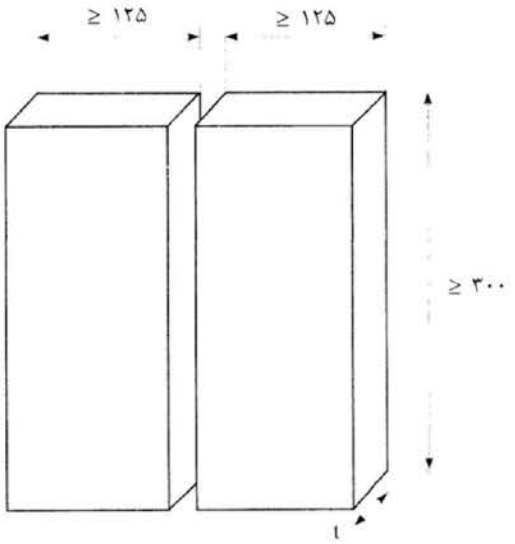
ح ـ قطعه آزمون باید دست‌کم یک توقف و یک شروع دوباره در پاس ریشه و پاس آخر داشته باشد و در طول (محدوده) مورد بازرسی برای بررسی مشخص شده باشد.

خ ـ رعایت هرگونه پیش‌گرم یا کنترل گرمای ورودی مورد نیاز در WPS یا pWPS برای قطعه آزمون الزامی است.

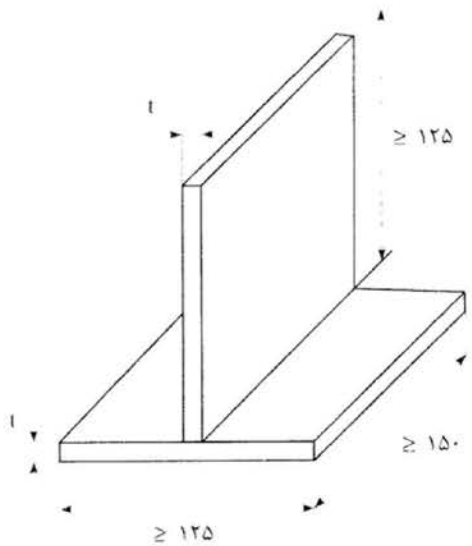
د ـ هرگونه عملیات حرارتی پس از جوشکاری که در WPS یا pWPS آمده باشد در صورتی که آزمایش خمش مورد نیاز نباشد می‌تواند حذف شود.

ذ ـ شناسایی قطعه آزمون.

ر ـ جوشکار اجازه دارد با تأیید آزمایشگر، کاستی‌های جزیی (به‌جز کاستی موجود در لایه سطحی) را توسط سنگ‌زنی، شیارزنی (گوجینگ) یا سایر روش‌های مورد استفاده در تولید حذف کند.



شکل ۱ ابعاد قطعه آزمون برای جوش لب به‌لب ورق.



برای $t \le 6mm$ $\alpha \le 0.5t$

برای $t > 6mm$ $0.5t \le \alpha \le t$

$(z \approx 0.7t)$

شکل ۲ ابعاد قطعه آزمون برای جوش (های) گوشه‌ای ورق.

۴ ـ روش‌های آزمون

هر قطعه آزمون که جوشکاری آن تکمیل می‌شود، باید پیش از هر عملیاتی در شرایط جوشکاری شده بازرسی چشمی شود. در صورتی که لازم باشد (رجوع شود به‌جدول ۱) بازرسی چشمی می‌تواند توسط آزمایش ذرات مغناطیسی، مایع‌های نافذ یا سایر روش‌ها و آزمایش بررسی سطح مقطع بر روی جوش‌های لب به‌لب تکمیل شود.

اگر جوش به‌وسیله بازرسی‌های چشمی تأیید شد، انجام آزمایش‌های پرتونگاری، شکست و آزمایش بررسی سطح مقطع مورد نیاز است (رجوع شود به‌جدول ۱).

آزمونه بررسی سطح مقطع باید آماده و سپس عمل حک‌کاری روی یک سمت از آن، برای آشکار شدن جوش انجام شود.

هنگامی که از آزمایش پرتونگاری استفاده می‌شود، باید علاوه بر آن آزمایش‌های خمش بر روی جوش‌های لب به‌لب حاصل از فرآیند MIG و MAG انجام شود.

پیش از آزمایش‌های مکانیکی، پشت‌بندهایی که در هنگام جوشکاری استفاده شده باید از قطعه آزمون جدا شوند. قطعه آزمون را می‌توان به‌وسیله برش حرارتی یا مکانیکی مقطع زد؛ ۲۵ میلی‌متر ابتدا و انتهای قطعه آزمون جوشکاری شده بریده شده و دور انداخته می‌شود (شکل‌های ۳ و ۴).

۵ ـ قطعه آزمون و آزمونه‌ها

۵ ـ ۱ کلیات

در قسمت‌های ۵ ـ ۲ تا ۵ ـ ۵ جزییات قطعه آزمون و آزمونه‌ها مانند نوع، ابعاد و آماده‌سازی آنها داده شده است. علاوه بر آن، وسایل مورد نیاز برای آزمایش‌های مکانیکی ارایه شده است.

۵ ـ ۲ جوش‌های لب به‌لب ورق

هنگامی‌که آزمایش پرتونگاری انجام می‌شود، طول مورد بازرسی از جوش در قطعه آزمون (شکل ۳ ـ الف) در شرایط جوشکاری شده باید با استفاده از روش رده B پرتونگاری شود.

زمانی‌که از آزمایش شکست استفاده می‌شود، کل طول مورد بازرسی در قطعه آزمون باید آزمایش شود. برای این منظور لازم است قطعه آزمون به‌آزمونه‌های متعدد تقسیم شود (شکل ۳ ـ الف). عرض هر آزمونه شکست باید حدود ۵۰ میلی‌متر باشد. در صورت لزوم می‌توان گرده جوش را حذف کرد و علاوه بر آن می‌توان بر لبه‌های جوش یک شیار به‌عمق حدود ۵ میلی‌متر ایجاد کرد تا بدین‌وسیله شکست در محل فلز جوش آسان شود (شکل ۳ ـ ب). در حالتی که جوشکاری یکطرفه بدون استفاده از پشت‌بند انجام می‌شود، نصف طول مورد بازرسی باید از طرف رویه و نصف دیگر از طرف ریشه آزمایش شود (شکل‌های ۳ ـ پ و ۳ ـ ت).

زمانی که آزمایش خمش عرضی به‌کار می‌رود، دو آزمونه خمش ریشه و دو آزمونه خمش رویه باید آزمایش شوند. قطر شکل‌دهنده یا غلتک داخلی باید برابر $4t$ و زاویه خمش برابر ۱۲۰ درجه باشد.

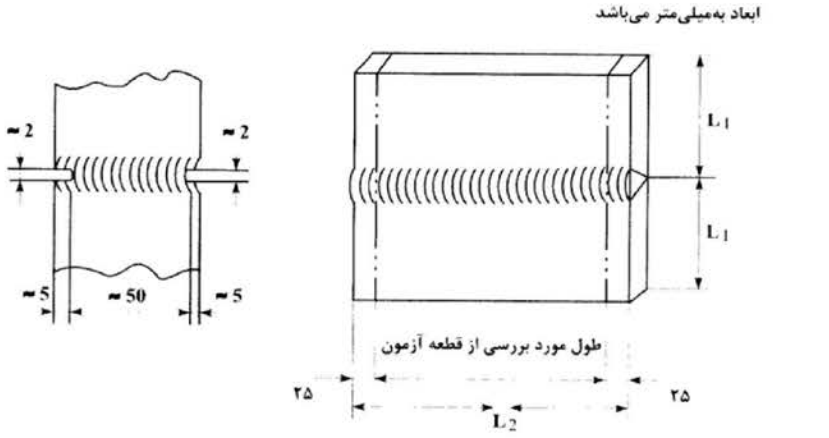
در هنگام آزمایش، نباید عیب منفرد بزرگتر از ۳ میلی‌متر در هیچ‌یک از جهات در آزمونه‌ها نمایان شود. پارگی که در گوشه‌های آزمونه در هنگام آزمایش ایجاد می‌شود نباید در ارزیابی مدنظر قرار گیرد.

جدول ۱ روش‌های آزمایش

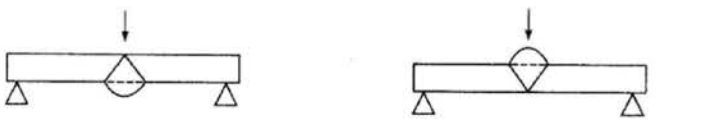
روش آزمایش	جوش لب به‌لب ورق	جوش گوشه
چشمی	*	*
پرتونگاری	*[۱و۲]	—
خمش	*[۳]	—
شکست	*[۱]	*[۴و۵]
بررسی سطح مقطع (بدون سمباده‌زنی)	—	*[۵]
ذرات مغناطیسی / مایع‌های نافذ	—	—

نشانه‌ها
* نشان‌دهندهٔ روش آزمایشی است که انجام آن اجباری می‌باشد.
— نشان‌دهندهٔ روش آزمایشی است که انجام آن اجباری نمی‌باشد.

۱ ـ آزمایش پرتونگاری یا شکست باید استفاده شوند ولی نه هر دو.
۲ ـ آزمایش پرتونگاری می‌تواند توسط آزمایش فراصوتی فقط در فولادهای فریتی با ضخامت معادل یا بیشتر از ۸ میلی‌متر جایگزین شود.
۳ ـ زمانی‌که آزمایش پرتونگاری استفاده می‌شود، انجام آزمایش‌های خمش برای فرآیندهای ۱۳۱، ۱۳۵، ۳۱۱ اجباری می‌باشد.
۴ ـ زمانی که آزمایشگر یا سازمان آزمون‌گیرنده درخواست کرده باشد، آزمایش شکست باید به‌همراه آزمایش‌های ذرات مغناطیسی / مایع‌های نافذ انجام شود.
۵ ـ آزمایش شکست می‌تواند توسط آزمایش بررسی سطح مقطع با بررسی حداقل چهار مقطع جایگزین شود که یکی از آنها باید از محل شروع یا پایان خط جوش باشد.

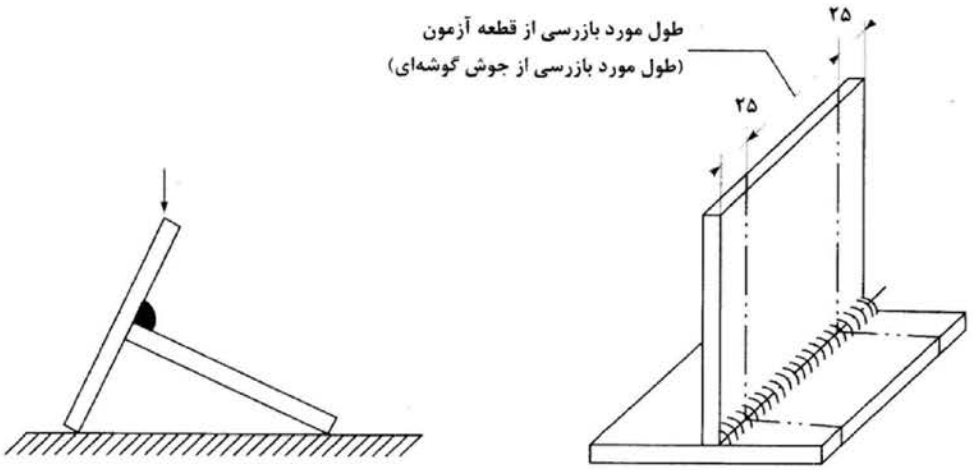


(الف) چگونگی تقسیم‌بندی برای تهیهٔ حداقل چهار آزمونه (ب) آماده‌سازی



(پ) آزمایش شکست از طریق خمش رویه (ت) آزمایش شکست از طریق خمش ریشه

شکل ۳ آماده‌سازی و آزمایش شکست آزمونه‌ها برای جوش لب به‌لب ورق.



(الف) چگونگی تقسیم‌بندی برای تهیهٔ آزمونه‌ها

(ب) آزمایش شکست

توجه: در صورت نیاز می‌توان در جوش گوشه‌ای شیار ایجاد نمود.

شکل ۴ آماده‌سازی و آزمایش شکست آزمونه‌ها برای جوش گوشه‌ای ورق.

واژه‌نامه انگلیسی به‌فارسی

A

Abrosion	ساییدگی
Age-hardenable	عمر سخت‌پذیری
Air line respirators	لوله‌های هوای تنفس
Air-conditioned helmet	تهویه مطبوع
American Iron and Stell Institute (AISI)	مؤسسه آهن و فولاد آمریکا
American Welding Society	انجمن جوش آمریکا
Arr stray	لکه قوس
Arc blow	انحراف قوس
Arc lenght	طول قوس
Arc welding	جوشکاری قوسی

B

Binder	ملات (ماده چسبان)
Blinder	چشم‌بند
Bridge gap	شکاف پل
Bubbling	حباب‌زایی
Burn-through	سوختگی

C

Cable lug	کفشک کابل
Carbon steel	فولاد کربنی
Chorme leather helmet	پوشش جرم
Cored electrode	الکترود مغزه‌دار
Cover glass	شیشه روکش
Covered electrode	الکترود روکش‌دار
Crater	سوراخ شدن، حفره

D

d.c and a.c. Motor-Generator welding machines	ماشین‌های جوشکاری موتور ـ مولد
Deposited	ترسیب‌شده
Drag	تکنیک کشیدن

E

Electro gas welding	جوشکاری گاز الکتریکی
Electrode cable	کابل الکترود
Electrode holder	انبر الکترود
Electrode oven	خشک‌کن الکترود

F

Fast fill	پُرجوش
Fast follow	زودرو
Fast freeze	زودجوش
Fast freeze (fast follow)	زودرو
Fit-up	مونتاژ، آرایش لبه‌ها
Flash goggle	عینک ایمنی
Friable	ترد
Full fill	الکترودهای پُرجوش

G

Gap	شکاف
Gas metal-arc welding	جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود مصرفی
Gas tungesten-arc welding	جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکترود تنگستن
Globular transfer	انتقال قطره‌ای
Glove	دستکش جوشکاری
Gouging	شیارزنی
Grinding	سنگ‌زنی
Ground cable	کابل اتصال به‌زمین
Ground clamp	گیرهٔ اتصال به‌زمین

H

Hand shield	ماسک دستی
Hard-facing	رویه سخت
Head band	نوار روی سر
Head shield	ماسک کلاهی

Heat affected zone (HAZ)	ناحیه متأثر از حرارت
Helmet	سربند
Hood	کلاه ایمنی
Hot-shortness	پارگی گرم (پارگی یا ترک‌خوردن فلزاتی نظیر چدن کـه بعد از ذوب فلز و در مرحلهٔ انجماد صورت می‌گیرد).
Hydrogen pick up	مکش هیدروژن

I

Inclusion	دخول

J

Job requirement	الزامات کار
Joint design	هندسه درز
Joint design and fitup	هندسه و مونتاژ درز

L

Lap weld	اتصالات لب روهم
Leather cap	کلاه چرمی
Low-hydrogen electrode	الکترودهای کم‌هیدروژن

M

Metal arc welding electrode	الکترودهای جوشکاری قوسی
Microcrack	ریز ترک
Moisture-prone	نم‌گیر

N

National Electrical Manufacture Association	انجمن ملی سازندگان الکتریکی

O

Open circuite voltage	ولتاژ مدار باز
Out put slope	شیب خروجی

P

Pit	حفره
Polarity	قطبیت
Polarity interchangeablity	تأثیر روکش بر قطبیت
Poor fitup	جفت‌نشده
Positioners	موقعیت‌دهنده‌ها
Process	فرآیندهای جوشکاری
Protective clothing	لباس محافظ
Protective lens	ریشه رنگی

R

Reverse polarity (Positive polarity)	جوشکاری با قطبیت معکوس (مثبت)

S

Scaling	پوسته شدن
Shielded metal-arc welding	جوش قوس الکتریکی با الکترود روکش‌دار
Slag	گل (سرباره) جوشکاری
Stainless steel electrode	الکترود فولادهای ضدزنگ
Stick electrode	الکترود روکش‌دار با طول محدود
Stick electrode welding	جوشکاری با الکترود روکش‌دار
Straight polarity (Negative polarity)	جوشکاری با قطبیت مستقیم (منفی)
Stud welding	جوشکاری گل‌میخ‌ها
Sul-Coated or sul finish electrode	سول

T

Thirsty	مواد معدنی خشک
Transparent coating	پوشش شفاف

U

Under cut	بریدگی کناره جوش
Underbead creak	زیر ترک (ترک زیر مهره جوش)

V

Volt-ampere characteristic	ولتاژ ـ شدت جریان

W

Welding bench	میز جوشکاری

9789647588881

راهنمای جوش و اتصالات جوشی

در ساختمانهای فولادی