فصل ۱

کلیات طراحی سازه‌های فولادی

طراحی کاربردی سازه‌های فولادی (جلد یک)- محسن گرامی

فصل ۱	**کلیات طراحی سازه‌های فولادی**	**۱**
۱-۱	پیشگفتار	۲
۱-۲	معرفی فولاد	۵
۱-۳	فولاد ساختمانی	۸
۱-۴	مشخصات فنی فولاد	۲۴
۱-۵	بارگذاری	۳۸
۱-۶	طراحی سازه	۴۱
۱-۷	تحلیل سازه، پیش نیاز طراحی	۴۳
۱-۸	آیین‌نامه‌های طراحی	۵۵
۱-۹	فلسفه یا روش طراحی	۵۷
۱-۱۰	واحدهای مورداستفاده	۶۵
۱-۱۱	توجهات لازم	۶۶
۱-۱۲	مسائل فصل اول	۶۷

۱-۱ پیشگفتار

طرح سازه مجموعه‌ای از هنر و علم مهندسی است که با بینش مجرب مهندسی از عملکرد سازه تحت اثر عوامل خارجی، عجین شده‌است. علوم استاتیک، دینامیک، مکانیک جامدات و تحلیل سازه‌ها به‌عنوان زیربنای دانش فنی موردنیاز در طراحی سازه قلمداد می‌شوند، تا بتوان به کمک آنها سازه‌ای ایمن، اقتصادی و بادوام طرح کرد. طراحی سازه‌ها تا حدود ۱۵۰ سال قبل و پیش از توسعه علوم مهندسی اصولاً بر خلاقیت و تجربه گذشتگان استوار بود. پس از آنکه اصول و مبانی حاکم بر رفتار سازه پیشرفت نمود، طراحی، روزبه‌روز شکل علمی‌تری به خود گرفت. امروزه دانش مهندسی، نقش اصلی را در تصمیمات طراحی ایفا می‌کند، تصمیماتی که مبنای آنها محاسبات سازه‌ای است. در حال حاضر توجه به حفظ پایداری و سلامت سازه در زلزله‌های شدید با استفاده از مفاهیم شکل‌پذیری جای خود را در ضوابط طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی بازنموده است.

فولاد عنصری نسبتاً یکنواخت و همگن است که از آن در مهندسی سازه به‌عنوان عنصر باربر و یا انتقال‌دهنده بار به‌وفور استفاده می‌شود. مقاومت بالا، خاصیت شکل‌پذیری و نزدیک بودن مقاومت آن در تنش‌های کششی و فشاری باعث متمایز شدن آن به‌عنوان یک عنصر سازه‌ای از دیگر مصالح شده‌است. یک مهندس طراح سازه‌های فولادی علاوه بر لزوم اطلاع کامل از علم مکانیک سازه‌ها و ضوابط طراحی (که بعضاً توسط آیین‌نامه‌های معتبر تدوین شده‌است) شایسته است از خصوصیات مکانیکی فولادهایی که در طراحی اعضای سازه به کار می‌رود مطلع باشد.

فولاد به‌صورت سنگ آهن به‌وفور در طبیعت و معادن یافت می‌شود. از سنگ آهن (توسط عمل احیاء در کوره‌ی بلند کارخانه‌های ذوب آهن) آهن خام تولید شده و پس از دفع مواد زائد از آن و افزودن عناصری به آن، آلیاژهای مختلف را به‌صورت شمش فولادی در می‌آورند.

عناصر مختلفی برای بهبود خصوصیات مکانیکی (نظیر مقاومت، شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و مقاومت در مقابل خوردگی) به آهن خام تصفیه شده اضافه می‌کنند که شامل کربن، مس، کرم، نیکل، منگنز، فسفر، سیلیکون، سیلیسیوم-تیتانیوم و وانادیوم می‌باشند. این آلیاژها علی‌رغم آنکه حداکثر ۳ درصد وزن فولاد را تشکیل می‌دهند ولی تأثیر بسیار زیادی در مشخصات مکانیکی فولاد دارند. کربن نقش اساسی در خواص مکانیکی فولاد دارد. افزایش کربن، مقاومت و تنش تسلیم فولاد را بالا برده ولی خاصیت شکل‌پذیری آن را کاهش داده و آن را ترد و شکننده می‌کند. آلیاژهایی که تا حدود ۲ درصد وزنی خود کربن دارند را فولاد و آلیاژهایی که بیش از ۲ درصد وزنی خود کربن دارند به‌عنوان چدن نامیده می‌شوند. فولادهای نرم و نیمه نرم بین ٪ ۰,۱۵ تا ٪ ۰,۴ کربن دارند درحالی‌که فولادهای سخت تا فوق‌العاده سخت می‌توانند بین ٪۰,۶ تا ٪۲ کربن داشته باشند.

افزایش کربن علاوه بر ایجاد تردی و شکنندگی در فولاد باعث کاهش استقامت آن در مقابل نیروهای ضربه‌ای و دینامیکی شده و خاصیت جوش‌پذیری آن را نیز به‌شدت کاهش می‌دهد.

مقدار کربن در فولادهای ساختمانی و صنعتی بین ٪۰,۱۷ تا ٪۰,۲۲ است و در پیچ‌های پرمقاومت و اعلا میزان کربن تا حدود ٪۰,۵۵ افزایش می‌یابد. هر یک از عناصر موجود در آلیاژ فولاد تأثیر زیادی بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی فولاد دارند. به‌عنوان مثال منگنز باعث افزایش مقاومت در مقابل ضربه و سایش و نیز شکل‌پذیری می‌شود درحالی‌که مولیبدن ضمن افزایش سختی و مقاومت گرمایی فولاد باعث کاهش شکل‌پذیری آن خواهد شد. درهرحال عناصر غیرفلزی نظیر گوگرد، فسفر و سیلیسیوم در فولاد ساختمانی نبایستی از ٪۰,۱ زیادتر شود. به فولادهایی که کمتر از ٪۰,۵ وزنی آلیاژ داشته باشند فولاد کم‌آلیاژ گویند.

امروزه با توسعه علم مهندسی مواد و استاندارد شدن انواع مختلف فولاد با درصد آلیاژهای گوناگون امکان استفاده از فولادهای با مقاومت بالا در زمینه سازه‌های فلزی فراهم شده‌است. در حال حاضر استفاده از فولادهای مقاومت بالا در طراحی سازه‌های فولادی نیازمند آگاهی از تکنیک‌های خاص جوشکاری می‌باشد.

مهم‌ترین خاصیت فولاد مقدار تنش تسلیم یا تنش جاری‌شدن آن است که باتوجه‌به نمودار تنش-کرنش و توسط آزمایش کششی به دست می‌آید که با f_y نمایش می‌دهند.

باتوجه‌به اینکه ساختمان‌های احداثی در کشور ما در مناطق شهری، اکثراً به‌صورت اسکلت فلزی و یا بتنی بوده و ساختمان‌های بنایی با محدودیت‌های خاصی (طبق آیین‌نامه‌های ایران) ساخته می‌شوند، لازم است انتخاب نوع اسکلت باتوجه‌به مزایا و معایب این سازه‌ها صورت پذیرد. بطور کلی اگر سازه‌ای (چه فولادی و چه بتن مسلح) به‌درستی طراحی گردد و اجرای آن نیز صحیح انجام شود، از نظر مقاومت و عملکرد در طول زمان شرایط یکسانی داشته و تفاوت‌های زیر باتوجه‌به شرایط می‌تواند ایجاد شود.

۱-۱-۱ مزایای فولاد

a- مقاومت زیاد

مقاومت زیاد فولاد این امکان را می‌دهد که از مقاطع فولادی با ابعاد کوچک‌تری در طراحی اعضاء استفاده شود و سازه‌های بزرگ با وزن کمتر ساخته شود. این ماده برای ساخت ساختمان‌های بلند، پل‌های طویل و دیگر سازه‌هایی که به وزن کم نیاز دارند و یا شرایط فونداسیون آنها ضعیف است، مناسب است. همچنین در دهانه‌های بزرگ سوله‌ها و ساختمان‌های مرتفع و ساختمان‌هایی که بر زمین‌های سست قرار می‌گیرند این مزیت فولاد حائز اهمیت است. در مواردی که کمبود فضا نقش مهمی را بازی می‌کند (به‌عنوان مصالح ساختمانی مناسب که اجازه ساخت مقاطع کوچک را می‌دهد) مورداستفاده قرار می‌گیرد.

b- خواص ارتجاعی

خواص مفروض ارتجاعی فولاد با تقریب بسیار خوبی مصداق عملی دارد. فولاد تا تنش‌های بزرگی، از قانون هوک به‌خوبی پیروی می‌کند، مثلاً از اینرسی یک مقطع فولادی می‌توان با اطمینان در محاسبه استفاده نمود، حال‌آنکه در مورد مقطع بتنی ارقام مربوطه نیاز به اصلاح دارد.

c- ضریب ارتجاعی

ضریب ارتجاعی نسبتاً زیاد فولاد، اجازه طرح و ساخت سازه‌هایی را می‌دهد که در آنها به‌سختی بالا با حداقل مصرف مصالح نیاز است. یعنی برای افزایش سختی در مواردی چون کنترل خیز سازه، کمانش و ارتعاش به‌جای استفاده از مصالح بیشتر (جهت افزایش سختی) از ضریب ارتجاعی بزرگ‌تر استفاده می‌شود. ضریب ارتجاعی فولاد حدوداً ۱۰ برابر بتن است.

d- قابلیت چکش خواری

چکش خواری فولاد که قابلیت تحمل تغییر شکل‌های زیاد بدون شکست (در مقابل تنش‌های بالا) می‌باشد، از خصوصیات مهم فولاد است. این ویژگی یک کنترل برای ایمنی سازه و اعلام خطر است درصورتی‌که در سازه‌های ترد و شکننده، انهدام بدون اعلام خطر و ناگهانی صورت می‌گیرد.

e- قابلیت تخریب، توسعه و گسترش

یکی از مزایای مهم ساختمان‌های فولادی قابلیت گسترش آنها می‌باشد، که به سادگی می‌توان به کمک اتصالات مناسب، سازه‌ها یا اعضایی را به سازه اصلی متصل کرد و سازه را توسعه داد. ضمناً تخریب یک سازه فولادی (برای احداث بنای جدید) نیز ساده‌تر است همچنین مصالح فلزی حاصل از تخریب را با رعایت شرایطی می‌توان دوباره استفاده کرد..

f- شکل‌پذیری

یکی از خواص مهم مصالح فولادی، شکل‌پذیری آن است. این خاصیت در بهبود رفتار لرزه‌ای نقش مهمی دارد.

g- خواص یکنواخت

فولاد در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی از نظر شکل مولکولی و خواص، ماده بسیار یکنواخت و همگنی است که مقاومت آن نسبت به زمان تغییر نمی‌کند و پدیده خزش در آن رخ نمی‌دهد و در شرایط مناسب از دوام مطلوب برخوردار است.

h- سهولت و سرعت ساخت و نصب

زمان احداث سازه‌های فولادی نسبت به سازه‌های بتنی کمتر است؛ بنابراین کاهش زمان ساخت که به‌عنوان یکی از پارامترهای اقتصادی یک طرح بهینه همواره مد نظر است باتوجه‌به امکان ساخت و نصب سریع سازه‌های فولادی میسر خواهد بود. سرعت نصب قطعات فلزی نسبت به اجرای قطعات بتنی مدت زمان کمتری می‌طلبد. ساخت قطعات فلزی در کارخانه و نصب آن در موقعیت و شرایط کارگاه با تمهیدات لازم به سهولت قابل اجراست.

i- کاهش اتلاف مصالح

باتوجه‌به ساخت قطعات در کارخانه، پرت مصالح ورق فلزی در مرحلهٔ ساخت قابل‌کنترل است و از پرت مصالح می‌توان استفاده مجدد نمود.

۱-۱-۲ معایب فولاد

a- ضعف فولاد در درجه حرارت بالا

مقاومت ساختمان با افزایش دما کاهش می‌یابد. روش سنتی مقابله با این نقص استفاده از یک لایه بتن در اطراف فولاد به منظور محافظت در برابر حریق است. روش نوین مقابله با این نقص استفاده از رنگ‌های ضدحریق یا پوشش‌های معدنی ضدحریق، می‌باشد. پوشش سطح خارجی فولاد با مصالح ضدحریق می‌تواند حدود چند ساعت تأثیر حریق بر فولاد را به تأخیر اندازد.

b- خوردگی و فساد فلز در مقابل عوامل جوی

فولاد در برابر عوامل جوی، خورده شده و سطح مقطع آن کاهش می‌یابد، از این رو بایستی از فولاد در مقابل عوامل جوی محافظت نمود. برای جلوگیری از این مشکل ابتدا با روش ماسه‌پاشی (Sand blast) یا ساچمه زنی (Shot blast)، سطح فولاد را به‌صورت کاملاً صیقلی در می‌آورند و سپس روی آن رنگ مناسب می‌زنند تا خوردگی به حداقل برسد.

c- سختی در اجرای اتصالات صلب جوشی

تأمین صلبیت گره‌های قاب خمشی در سازه‌های فولادی با دشواری بیشتری نسبت به گره‌های صلب بتنی همراه است که به دلیل نیاز به جوشکاری خاص در سازه‌های فولادی است.

d- تمایل قطعات فشاری به کمانش

باتوجه‌به مقاومت زیاد قطعات فلزی، ابعاد مصرفی و ضخامت عناصر فلزی معمولاً کوچک است، از این‌رو تمایل به کمانش یکی از ضعف‌های فولاد به شمار می‌آید.

e- نیاز به شارژ مالی اولیه

باتوجه‌به اینکه تهیه مصالح فولادی در ابتدای پروژه صورت می‌گیرد، بنابراین هزینه اولیه زیادی در ابتدای پروژه باید تأمین گردد (در سازه‌های بتن‌آرمه، به دلیل اجرای تدریجی طبقات، شارژ مالی کارگاه نیز به تدریج می‌تواند صورت گیرد).

۱-۲ معرفی فولاد

فولاد عنصری نسبتاً یکنواخت و همگن است که از آن در مهندسی سازه به‌عنوان عنصر باربر و یا انتقال‌دهنده بار به‌وفور استفاده می‌شود. مقاومت بالا، خاصیت شکل‌پذیری و یکسان بودن مقاومت آن در تنش‌های کششی و فشار، باعث متمایز شدن آن از دیگر مصالح سازه‌ای شده‌است. شایسته است مهندسین طراح سازه‌های فولادی، علاوه بر اطلاع کامل از علم مکانیک سازه‌ها و ضوابط طراحی که بعضاً توسط آیین‌نامه‌های معتبر تدوین شده‌است، از خصوصیات مکانیکی فولادهایی که در طراحی اعضای سازه به کار می‌رود نیز مطلع باشند.

۱-۲-۱ آلیاژ فولاد

فولاد به‌صورت سنگ آهن به‌وفور در طبیعت و معادن یافت می‌شود. از سنگ آهن توسط عمل احیاء در کوره‌ی بلند کارخانه‌های ذوب آهن، آهن خام تولید شده و پس از دفع مواد زائد و افزودن عناصری دیگر، آلیاژهای مختلف آن به‌صورت شمش فولادی تولید می‌گردند. تولید آهن تا سال ۱۹۵۴ میلادی تنها از طریق ذوب و احیای سنگ آهن در کوره‌ی بلند و با استفاده از ذغال، با مقدار کربن معین و تصفیه مواد مذاب آن به دست می‌آمد. پس از آن روش احیای مستقیم به کمک گازهای طبیعی، در صنایع فولادسازی نیز مورد توجه قرار گرفت.

امروزه با توسعه علم مهندسی مواد و استاندارد شدن انواع مختلف فولاد با درصد آلیاژهای گوناگون، امکان تولید فولادهای با مشخصات متفاوت با کاربرد در زمینه‌های صنعتی و ساختمان‌سازی فراهم شده‌است. عناصر مختلفی که برای بهبود خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت، شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و مقاومت در مقابل خوردگی به آهن خام تصفیه شده اضافه می‌کنند شامل کربن، مس، کرم، نیکل، منگنز، فسفر، سیلیکون، سولندر-تیتانیوم و وانادیوم می‌باشند. هر یک از عناصر موجود در آلیاژ فولاد تأثیر زیادی بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی فولاد دارند.

آلیاژهایی که دارای حدود ٪۲ کربن هستند، فولاد و آلیاژهایی که مقدار کربن آنها بیش از این مقدار است به‌عنوان چدن نامیده می‌شوند.

در صنعت ریخته‌گری و تولید فلزات، دسته‌بندی‌های فولاد توسط استانداردهای مختلف بر اساس دو موضوع مقدار عناصر آلیاژ و کاربرد فولاد ارائه شده که طیف وسیعی از خانواده فولاد را در بر می‌گیرد. از برخی از آنها می‌توان به فولاد ضدزنگ، فولاد کربنی، فولاد آلیاژی، فولاد فنری و فولاد ابزاری اشاره نمود.

در صنعت ساختمان، فولادهای کربنی، فولاد نرمه (زیرمجموعه فولاد کربنی) و فولاد کم‌آلیاژ بیشترین کاربرد را دارند.

۱-۲-۲ تأثیر عناصر مختلف بر خواص فولاد

کربن و منگنز عمده‌ترین عناصری هستند که موجب افزایش مقاومت فولاد می‌شوند. با بالا رفتن درصد کربن فولاد، تنش تسلیم آن بالا رفته، شکل‌پذیری آن تقلیل یافته و جوش‌پذیری آن نقصان می‌یابد.

افزایش منگنز باعث افزایش مقاومت در مقابل ضربه و سایش و نیز شکل‌پذیری می‌شود درحالی‌که وجود مولیبدن ضمن افزایش سختی و مقاومت گرمایی فولاد، باعث کاهش شکل‌پذیری آن خواهد شد.

۱-۲-۳ فولاد کربنی

یکی از روش‌های رایج دسته‌بندی انواع فولاد، به ویژه در صنعت ساختمان، بر اساس میزان کربن آن است زیرا مقدار کربن، تاثیر زیادی در خواص آلیاژ فولاد دارد. افزایش کربن مقاومت و تنش تسلیم فولاد را افزایش داده ولی خاصیت شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد و آن را ترد و شکننده می‌کند. جوشکاری راحت و اقتصادی فولاد که بدون پیش‌گرمی، پس‌گرمی و یا الزام به کاربرد الکترودهای غیر متعارف انجام می‌گیرد، عمدتاً زمانی انجام می گیرد که کربن فولاد کمتر از ٪۰,۳ باشد.

افزایش کربن علاوه بر ایجاد تردی و شکنندگی در فولاد، باعث کاهش استقامت آن در مقابل نیروهای ضربه‌ای و دینامیکی شده و خاصیت جوش‌پذیری را نیز به‌شدت کاهش می‌دهد. مقدار کربن در فولادهای ساختمانی و صنعتی بین ٪ ۰,۱۷ تا ٪ ۰,۲۲ است و در پیچ‌های پرمقاومت و اعلا میزان کربن تا حدود ٪ ۰,۵۵ افزایش می‌یابد.

عناصر اصلی فولاد کربنی شامل آهن، کربن، منگنز، سیلیس و مس می‌باشند[۱]. دسته‌بندی متداول فولادهای کربنی به قرار زیر است:

- فولادهای با کمتر از ٪ ۰,۱۵ کربن که مقاومت مطلوبی ندارند.
- فولاد کم‌کربن یا فولاد نرمه[۲]، که مقدار کربن در آنها بین ٪ ۰,۱۵ تا ٪ ۰,۳ است. فولاد نرمه از جمله ارزانترین فولادها بوده و به دلیل مقاومت کمتر و حساسیت بیشتر در برابر خوردگی، برای مصارفی که فولاد روکش یا رنگ شده و در سطح مقطع مناسب تولید می‌شود (مانند فولاد ساختمانی) مناسب است.
- فولاد با کربن متوسط[۳] یا فولاد اعلا، با ٪ ۰,۳ تا ٪ ۰,۶ کربن. به دلیل مقاومت بیشتر این فولاد، از آن در تولید چرخ‌دنده ها، ریل راه‌آهن و مواردی مشابه استفاده می‌شود.
- فولاد با کربن زیاد[۴]، با ٪ ۰,۶ تا ٪ ۱ کربن. از این نوع فولاد در ساخت فنر و کابل‌های دارای مقاومت زیاد استفاده می‌شود.
- فولاد با کربن خیلی زیاد[۵]، با ٪ ۱,۲۵ الی ٪ ۴ کربن که از آن در ساخت قطعات بسیار ظریف استفاده می‌شود. لازم به ذکر است برای تولید فولاد با کربن بیش از ٪ ۲,۵ از تکنولوژی ریخته گری پودری یا PM[۶] استفاده می‌شود، در غیر این صورت آلیاژ فولادی با بیش از ٪ ۲ کربن، معمولا در خانواده چدن طبقه‌بندی می‌شود.

۱-۲-۴ فولاد آلیاژی[۷]

از دید مقدار عناصر مورداستفاده در ساخت فولاد، آن را به دو دسته کم‌آلیاژ و پرآلیاژ تقسیم‌بندی می‌کنند که تفاوت آنها در مجموع درصد وزنی عناصر است. چنانچه عناصر آلیاژ تا ٪ ۴ وزن آنرا در بر گیرند، جزو دسته کم‌آلیاژ طبقه‌بندی شده و در غیراین‌صورت زیرمجموعه دسته پرآلیاژ خواهد بود[۸]. فولاد مورداستفاده در صنعت ساختمان، فولاد کم‌آلیاژ می‌باشد. معمولا در متون سازه‌ای منظور از فولاد آلیاژی، فولاد کم‌آلیاژ است، مگر آنکه خلاف آن به طور صریح ذکر گردد. از نمونه‌های معروف فولاد پرآلیاژ می‌توان به «فولاد ضدزنگ ۱۸-۸» اشاره نمود که دارای ٪ ۱۸ نیکل و ٪ ۸ کرم می‌باشد.

به‌منظور دستیابی به تنش تسلیم بیشتر و در حدود ۵۵۰۰ تا ۷۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، فولاد تحت عملیات تبرید و بازپخت قرار می‌گیرد. این نوع فولاد معمولاً دارای پله خمیری مشخص نیست. تبرید فولاد سبب ایجاد ساختاری بسیار سخت و محکم می‌گردد و بازپخت (اعمال حرارت دوباره به فولاد) موجب تقلیل مقاومت و سختی آن شده و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد.

---

[۱] انجمن آهن و فولاد امریکا یا AISI (American Iron and Steel Institute)برای فولاد کربنی تعریف خاصی دارد که در آن، برای برخی عناصر محدوده ای مشخص شده است.

[۲] برای فولاد کم کربن (Low-Carbon Steel) و فولاد نرمه (Mild Steel) در مراجع مختلف، تعاریف متفاوتی ذکر شده است.

[۳] Medium-Carbon Steel

[۴] High-Carbon Steel

[۵] Ultra-High-Carbon Steel

[۶] Powder Metallurgy

[۷] Alloy Steel

[۸] برخی منابع، این حد را ٪ ۸ ذکر نموده‌اند.

۳-۱ فولاد ساختمانی[۱]

فولادهای ساختمانی، به‌عنوان یکی از مصالح ساختمانی، به انواعی از فولاد اطلاق می‌شود که در صنعت ساختمان‌سازی به کار می‌روند[۲] که معمولا فولادهای کربنی، فولاد نرمه (زیرمجموعه فولاد کربنی) و فولاد کم‌آلیاژ بیشترین کاربرد را در صنعت ساختمان‌سازی دارند. جهت شناخت بهتر انواع فولاد ساختمانی، معمولا از دو مشخصه تنش تسلیم یا تنش جاری‌شدن و تنش‌نهایی یا تنش گسیختگی استفاده می‌شود[۳]. به‌عنوان مثال، تنش تسلیم فولاد نرمه بین ۲۲۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و تنش‌نهایی یا مقاومت گسیختگی آن بین ۳۴۰۰ تا ۳۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است.

تنش تسلیم فولادهای مقاوم در محدوده ۲۷۵۰ الی ۴۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. این فولادها همانند فولاد کربنی دارای پله خمیری مشخصی هستند و علاوه بر کربن با فلزات دیگر نظیر کرم، کلسیم، مس، منگنز، نیکل، فسفر، مولیبدن، وانادیوم و غیره آلیاژ شده‌اند. با افزودن این آلیاژها و به دلیل تغییر ساختار مولکولی، مقاومت فولاد افزایش می‌یابد. در تولید این فولاد هیچگونه عملیات خاص حرارتی انجام نمی‌گیرد.

از منظر انواع شکل‌های تولید شده قطعات فولادی، می‌توان فولاد ساختمانی را به پروفیل‌های گرم‌نوردشده، پروفیلهای سردنوردشده، قطعات فولادی مصرفی در احداث سازه ساختمان‌های فولادی گرم‌نوردشده (پیچ مهاری داخل بتن، صفحات کف‌ستون، ستون، تیر، مهاربند، خرپا، لاپه، دستک، کلاف دیوار، پیچ، مهره، پرچ، پین و اتصالات)، الکترودهای مصرفی در عملیات جوشکاری و میلگرد مورداستفاده در ساخت بتن مسلح تقسیم‌بندی نمود. مشخصات فنی، ساختاری و ظاهری فولاد به کار رفته در مصالح نام‌برده، متفاوت بوده و به روش‌های مختلفی قابل تقسیم‌بندی هستند. به‌عنوان مثال، از دیدگاه روش تولید، در انواع گرم‌نوردشده، اصلاح شده در حالت سرد و آب‌داده، از دیدگاه شکل ظاهری در دو نوع ساده و آجدار و از دیدگاه جوش‌پذیری، به انواع جوش‌پذیر، جوش‌پذیر مشروط و جوش ناپذیر تقسیم‌بندی می‌گردند.

فولاد ساختمانی با مدول الاستیسیته ۲×۱۰^{۵} مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰٫۳ و عموماً دو نوع ST37 با مقاومت تسلیم ۲۲۵ تا ۲۳۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۳۴۰ تا ۴۷۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی حدود ۲۵ درصد و نوع ST52 با مقاومت تسلیم ۳۴۵ تا ۳۵۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۴۹۰ تا ۶۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی حدود ۲۱ درصد می‌باشد[۴].

نام‌گذاری جدید فولادهای ساختمانی مطابق مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۴۰۱ به شرح جدول است.

---

[۱] Structural Steel

[۲] نکات اجرایی تهیه مصالح فولادی در بخش ** ارائه شده است.

[۳] جهت آشنایی با مشخصات فنی فولاد به بخش ** مراجعه شود.

[۴] مشخصات فولاد مصرفی در ساختمان مطابق مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان و استاندارد ملّی ایران به شماره ۱۶۰۰ تعیین می‌گردد.

جدول ۱-۱ نام‌گذاری انواع فولاد ساختمانی مطابق استاندارد ایران

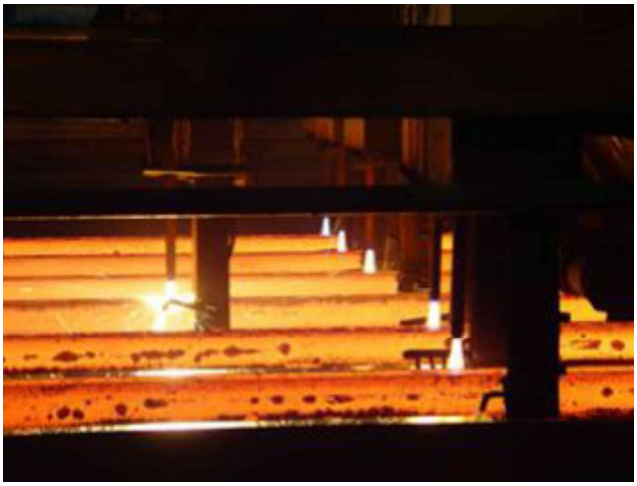
** نام ردهٔ فولاد مطابق استاندارد جدید ایران، EN و ISO	نام ردهٔ فولاد مطابق استاندارد قدیم ایران	ضخامت (mm)	تنش تسلیم مشخصه (F_y) (MPa)	تنش کششی نهایی (MPa)	کرنش نهایی (ε_u) (%)
—	St-34	$t \le 16$ $16 < t \le 40$	205 195	330-410	28
S235	St-37	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 100$	235 225 215	360-510	22-26
S275	St-44	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 63$ $63 < t \le 80$ $80 < t \le 100$	275 265 255 245 235	410-560	19-23
—	St-50	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 63$	295 285 275	490-610	20
S355	St-52	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 63$ $63 < t \le 80$ $80 < t \le 100$	355 345 335 325 315	470-630	18-22
S450	—	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 63$ $63 < t \le 80$ $80 < t \le 100$	450 430 410 390 380	550-720	17
S460	—	$t \le 16$ $16 < t \le 40$ $40 < t \le 63$ $63 < t \le 80$ $80 < t \le 100$	460 440 430 410 400	540-730	17

** نام ردهٔ فولاد مطابق استانداردهای ISIRI 12065 و ISO 24314	ضخامت (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش کششی نهایی (MPa)	نسبت تنش تسلیم به تنش کششی نهایی (%)	کرنش نهایی (ε_u) (%)
S235S	$6 \le t < 12$ $12 \le t < 16$ $16 \le t < 40$ $40 \le t \le 125$	235 - 355 235 - 355 235 - 355 215 - 335	400 - 510	— ≤80 ≤80 ≤80	21
S325S	$6 \le t < 12$ $12 \le t < 16$ $16 \le t < 40$ $40 \le t \le 125$	325 – 445 325 – 445 325 – 445 295 – 415	490 - 610	— ≤80 ≤80 ≤80	20
S345S	$6 \le t < 12$ $12 \le t < 16$ $16 \le t < 40$ $40 \le t \le 125$	345 – 450 345 – 450 345 – 450 345 – 450	≥ 450	≤85 ≤85 ≤85 ≤85	19

ihbr.ir

۱-۳-۱ پروفیل‌های گرم‌نوردشده

به دلیل واردات زیاد محصولات فولادی و تیرآهن نوردشده در سال‌های اخیر و شباهت ظاهری پروفیل‌های خارجی با محصولات داخلی، لازم است مشخصات فنی و اجرایی پروفیل‌های مورد تأیید در سازه، در مرحله تهیه و ورود به کارگاه، توسط مهندس مجری و ناظر مورد توجه قرار گیرند. بهتر است انحراف قطعات تهیه شده، مانند ریسمانی بودن، راست گوشه بودن انتها، پیچیدگی و تابیدگی در هنگام تهیه مورد توجه قرار گیرند. در صورت قرار گرفتن انحراف مذکور در محدوده غیرمجاز، لازم است برشکاری، خمکاری و صافکاری عضو، مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ای انجام گرفته و انحراف مورد نظر تا حد مجاز کاهش یابد. نمایی از نورد گرم پروفیل در شکل ۱-۱ نمایش داده‌شده‌است.



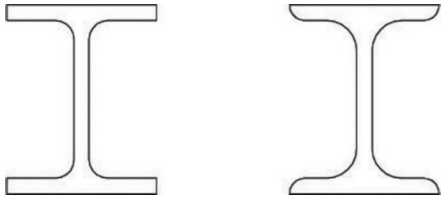
شکل ۱-۱ نورد گرم پروفیل

۱-۳-۱-۱ مشخصات پروفیل استاندارد

پروفیل‌های نوردشده کارخانه‌های داخلی دارای استاندارد تولید، مانند اصفهان و اهواز، مرغوبیت مورد انتظار را دارا بوده و دارای شناسنامه معتبر هستند. همچنین محصولات تولیدی آنها طبق ضوابط اداره استاندارد، در فواصل زمانی خاص کنترل می‌شود، درحالی‌که پروفیل‌های خارجی، معمولاً دارای شناسنامه معتبر نبوده و در صورت استفاده از آن‌ها، لازم است کلیه مشخصات فنی و هندسی به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد تا از انطباق این مشخصات با ضوابط آیین‌نامه‌ای و همچنین فرضیات طراحی سازه، اطمینان حاصل شود. در صورت نداشتن عیوب سطحی و ظاهری، می‌توان از فولادهای غیراستاندارد در بخش‌هایی از ساختمان که دارای اهمیت زیاد نیستند و یا در مکان‌هایی که ویژگی‌های مکانیکی فولاد بر روی استحکام ساختمان اثر سوئی بر جای نمی‌گذارند، استفاده نمود.

پروفیل‌های مرغوب موجود در بازار کشور (مانند تیرآهن اصفهان یا اهواز) با پروفیل‌های نامرغوب (مانند برخی پروفیل‌های وارداتی) دارای تفاوت‌های ظاهری و فنی هستند که بر اساس تجربه، برخی از این تفاوت‌ها بشرح زیر می‌باشند:

- تیرآهن مرغوب دارای طول یکسان و استاندارد هستند ولی تیرآهن نامرغوب (معمولاً روسی) طول‌های یکسان ندارند (۱۱۶۰-۱۱۷۰ متر).
- تیرآهن مرغوب تولید اصفهان رنگ زغالی تیره دارند درصورتی‌که تیرآهن نامرغوب، رنگ‌های روشن‌تر و گاهی قرمز دارند. البته لازم به ذکر است تیرآهن مرغوب تولید اهواز، نسبت به تیرآهن اصفهان، دارای رنگ روشن‌تری هستند.
- تیرآهن نامرغوب دارای جرم واحد طول غیراستاندارد هستند و ممکن است جرم شاخه آنها تا ۱۵ کیلوگرم سبک‌تر از جرم استاندارد باشد.
- احتمال زنگ‌زدگی و قرمز رنگ بودن تیرآهن وارداتی نامرغوب بیشتر است (به دلیل جنس فولاد، مسافت زیاد راه و توقف طولانی در گمرک).
- در محل برش ناحیه ابتدا و انتهای تیرآهن نامرغوب، لبه تیرآهن ضخیم‌تر شده و معمولاً دارای پلیسه[1] است.
- فولاد بعضی از تیرآهن نامرغوب از نوع ST32 می‌باشد (تنش تسلیم و تنش‌نهایی آنها با فولاد نوع ST37 متداول در ایران متفاوت است)، که به دلیل اختلاف در جنس فولاد، معمولاً این پروفیلها با الکترودهای متداول در ایران، جوش‌پذیری مطلوبی نشان نمی‌دهند، جوش آنها با پاشش زیاد جرقه همراه است (اصطلاحا پر جرقه است) و یا جوش آنها استحکام لازم را ندارد.



الف- مقطع تیرآهن نامرغوب ب -مقطع تیرآهن مرغوب

شکل ۱-۲ مقایسه شکل غلتک مقطع تیرآهن مرغوب و تیرآهن نامرغوب

- فولاد بعضی از تیرآهن نامرغوب، نرم‌تر از پروفیل‌های مرغوب می‌باشد (تفاوت در مدول الاستیسیته) که این موضوع می‌تواند در خیز و کمانش آنها تاثیر منفی بگذارد.
- ممکن است پروفیل‌های نامرغوب، با اندازه‌های خارج از جدول اشتال تولید شوند (مانند IPE25).
- بال تیرآهن مرغوب اصفهان چهارگوش هستند درصورتی‌که معمولاً مقطع تیرآهن نامرغوب دارای قوس بیشتری است (شکل ۱-۲ الف و شکل ۱-۲ ب). دلیل این امر تفاوت در شکل غلتک و نورد پروفیلها می‌باشد. البته پروفیل مرغوب INP تولید اهواز دارای شکل متفاوتی از پروفیل IPE اصفهان است و با IPE غیراستاندارد و نامرغوب تفاوت دارد که لازم است به این موضوع توجه گردد.

۱-۳-۱-۲ تیرآهن نرمال و شاخه

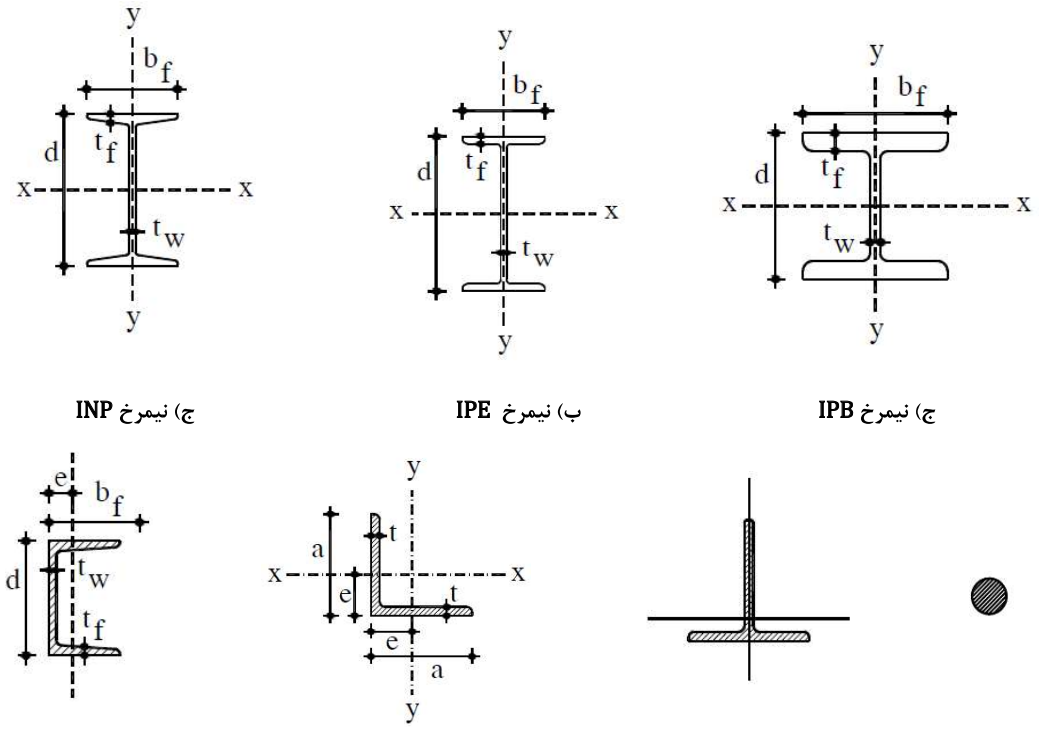
تیرآهن نوردشده، طی فرایند تولید و نورد گرم یک شمش، به‌صورت پروفیل تولید می‌شود. سپس پروفیل به اندازه شاخه‌های ۱۲ متری برش خورده (تیرآهن شاخه)، و طول باقی‌مانده از آن به طول ۵ متر الی ۱۱۹۰ متر از پروفیل نوردشده، با نام متداول پروفیل نرمال به بازار عرضه می‌گردد.

[1] پلیسه به ورقه‌های نازکی اطلاق می‌شود که پس از بریدن پروفیل در آن ایجاد شده و بعدا با ضربه زدن برداشته می‌شود.

به لحاظ کیفی تفاوت زیادی میان پروفیل‌های نرمال و شاخه وجود ندارد، اما بعضی از مهندسان بر این اعتقاد هستند که چون تیرآهن نرمال در قسمت انتهایی شمش می‌باشد، ممکن است از نظر کیفیت با پروفیل‌های شاخه اختلاف داشته باشد. قیمت پروفیل نرمال کمتر از پروفیل شاخه می‌باشد و به طور متوسط با حدود ۱۰ درصد کاهش نسبت به پروفیل شاخه به بازار عرضه می‌شود.

۱-۳-۱-۳ انواع و مشخصات هندسی پروفیل‌های نوردشده

از دیرباز مقاطع فولادی با استاندارد اروپایی نظیر DIN آلمان در کشور معمول بوده است و کارخانه ذوب آهن اصفهان چنین مقاطعی را تولید و به بازار عرضه می‌کند. مشخصات مهم هندسی مقاطع مختلف فولادی باتوجه‌به شکل واقعی آن مقاطع در جداول استاندارد پروفیلها ذکر شده‌است. ازجمله این مشخصات هندسی می‌توان به سطح مقطع (A) وزن واحد طول (G) ارتفاع پروفیل (d) عرض بال (b_f) ضخامت بال (t_f) ضخامت جان (t_w) لنگر اینرسی حول محور x (I_x) لنگر اینرسی حول محور y (I_y) ، اساس مقطع حول محور x (S_x) ، اساس مقطع حول محور y (S_y) ، شعاع ژیراسیون حول محور x (r_x) ، شعاع ژیراسیون حول محور y (r_y) و لنگر اول سطح مقطع حول محور x (Q_x) و لنگر اول سطح حول محور y (Q_y) اشاره کرد. پروفیلهای ساختمانی با استاندارد اروپایی به شرح زیر هستند که در شکل ۱-۳ نشان داده شده‌اند.



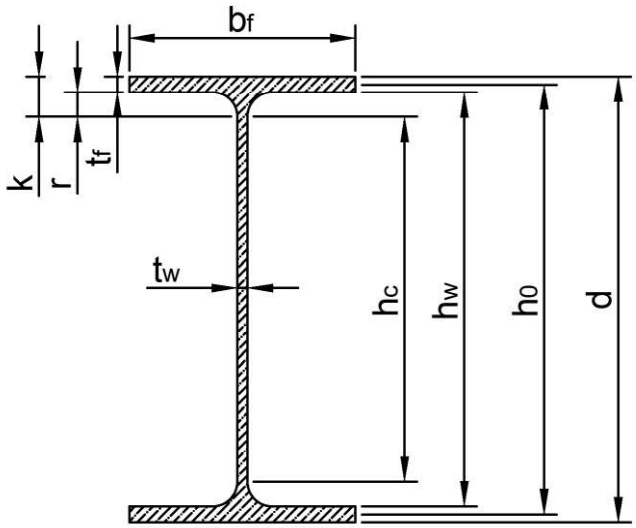
ج) نیمرخ IPB ب) نیمرخ IPE ج) نیمرخ INP

ز) نیمرخ میلگرد و) نیمرخ سپری ه) نیمرخ L د) نیمرخ UNP

شکل ۱-۳ پروفیل‌های ساختمانی با استاندارد اروپایی

یکی از پروفیل‌های پرکاربرد در ساختمان‌سازی، پروفیل I شکل است. از این نیمرخ در قطعات خمشی به شکل تیر فرعی و تیر اصلی استفاده می‌شود. این مقاطع به‌صورت تکی برای استفاده به‌عنوان ستون مناسب نیست و بایستی به‌صورت مقطع مرکب بکار روند. عیب این نیمرخ آن است که سطح داخلی بال‌های آن دارای شیب است که در اتصالات پیچ و پرچی مشکلاتی را ایجاد می‌کند و بایستی در بستن مهره پیچ‌هایی که طرف داخل بال قرار می‌گیرند، از واشرهای شیب‌دار استفاده کرد.

در این کتاب پارامترهای مشخصات مقطع مطابق شکل ۱-۴ تعریف شده‌اند.



شکل ۱-۴ جزئیات مقطع پروفیل I شکل

d	فاصله پشت تا پشت بال
h_0	فاصله مرکز تا مرکز بال‌ها برابر $d - t_f$
h_w	فاصله خالص میان بال‌ها برابر $d - 2t_f$
k	فاصله وجه بیرونی بال تا انتهای ماهیچه جان (در پروفیل نوردشده)[1]
	فاصله وجه بیرونی بال تا انتهای جوش گوشه جان (در تیرورق)
h_c	ناحیه صاف جان برابر $d - 2k$
b_f	عرض بال
t_f	ضخامت بال
t_w	ضخامت جان

a- پروفیل IPE

این پروفیل به پروفیل نیم پهن یا بال متوسط مشهور است (شکل ب). عرض بال این پروفیل حدود نصف ارتفاع مقطع آنست. این پروفیل دارای دو محور تقارن $x - x$ و $y - y$ بوده و I_x آن بیشتر و I_y آن کمتر است. این نیمرخ از نمره ۸ تا۶۰ تهیه می‌شود. در بازار ایران از نمره ۱۲ تا ۳۰ آن متداول‌تر است. در برخی موارد این پروفیل نسبت به پروفیل نرمال ارجحیت دارد که از جمله می‌توان به بیشتر بودن پهنای بال این پروفیل نسبت به پهنای پروفیل نرمال، موازی‌بودن سطوح داخلی و خارجی بال‌ها و وزن کمتر آن نسبت به INP اشاره کرد. در کلیه مواردی که از نیمرخ INP استفاده می‌شود، می‌توان از IPE نیز استفاده کرد.

[1] در برخی جداول اشتال، این فاصله بجای نماد k از نماد c استفاده می‌شود.

مثال ۱-۱

مطلوبست تعیین مشخصات هندسی مقطع IPE20.

حل:

IPE	bf	tf	d	tw	r	K	d-2K	G	A	Ix	Sx	rx	Zx	Iy	Sy	ry	Zy	J	Lp	Lr
units	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	kg/m	cm2	cm4	cm3	cm	cm3	cm4	cm3	cm	cm3	cm4	cm	cm
20	10	0.85	20	0.56	1.2	2.05	15.9	22.4	28.5	1940	194	8.26	209.7	142	28.5	2.24	43.93	5.17	114.9	393.6

با مراجعه به جدول اشتال، مشخصات هندسی مقطع IPE20 به شرح زیر است:

$IPE20: b_f = 10cm, t_f = 0.85cm, d = 20cm, t_w = 0.56cm, A = 28.5cm^2$

$I_x = 1940cm^4, I_y = 142cm^4$

$S_x = 194cm^3, S_y = 28.5cm^3$

$r_x = 8.26cm, r_y = 2.24cm$

b- پروفیل INP

پروفیل INP (پروفیل نرمال بال باریک) یکی از متداول‌ترین نیمرخ‌های نوردشده فولادی است (شکل الف) و دارای دو محور تقارن $x-x$ و $y-y$ است. لنگر لختی آن نسبت به محور $x-x$ زیاد و نسبت به محور $y-y$ کم است. این نیمرخ از ارتفاع $8cm$ تا $60cm$ نورد می‌شود و معمولاً در بازار ایران نیمرخهای بالاتر از ارتفاع $40cm$ یافت نمی‌شود. علامت اختصاری این نیمرخ INP است. منظور از نمره آن عدد نمایشگر ارتفاع مقطع است که پس از علامت اختصاری آن نوشته می‌شود. به‌عنوان مثال $INP\ \ 14$ که منظور پروفیل به ارتفاع مقطع $14cm$ است.

مثال ۱-۲

مطلوب است مشخصات هندسی مقطع INP20.

حل:

با مراجعه به جدول اشتال، مشخصات هندسی مقطع INP20 به شرح زیر است:

$INP20 \rightarrow b_f = 9cm, d = 20cm, t_f = 1.13cm, t_w = 0.75cm, A = 33.5cm^2,$

$I_x = 2140cm^4, I_y = 117cm^4, S_x = 214cm^3, S_y = 26cm^3, r_x = 8cm, r_y = 1.87cm$

c- پروفیل IPB (بال پهن)

این نیمرخ، نیمرخ با وزن متوسط بال پهن است که به مقطع I شکل بال پهن یا H شکل موسوم است (شکل ج). ارتفاع و عرض بال پروفیل تا نمره ۳۰ با یکدیگر برابر است و ازنمره۳۰ به بالا عرض بال ۳۰ سانتی‌متر باقی مانده و ارتفاع مقطع افزایش می‌یابد. در جدول از نمره۱۰تا ۱۰۰ این پروفیل موجود است ولی در بازار ایران از نمره ۱۴ تا ۳۲بیشتر یافت می‌شود. به دلیل اینکه این نیمرخها حول هر دو محور قوی است از آن به‌صورت تک در ستون‌ها استفاده می‌شود. این پروفیل در تیرهای حمال قوی و تیرهایی که احتیاج

به عرض بال خیلی زیاد باشد، مصرف دارد. تیرهای IPB در سه نوع IPB_Iبا وزن سبک و عرض بال کمتر، IPB با وزن متوسط و IPB_V با وزن سنگین و عرض بال بیشتر مورداستفاده قرار می‌گیرند که IPB_V, IPB_I هر دو غیر معمول هستند و در بازار ایران معرفی نمی‌شوند.

مثال ۳-۱

مطلوب است مشخصات هندسی مقطع IPB20، IPB$_V$20 و IPB$_L$20

حل:

IPB	bf	tf	d	tw	r	K	d-2K	G	A	Ix	Sx	rx	Zx	Iy	Sy	ry	Zy	J	Lp	Lr
units	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	kg/m	cm2	cm4	cm3	cm	cm3	cm4	cm3	cm	cm3	cm4	cm	cm
20	20	1.5	20	0.9	1.8	3.3	13.4	61.3	**78.1**	**5700**	570	8.54	**620**	2000	200	5.07	303.4	49.13	260.2	1334.5

با مراجعه به جدول اشتال، مشخصات هندسی مقطع IPB20 به شرح زیر است:

$$IPB20 \rightarrow d = 20cm, b_f = 20cm, t_w = 0.9cm, t_f = 1.5cm,$$
$$G = 61.3kg, A = 78.1cm^2, I_x = 5700cm^4, S_x = 570cm^3, I_y = 2000cm^4, S_y = 200cm^3,$$
$$r_x = 8.54cm, r_y = 5.07cm$$

مشخصات هندسی مقاطع IPB$_V$20 و IPB$_L$20 به شرح زیر هستند:

$$IPB_L20 \rightarrow d = 19cm, b_f = 20cm, t_w = 0.65cm, t_f = 1.0cm,$$
$$G = 42.3kg, A = 53.8cm^2, I_x = 3692cm^4, S_x = 389cm^3, I_y = 1336cm^4, S_y = 134cm^3,$$
$$r_x = 8.28cm, r_y = 4.98cm$$
$$IPB_V20 \rightarrow d = 22cm, b_f = 20.6cm, t_w = 1.5cm, t_f = 2.5cm,$$
$$G = 103kg, A = 131.3cm^2, I_x = 10640cm^4, S_x = 967cm^3, I_y = 3651cm^4, S_y = 354cm^3,$$
$$r_x = 9cm, r_y = 5.27cm$$

d- پروفیل ناودانی UNP

این نیمرخ یکی دیگر از معمول‌ترین نیمرخهای مصرفی در ساختمان‌های فلزی است (شکل د). این نیمرخ دارای یک محور تقارن است و سطوح بالهای آن دارای شیب است که این شیب برای پروفیلهای تا نمره ۳۰ مساوی ۸ درصد و برای پروفیلهای بزرگتر از نمره ۳۰ برابر ۵ درصد است. برای نشان دادن این نیمرخ پس از درج علامت اختصاری آن، نمره آن را می‌نویسند که همان ارتفاع مقطع است. این نیمرخ از نمره ۸ تا۴۰ ساخته می‌شود. از ناودانی به‌صورت زوج در تیرهای خمشی و به‌صورت زوج یا چندتایی در ستون‌ها، به‌صورت تک در لاپه خرپاها، در اعضای خرپاها و تیرهای مشبک، در تیرهای مرکب، نعل‌درگاه‌ها و مهاربندها استفاده می‌شود. چون این نیمرخ دارای مرکز برشی در خارج نیمرخ است، لذا اگر به‌صورت تک در قطعات خمشی به کار برده شود در آن پیچش به وجود خواهد آمد، لذا بهتر است در قطعات خمشی همواره به‌صورت زوج بکار رود.

مثال ۴-۱

مطلوب است مشخصات هندسی مقطع UNP20.

حل:

با مراجعه به جدول اشتال، مشخصات هندسی مقاطع UNP20 به شرح زیر است:

$$UNP20(d = 20cm, b_f = 7.5cm, t_w = 0.85cm, t_f = 1.15cm, G = 25.3kg, A = 32.2cm^2, I_x = 1910cm^4, S_x = 191cm^3, I_y = 148cm^4, S_y = 27cm^3, r_x = 7.7cm, r_y = 2.14cm, e = 2.01cm)$$

لازم به ذکر است که e فاصله مرکز ثقل تا پشت جان در نیم‌رخ‌های ناودانی، نبشی و سپری است.

e- پروفیل ناودانی ایرانی UPA

این پروفیل مشابه پروفیل UNP است، لکن مشخصات هندسی مقطع آن با UNP متفاوت است.

مثال ۱-۵

مطلوب است مشخصات هندسی مقطع UPA20.

حل:

با مراجعه به جدول اشتال، مشخصات هندسی مقاطع UPA20 به شرح زیر است:

$$UPA20(d = 20cm, b_f = 7.6cm, t_w = 0.52cm, t_f = 0.9cm, G = 18.4kg, A = 23.4cm^2, I_x = 1520cm^4, S_x = 152cm^3, I_y = 113cm^4, S_y = 20.5cm^3, r_x = 8.07cm, r_y = 2.20cm, e = 2.07cm)$$

f- پروفیل نبشی L

این نیمرخ دارای دو بال عمود بر هم با ضخامت یکسان است (شکل ه) و در دو نوع با بال‌های مساوی و نامساوی تهیه می‌شود. علامت اختصاری نبشی به‌صورت L است و درمورد نبشی با بالهای نامساوی بعد از علامت اختصاری اندازه بال بزرگتر و بعد اندازه بال کوچکتر و سپس ضخامت بال بر حسب سانتی‌متر نوشته می‌شود.

مثلاً $L12 \times 8 \times 1.2$ یعنی نبشی با بالهای به طول ۱۲ و ۸ سانتی‌متر و ضخامت بالی برابر با ۱۲ سانتی‌متر. از این پروفیل در اتصالات مختلف تیر و ستون، اتصال ستون به کف ستون، در تهیه تیرهای مرکب و تیرهای مشبک، به‌عنوان اعضای خرپا، در مهاربندها، در سقفهای کاذب، در دکلها، در پایه برجها و منابع، در بستهای چپ و راست ستون‌های مرکب و در درب و پنجره‌سازی استفاده می‌شود.

از بین نبشی‌ها، نبشی که ضخامت با عرض بال در آنها متناسب باشد نبشی استاندارد است که در طراحی از آن استفاده می‌شود. نبشی استاندارد را به هر سه حالت L9 ، L9 × 0.9 و یا L9 × 9 × 0.9 می‌توان نشان داد که در آن بال‌ها مساوی و ضخامت ۰,۱ عرض بال است.

مثال ۱-۶

مطلوب است مشخصات هندسی مقطع نبشی L20*20*2.

حل:

b x t	r1	r2	F	G	e	w	v1	Ix=Iy	Sx=Sy	rx=ry	Iξ	rξ	Iη	Sη	rη
cm	cm	cm	cm2	kg/m	cm	cm	cm	cm4	cm3	cm	cm4	cm	cm	cm3	cm
20x2.0	1.80	0.90	76.40	59.90	5.68	14.10	8.04	2850	199	6.11	4540	7.72	1160	144	3.89

با مراجعه به جدول اشتال مشخصات نبشی L20*20*2 به‌قرار زیر است:

$L20(a = 20cm, t = 2cm, G = 59.9kg, A = 76.3cm^2$

$I_x = I_y = 2850cm$

$r_x = r_y = 6.11cm$

$r_\xi = 7.72cm$

$r_\eta = 3.89cm$

$e = 5.68cm$

در این مشخصات a طول ساقهای نبشی، t ضخامت ساق نبشی، r_ξ شعاع ژیراسیون حول محور قوی (محور نیمساز) و r_η شعاع ژیراسیون حول محور ضعیف (محور عمود بر نیمساز) نبشی است. لازم به ذکر است در برخی منابع فنی، محورهای فوق با نامگذاری متفاوتی ارائه شده‌اند.

g- نیمرخ سپری T

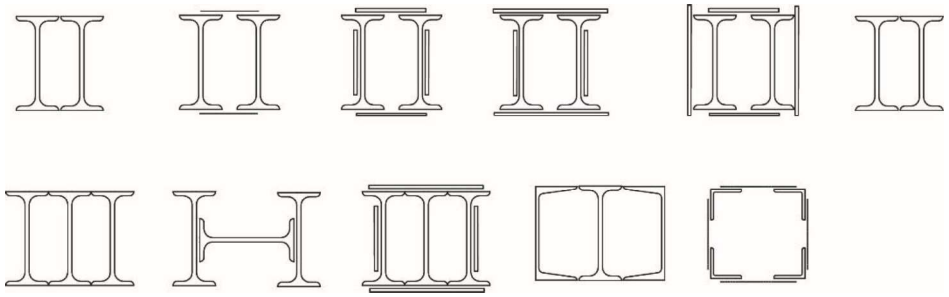
این نیمرخ که شکل مقطع آن به‌صورت T و دارای یک محور تقارن است (شکل و) در دو نوع تهیه می‌گردد. اول آنکه ارتفاع آن برابر قاعده آن است که با علامت T مشخص می‌شود و از نمره ۲۰ تا ۴۰ ساخته می‌شود. برای نشان دادن آنها بعد از علامت، نمره سپری را می‌نویسند. نوع دیگر سپری با قاعده دو برابر ارتفاع یعنی عرض بال دو برابر ارتفاع مقطع است و با علامت TB مشخص می گردد. سطوح بال و جان این گونه سپری‌ها دارای شیب بوده و لبه آنها گرد گوشه است. از سپری‌ها در خرپا سازی، سقفهای کاذب و درب و پنجره سازی استفاده می‌شود.

۱-۳-۱-۴ مقاطع اعضای سازه

به دلیل نبود مقاطع بزرگ نوردشده و نیاز به اشکال خاص در برخی پروژه‌ها، ساخت مقاطع چندتایی در ایران بسیار مرسوم است. در اشکال زیر این مقاطع برای ستون‌ها، تیرها و مهاربندها آورده شده‌است.

a- مقاطع ستون‌ها

انواع مقاطع مورداستفاده در ستون‌ها در شکل ۱-۵ نشان داده‌شده‌است:



شکل ۱-۵ انواع مقاطع قابل استفاده در ستون‌ها

ورق‌های تقویت برای سهولت جوشکاری، می‌تواند کوچکتر از محل اتصال یا بزرگتر باشد.

b- مقاطع تیرها

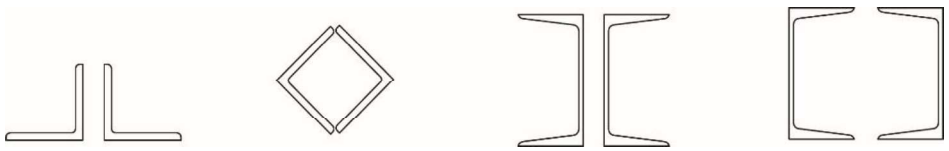
انواع مقاطع مورداستفاده در تیرها در شکل ۱-۶ نشان داده‌شده‌است:

شکل ۱-۶ انواع مقاطع قابل استفاده در تیرها

تقویت تیرها عمدتا از طریق بال آنها است. در تیرها معمولاً کمتر از مقاطع تقویت شده با ورق جان استفاده می‌شود و فقط در تیرهای لانه‌زنبوری جهت تقویت برشی جان کاربرد دارد.

c- مقاطع مهاربندها

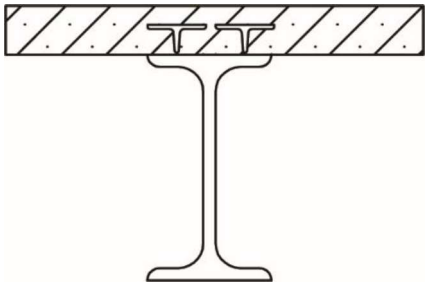
انواع مقاطع مورداستفاده در مهاربندها در شکل ۱-۷ نشان داده‌شده‌است:



شکل ۱-۷ انواع مقاطع قابل استفاده در مهاربندها

d- مقاطع مرکب (کامپوزیت) تیرها

یک نمونه از تیرها، تیر Composite یا مرکب است که مقاطع آن یک قسمت فولادی و یک قسمت بتنی مطابق شکل ۱-۸ است.

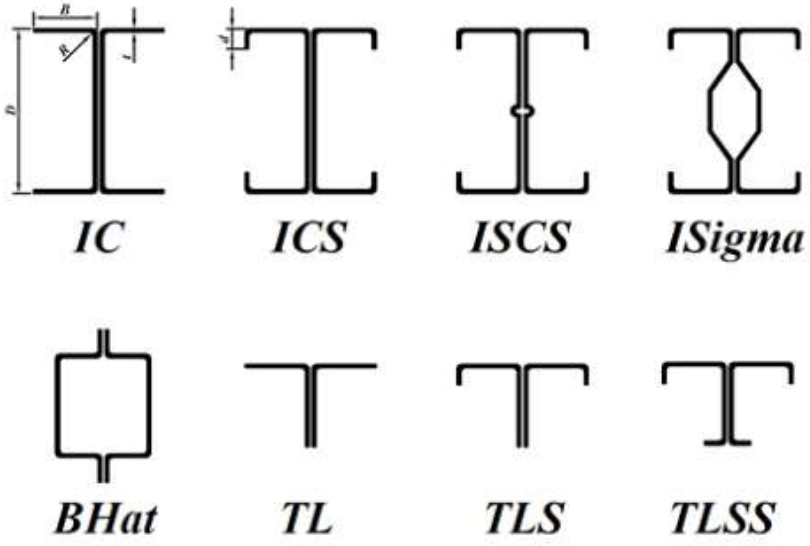


شکل ۱-۸ مقطع تیر کامپوزیت

۱-۳-۲ فولاد سردنوردشده

طیف نوینی از سازه‌های فولادی مشتمل بر اعضاء با ضخامت کم که از نورد سرد ورق‌های فولادی به شکل‌های مختلف ساخته می‌شوند نیز در ساخت اسکلت ساختمان بکار می‌رود. نمونه دستگاه نورد سرد ورق در شکل ۱-۹ قابل مشاهده است.

شکل ۱-۹ نورد سرد



شکل ۱-۱۰ انواع مقاطع سرد نوردشده

۱-۳-۳ ورق

ورق‌هایی که برای ساخت اعضاء فولادی به کار می‌روند، در طول ۶ متر، عرض ۱۰ الی ۲۰ متر و با ضخامت‌های ۴ تا ۸۰ میلی‌متر تولید می‌شوند. جهت محاسبه و طرح برش ورق و به حداقل رساندن دور ریز (پرت) آن، لازم است ابعاد دقیق ورق در دسترس باشند. در خصوص طرح برش بهینه ورق، چیدمان شکل‌ها بر روی آن و به حداقل رساندن دور ریز در زمان برش، نرم‌افزارهایی طرح شده که بازدهی طرح برش را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد[۱].

۱-۳-۴ میلگرد

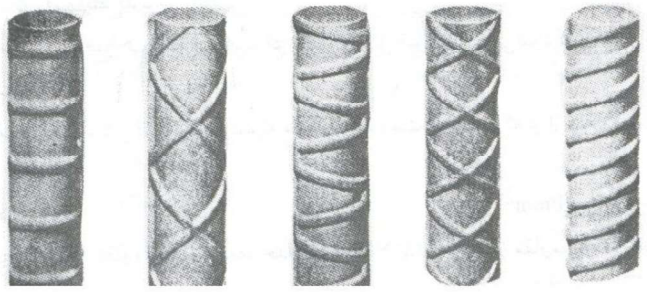
میلگرد دارای مقطع مدور و توپر می‌باشد (شکل ز) و در ساختمان‌های فلزی جهت مهاربند، آویز و مهار به کار گرفته می‌شود. در ساختمان‌های بتن مسلح به‌صورت وسیعی استفاده می‌شود. مشخصات میلگرد با قطر آن بیان می‌شود. کارخانه ذوب آهن اصفهان از قطر ۶ میلیمتر تا ۴۰ میلیمتر را تولید می‌کند که در چهار نوع AI, AII , AIII و AIV ارائه می‌شود. میلگرد AI که از فولاد نرمه ساخته می‌شود و $F_y = 2400bar$ و دارای سطح خارجی صاف است. میلگرد نوع AII که از فولاد ممتاز ساخته می‌شود و دارای $F_y = 3000bar$ است و سطح خارجی آن آجدار است و آجها در امتداد یکدیگر هستند. میلگرد نوع AIII که از فولاد مرغوب‌تر ساخته می‌شود و دارای $F_y = 4000bar$ است و سطح خارجی آن آجدار است و آجها یکدیگر را قطع می‌کنند. میلگردها براساس قطر (D) می‌توانند با حرف φ نمایش داده شوند. در نقشه‌کشی برای آرماتورهای آجدار از $\bar{\varphi}$ و یا Φ و آرماتورهای ساده از φ یا ϕ استفاده می‌شود. مشخصات آرماتورهای مصرفی در جدول ۱-۱ بیان شده‌است.

جدول ۱-۱ مشخصات آرماتورهای مصرفی

رده در مبحث نهم	نام رایج	حداقل تنش تسلیم $F_y(\frac{kg}{cm^2})$	حداقل مقدار مجاز مقاومت کششی حداکثر فولاد $F_u(\frac{kg}{cm^2})$	مقاومت مشخصه $f_{yk}(\frac{kg}{cm^2})$	طبقه‌بندی از نظر شکل رویه
S240	AI	۲۴۰۰	۳۶۰۰	۲۲۰۰	فاقد آج
S340	AII	۳۴۰۰	۵۰۰۰	۳۰۰۰	آجدار مارپیچ
S400	AIII	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۴۰۰۰	آجدار جناقی
S500	AIV	۵۰۰۰	۶۵۰۰	۵۰۰۰	آجدار مرکب

شکل آج میلگردها می‌تواند نشان‌دهنده نوع آن باشد ولی معیار قابل اعتماد و قطعی نیست و لازم است تست کشش انجام شود. آزمایش کشش یکی از آزمایش‌های ارزان و سریع برای تعیین مشخصات مکانیکی میلگردها است.

[۱] مانند نرم‌افزارهای Cutting Optimization و Cut Master.



شکل ۱-۱۱ نمایش آج آرماتورها

به‌عنوان ضابطه شکل‌پذیری، ازدیاد طول نسبی دو طول معیار، یکی به طول ۱۰ برابر قطر میلگرد (ε_{10}) و دیگری به طول ۵ برابر قطر میلگرد (ε_5) اندازه‌گیری می‌شود که باید از مقادیر حداقل جدول ۱-۲ بیشتر باشد.

جدول ۱-۲ حداقل مجاز ازدیاد طول نسبی میلگردهای فولادی در آزمایش کشش (به درصد)

رده فولاد ازدیاد طول نسبی	S240	S340	S400	S500
حداقل مقدار مجاز ε_{10}	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۸
حداقل مقدار مجاز ε_5	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۰

اگر مقدار کرنش نهایی از این اعداد کمتر بود، آرماتور برای کار ساختمانی مناسب نمی‌باشد. کارخانه‌های تولید میلگرد به طور معمول همراه با بسته‌بندی میلگردها پلاک شامل مشخصات میلگرد را ضمیمه می‌کنند.

مشخصات میلگردهای فولادی مطابق استاندارد ملّی ایران به شماره ۳۱۳۲ تعیین می‌گردد. جهت تولید میلگردهای ساده و آج‌دار، استفاده از مقاطع فولادی مانند تیرآهن، ریل راه‌آهن، ورق و ضایعات آنها مجاز نمی‌باشد. همچنین تولید میلگرد از هر نوع ماده اولیه که سوابق و ماهیت مواد آن مشخص نباشد، مجاز نیست.

۱-۳-۵ فولاد به کار رفته در اتصالات پیچ و مهره‌ای

امروزه استفاده از سازه‌های پیچ و مهره‌ای در صنعت به نحو چشمگیری افزایش یافته به طوری که در گذشته فقط سوله های صنعتی با استفاده از سازه‌های پیچ و مهره‌ای ساخته می شدند، ولی اکنون کاربرد این سازه ها در ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری که در شهرها نیز ساخته می‌شوند با رشد چشمگیری روبرو بوده است. از مهمترین دلایل استفاده از سازه‌های پیچ و مهره‌ای، عدم نیاز به جوشکاری در زمان مونتاژ نهایی سازه و همچنین سرعت بیشتر در مرحله اجرا نسبت به سازه‌های دیگر می‌باشد. اجزاء فولادی اتصالات پیچ و مهره‌ای شامل پیچ، مهره و واشر می باشند.[۱]

[۱] جزئیات تفصیلی مرتبط با اتصالات پیچ و مهره ای در فصل ** ارائه شده است.

بر طبق ضوابط ASTM از فولاد A307 که نوعی فولاد کم‌کربن است برای ساخت پیچ‌های ساده و سیاه استفاده می‌کنند که مقاومت کششی F_u بین ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع دارد. از پیچ‌های ساده در اتصالات موقت و کارهایی که به دقت کم نیاز است، استفاده می‌شود.

پیچ‌های با مقاومت بالای A325 را از فولاد با کربن متوسط می‌سازند که تحت عملیات حرارتی تبرید و بازپخت قرار گرفته‌باشد. مقاومت کششی F_u این نوع پیچ‌ها از ۷۳۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (برای پیچ‌های 1⅛ اینچ تا 1 ½ اینچ) تا۸۳۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (برای پیچ‌های 1 ½ اینچ الی 1 اینچ) تغییر می‌کند.

پیچ‌های با مقاومت بالای A449 که تحت عملیات حرارتی و تبرید و بازپخت تهیه می‌شوند، تنش تسلیم و مقاومت کششی مشابه A325 دارند.

فولاد پیچ‌های A490 حداکثر دارای ۰٫۵۳ درصد کربن بوده و مقدار فلزات آلیاژی آنها همانند فولاد A514 است. تنش تسلیم این پیچ‌ها در کرنش۰٫۲ درصد تعیین می‌شود که برای پیچ‌های قطورتر از 2 ½ اینچ برابر ۸۰۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و برای پیچ‌های با قطر کمتر از 2 ½ اینچ برابر ۹۰۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است.

نوع پیچ	ISIRI 2874 EN-ISO 898	ASTM	تنش تسلیم مشخصه (F_y) (MPa)	تنش کششی نهایی (F_u) (MPa)	کرنش نهایی (ε_u) (%)
پیچ‌های معمولی	4.6	A307	240	400	22
	4.8	—	320	420	14
	5.6	—	300	500	20
	5.8	—	400	520	10
	6.8	—	480	600	8
پیچ‌های پرمقاومت	8.8	A325 F1852	کاربرد ندارد	800	12
	10.9	A490 F2280	کاربرد ندارد	1000	9
	12.9	—	کاربرد ندارد	1200	8

شکل ۱-۱۲ مشخصات مکانیکی پیچ‌ها

۱-۳-۶ میلگرد و بولت

در ساخت قطعات بتن مسلح از میلگرد و بولت استفاده می‌شود که انواع و مشخصات فنی آنها در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ذکر گردیده‌است. با پیشرفت فناوری ساخت فولاد، میلگردهایی با تنش تسلیم بالا در حال تولید هستند. چنانچه ذکر شد، یکی از روشهای دسترسی به مقاومت بیشتر در فولاد، افزایش درصد کربن فولاد است. روش دیگر، استفاده از عملیات حرارتی برای افزایش

مقاومت فولاد می‌باشد[۱]. در حال حاضر میلگردهای از نوع A-IV با تنش تسلیم ۵۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و نوع A-V با تنش تسلیم بیش از ۸۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع تولید شده‌اند که پس از بررسی رفتار و تعیین ضوابط مناسب برای آنها، به مرور در آئین‌نامه‌های مرتبط قرار خواهند گرفت.

۱-۳-۷ فولاد الکترود

در روش متداول جوشکاری در صنعت ساختمان‌سازی، برای اتصال دو قطعه، از الکترود فولادی استفاده می‌شود[۲]. از فولاد الکترود در جوشکاری برای اتصال دو قطعه استفاده می‌کنند. الکترودهای مصرفی که بر اساس ضوابط AWS مشخص شده‌اند، با علائم E60xx, E70xx, E80xx, E90xx, E100xx, E110xx معرفی می‌شوند.

حرف E به معنی الکترود بوده و دو رقم اول بیان کننده مقاومت کششی فولاد الکترود برحسب ksi است و دو رقم بعدی که با xx مشخص شده‌اند، بیان کننده گروه و وضعیت مصرفی الکترود هستند. با ضرب عدد ۷۰ در مقاومت کششی بر حسب ksi مقدار مقاومت کششی فولاد بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به دست می‌آید. نمونه الکترود E6013 که بیشترین کاربرد را در ساختمان‌سازی دارد، در شکل ۱-۱۳ دیده می‌شود.

شکل ۱-۱۳ نمونه الکترود E6013

کرنش نهایی (ε_u) (%)	تنش کششی نهائی مغزهٔ الکترود (F_{ue}) (MPa)	AWS A5.1M	AWS A5.1	EN-ISO 2560	ISIRI 871
25	430	—	—	—	E-1
22	430	E43	E60	E43	E-2
18	490	E49	E70	E49	E-3
18	510	—	—	—	E-4
22	550	E55	E80	E55	E-5

شکل ۱-۱۴ مشخصات مکانیکی فولاد مغزه رده‌های اصلی الکترود جوشکاری

[۱] تکنولوژی Termex

[۲] جزئیات تفصیلی در مورد روش های جوشکاری، ماشین آلات و الکترودهای مرتبط، در فصل مربوطه ارائه شده است.

۱-۳-۸ مصالح مستعمل

بکار بردن فولادهای مصرف شده (مستعمل) باید با اجازه ناظر و بعد از انجام آزمایش‌های لازم (بند ۹-۳-۱) باشد. درهرصورت شکل ظاهری قطعات فولادی مصرفی باید به گونه‌ای باشد که معایبی که به مقاومت ویا شکل ظاهری قطعه لطمه می‌زند، در آن دیده نشود. اجرای ضوابط مرتبط با آماده‌سازی قطعه فولادی مانند تمیزکاری و رنگ‌آمیزی، در مورد مصالح مستعمل نیز الزامی است.

۱-۳-۹ کنترل و نظارت بر تهیه مصالح فولادی

هر گاه مهندس ناظر از مشخصات فولادهای واردشده به کارخانه یا کارگاه اطمینان نداشته باشد، می‌تواند از هر ۱۰ تن نیمرخ فولادی، نسبت به انتخاب نمونه‌های اتفاقی و تقاضای انجام آزمایش‌های زیر بر اساس استانداردهای ملّی و یا ISO اقدام نماید.

- آزمایش مقاومت کششی با اندازه‌گیری تغییرشکل نسبی
- آزمایش شارپی روی نمونه زخم‌دار
- آزمایش خمش سرد
- آزمایش متالوگرافی و تعیین ترکیب شیمیایی

کارخانه سازنده باید با عرضه شماره و عنوان مصالح، مشخصات فنی مربوطه طبق مدارک رسمی و همچنین گزارش آزمایش‌های مصالح، ثابت کند که مصالح مورداستفاده مطابق با مشخصات فنی ارائه شده در نقشه‌های محاسباتی می‌باشد.

۱-۴ مشخصات فنی فولاد

در این بخش، مشخصات اصلی فولاد که در مهندسی عمران بیشتر کاربرد دارند، معرفی می‌گردند. در مرحله تهیه مصالح، مشخصات فولاد باید با استانداردهای ملی ایران مطابقت داشته باشد و در صورت عدم وجود استاندارد داخلی، باید یکی از استانداردهای معتبر بین‌المللی (ترجیحاً استاندارد ISO) مورداستفاده قرار گیرند. در مبحث دهم،[۱] مشخصات انواع فولادهای ساختمانی مورد تائید، در جدول‌هایی ارائه شده‌است[۲] و در جدول ۱-۳ مقادیر عددی برخی از مشخصات فولاد ارائه شده‌است.

نمودار تنش-کرنش ایده آل فولاد تحت اثر بار استاتیکی کششی، در شکل ۱-۱۶ نشان داده‌شده‌است. نمودار تنش-کرنش فولاد تحت بار فشاری، مشابه نمودار کششی بوده و به همین دلیل معمولاً در کتب فنی، فقط نمودار کششی ترسیم می‌گردد. لازم به ذکر است نمودار تنش-کرنش مواد، به طور کلی دارای شکلهای مختلفی در نواحی کششی و فشاری است (مانند بتن) و جهت بررسی آن مواد، بهتر است نمودار به‌صورت کامل ترسیم شود. بیشتر مشخصات فنی فولاد در نمودار تنش-کرنش قابل تشخیص بوده و لذا توصیه می‌شود جهت آشنایی با مفهوم هر یک از مشخصات، به نمودار تنش-کرنش نیز توجه خاص مبذول گردد.

در اثر اعمال حرارت، بارهای استاتیکی و دینامیکی و موارد دیگر، ممکن است مشخصات مصالح فولادی تغییر کرده و رفتار جدیدی نمایان گردد. اثر برخی عوامل مهم تاثیرگذار بر رفتار فولاد در بخش‌های مربوطه ذکر می‌گردد.

---

[۱] در سراسر این کتاب، منظور از مبحث دهم، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران است.

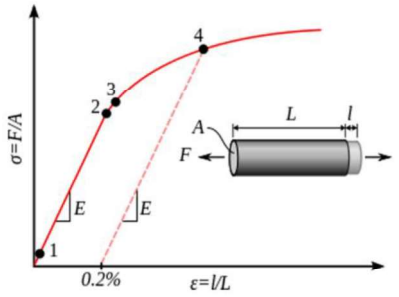
[۲] مبحث دهم بند ۱۰-۱-۴-۱

۱-۴-۱ رفتار ارتجاعی (الاستیک)[1] و رفتار غیرارتجاعی (پلاستیک)[2]

چنانچه با اعمال بار، تغییرشکلی در ماده حاصل شود و با برداشتن بار، ماده تغییرشکل خود از دست داده و به حالت اولیه باز گردد، ماده دارای «رفتار ارتجاعی» یا برگشت‌پذیر است. این رفتار در ناحیه اول منحنی تنش-کرنش (خط ۱-۲ در شکل ۱-۱۵) مشاهده می‌شود و به همین دلیل، آن را «ناحیه ارتجاعی» می نامند. از ضرایبی که نشانگر خواص ماده در این وضعیت هستند می‌توان به مدول یانگ[3]، مدول برشی[4] و مدول باک (یا مدول بالک)[5] اشاره نمود.

در اکثر مواد مانند فولاد، با افزایش بارگذاری، ماده دیگر دارای رفتار ارتجاعی نخواهد بود. در وضعیت جدید که «رفتار غیرارتجاعی» یا «رفتار پلاستیک» نامیده می‌شود (خط ۳-۴ در شکل ۱-۱۵)، پس از باربرداری، مقداری از تغییرشکل اولیه بازگشته و مقداری آن به‌صورت «تغییرشکل ماندگار» در ماده بجای می‌ماند (فاصله ۱-۵ در شکل ۱-۱۵).

ناحیه باربرداری (خط ۴-۵ در شکل ۱-۱۵) معمولاً شیبی برابر با شیب خط ناحیه ارتجاعی دارد.

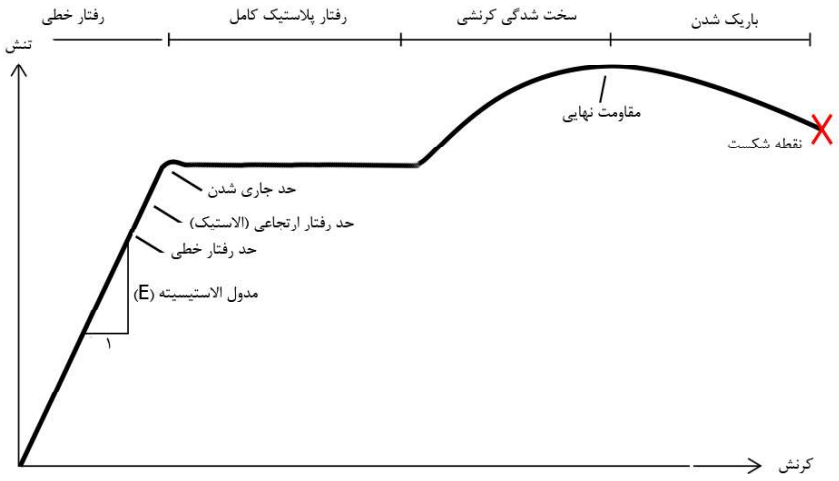


شکل ۱-۱۵ رفتار ارتجاعی و غیرارتجاعی در منحنی تنش کرنش ماده

۱-۴-۲ رفتار خطی و رفتار غیرخطی فولاد

منظور از رفتار خطی[6] و یا غیرخطی[7]، رابطه میان تنش و کرنش مصالح است. چنانچه رابطه میان آن دو خطی باشد، رفتار مصالح خطی خواهد بود. در حالت غیرخطی، میان تنش و کرنش رابطه خطی وجود ندارد.

[1] Elasticity or elastic behavior
[2] Plasticity or plastic behavior
[3] Young's modulus
[4] shear modulus
[5] bulk modulus
[6] Linear behavior
[7] Nonlinear behavior



شکل ۱-۱۶ نمودار تنش-کرنش فولاد[۱]

با افزایش بار در ناحیه ارتجاعی، مرحله‌ای فرا می‌رسد که با افزایش ناچیز تنش، کرنش به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. در این ناحیه نمودار تقریباً به حالت افقی در می‌آید.

۱-۴-۳ مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته (E)، مدول یانگ[۲] یا ضریب ارتجاعی، به نسبت تنش به کرنش ماده در محدوده کمتر از تنش تسلیم گفته می‌شود. در این حالت قانون هوک صادق بوده و مدول الاستیک ثابت است. مقدار این ضریب برای فولادهای ساختمانی معمولا در محدوده $\mathbf{2.0 * 10^6 \frac{Kg}{cm^2}}$ تا $\mathbf{2.1 * 10^6 \frac{Kg}{cm^2}}$ می‌باشد. طبق ضوابط آیین‌نامه، مدول الاستیسیته برای مصالح فولادی برابر $(\boldsymbol{E = 200GPa = 2.04 * 10^6 \frac{Kg}{cm^2} = 2040 \frac{ton}{cm^2}})$ می‌باشد.[۳] همچنین مدول الاستیسیته برای بتن‌های با جرم مخصوص γ_c در محدوده ۱۵ تا ۲۵ کیلونیوتن بر مترمکعب، از رابطه $E_c = \left(3300\sqrt{f_c} + 6900\right)\left(\frac{\gamma_c}{23}\right)^{1.5}$ تعیین می‌گردد[۴]. هرچه فولاد نرم‌تر باشد، مدول الاستیسیته کمتر است و شیب کاهش می‌یابد. از طرف دیگر هرچه فولاد سخت‌تر باشد، مدول الاستیسیته افزایش یافته و شیب ناحیه ارتجاعی بیشتر می‌شود.

---

[۱] تنش ترسیم شده اصطلاحا تنش مهندسی engineering stress نام دارد که کاهش سطح مقطع در نواحی پلاستیک، در محاسبه آن (بار تقسیم بر سطح مقطع) لحاظ نمی شود. در مقابل آن تنش واقعی true stress است که کاهش سطح مقطع در آن لحاظ می شود. منحنی تنش واقعی بالاتر از تنش مهندسی قرار می گیرد و در ناحیه باریک شدن، تنش واقعی کاهش نمی یابد.

[۲] Young's modulus

[۳] مبحث دهم بند ۱۰-۱-۴-۲

[۴] مبحث نهم بند ۹-۱۳-۷-۱

۱-۴-۴ ضریب پواسون

به نسبت کرنش جانبی (عرضی) به کرنش محوری (طولی)، نسبت یا ضریب پواسون گفته می‌شود. ضریب پواسون با حرف یونانی υ نمایش داده شده و مقدار آن با رابطه $\upsilon = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{axial}}$ تعریف می‌شود که در آن، ε_{trans}کرنش جانبی و ε_{axial}کرنش محوری ماده است. از آنجا که در اکثر مواد، کرنش جانبی و محوری دارای علامت‌های مختلف هستند، با منظور کردن علامت منفی، ضریب پواسون عددی مثبت به دست خواهد آمد. طبق ضوابط مبحث دهم، ضریب پواسون مصالح فولادی برابر $\upsilon = 0.3$ در نظر گرفته می‌شود.[۱] همچنین طبق ضوابط مبحث نهم، ضریب پواسون برای بتن‌های معمولی برابر $\upsilon = 0.15$ و برای بتن با مقاومت بالا، برابر $\upsilon = 0.2$ می‌باشد.

۱-۴-۵ تنش تسلیم یا تنش جاری‌شدن (f_y) و کرنش تسلیم (ϵ_y)

از مهمترین مشخصات فولاد مقدار تنش تسلیم یا تنش جاری‌شدن آن است که باتوجه‌به نمودار تنش-کرنش و توسط آزمایش کششی به دست می‌آید و با نماد f_y نمایش داده می‌شود. در اغلب فولادهای متعارف ساختمانی از جمله فولاد نرمه، تنش تسلیم به تنشی اطلاق می‌شود که مرزی بین عملکرد ارتجاعی و خمیری فولاد را مشخص می‌کند و در آن فولاد از ناحیه خطی وارد ناحیه خمیری می‌شود. به کرنش متناظر با تنش تسلیم ϵ_y، کرنش تسلیم یا کرنش شروع ناحیه پلاستیک گفته می‌شود. این تنش در فولادهای پرمقاومت، تنشی است که متناظر با مقدار معینی کرنش (معمولاً ۲ درصد) باشد.

۱-۴-۶ تنش‌نهایی یا تنش گسیختگی (f_u) و کرنش گسیختگی (ϵ_u)

تنش‌نهایی فولاد است که با نماد f_u نمایش داده می‌شود، تنشی است که در آن، فولاد گسیخته می‌شود. این تنش و کرنش متناظر آن یعنی کرنش گسیختگی (ϵ_u) در انتهای منحنی تنش-کرنش قابل مشاهده می‌باشد.

۱-۴-۷ ناحیه پلاستیک یا خمیری

طول ناحیه خمیری حدود ۱۵ تا ۲۰ برابر کرنش نظیر ناحیه ارتجاعی است که به آن «ناحیه پلاستیک» گفته می‌شود. این ناحیه بیان کننده خاصیت شکل‌پذیری فولاد بوده و عامل مهمی در طراحی پلاستیک سازه است.

۱-۴-۸ ناحیه سخت شدگی مجدد

در انتهای ناحیه پلاستیک، تنش مجددا با افزایش کرنش امّا با شیب به مراتب کمتر از ناحیه الاستیک (ارتجاعی) ازدیاد پیدا می‌کند که به این رفتار، «سخت‌شدگی مجدد» می‌گویند. مدول الاستیسیته فولاد را در ابتدای این ناحیه با E_{st} نمایش می‌دهند که به‌صورت تقریبی در رابطه $E_{st} = \frac{E}{33}$ صدق می کند.

[۱] مبحث دهم

با افزایش تنش در ناحیه سخت‌شدگی مجدد، تنش به مقدار نهایی خود f_u می‌رسد و بعد از این مرحله، کاهش موضعی زیادی در مقطع عرضی رخ می‌دهد. در ادامه ظرفیت نمونه کاهش می‌یابد تا بالاخره گسیختگی کششی اتفاق می‌افتد. کرنش متناظر با شروع ناحیه سخت‌شدگی مجدد، با نماد ε_{st} نمایش داده می‌شود که در واقع بیانگر کرنش در تنش‌نهایی یا کرنش در انتهای ناحیه سخت‌شدگی است.

۱-۴-۹ ضریب فنریت و ضریب طاقت

باتوجه‌به علم مکانیک جامدات، سطح زیر نمودار تنش-کرنش معرف انرژی ذخیره شده در واحد حجم یک عضو تحت نیروی محوری است. در ناحیه الاستیک، پس از باربرداری، کلیه تغییرشکل‌ها و کرنش‌ها حذف می‌شوند و لذا میزان انرژی جذب شده قابل برگشت می‌باشد. به سطح زیر نمودار تنش-کرنش فولاد در ناحیه الاستیک «**ضریب فنریت**» و به سطح زیر نمودار تنش-کرنش در ناحیه پلاستیک «**ضریب طاقت**» گفته می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر جذب انرژی بالاتری برای فولاد در ناحیه الاستیک مد نظر باشد، از فولاد با ضریب فنریت بالاتر و اگر جذب انرژی بالاتری برای فولاد در ناحیه پلاستیک مد نظر باشد، از فولاد با ضریب طاقت بالاتر استفاده می‌شود. مقدار ضریب فنریت و ضریب طاقت، برای انواع فولاد در جدول ۱-۳ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱-۳ برخی مشخصات مکانیکی در انواع فولاد

نوع فولاد	تنش تسلیم $(F_y)kg/cm^2$	ضریب فنریت $kg\text{-}cm/cm^3$	ضریب طاقت $kg\text{-}cm/cm^3$
فولاد نرمهٔ معمولی A36	۲۵۲۰	۱/۵۴	۸۴۰
فولاد پرمقاومت A441	۳۵۰۰	۳/۰۱	۱۰۵۰
فولاد خشکه A541	۷۰۰۰	۱۱/۹	۱۳۳۰

۱-۴-۱۰ شکل‌پذیری (μ)

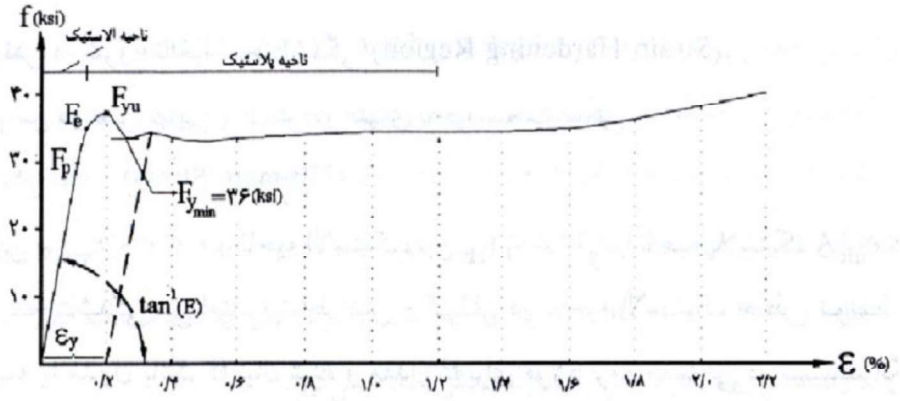
یکی دیگر از خواص مهم فولاد، قابلیت شکل‌پذیری آن است. به نسبت کرنش نهایی به کرنش شروع ناحیه پلاستیک، «**ضریب شکل‌پذیری**» گویند که به‌صورت رابطه $\mu = \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y}$ بیان می‌شود. هرچه دامنه خمیری کمتر باشد، شکل‌پذیری فولاد کمتر است که به آن رفتار ترد می‌گویند.

۱-۴-۱۱ چکش خواری (Ψ)

به نسبت کرنش نظیر نقطه شروع شدن سخت شدگی کرنشی به کرنش نظیر نقطه جاری‌شدن فولاد، «**ضریب چکش خواری**» فولاد (Ψ) گفته می‌شود. این نسبت با رابطه $\Psi = \frac{\varepsilon_{sh}}{\varepsilon_y}$ محاسبه می‌گردد و با افزایش قابلیت چکش خواری فولاد، این نسبت افزایش می‌یابد.

۱-۴-۱۲ فرم پذیری، انعطاف پذیری و شکل‌پذیری

در ادبیات مهندسی سه عبارت زیر به هم نزدیک بوده و ممکن است به اشتباه برداشت و یا مورداستفاده قرار گیرد. «**فرم‌پذیری**» قابلیت فرم دادن و شکل دادن به ماده است (بتن تازه، ماده فرم پذیری است). «**انعطاف‌پذیری**» معادل آن است که ماده تحت اثر بار، توانایی تحمل کرنش های زیادی را داشته باشد. کرنش نهایی ماده با نماد ε_u تعریف می‌شود و به‌عنوان مثال، فولاد ماده ای انعطاف پذیر ولی شیشه ماده ای ترد است. «**شکل‌پذیری**» متناظر با قابلیت استهلاک انرژی و رفتارهای غیرخطی ماده است. این مشخصه، میزان قابلیت ورود سازه را به ناحیه غیر ارتجاعی، از طریق تغییر شکلهای غیرارتجاعی نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۷ نمودار تنش کرنش فولاد- ناحیه پلاستیک

f_P حد تناسب تنش[1] که رفتار سازه تا این نقطه به‌صورت الاستیک خطی بوده و از قانون هوک تبعیت می کند.

f_E حد الاستیک تنش[2] که رفتار سازه تا این نقطه به‌صورت الاستیک (خطی و یا غیرخطی) است.

f_{yu} حد بالایی تسلیم

f_y حد پایینی تسلیم که عمدتا مشخصه اصلی فولاد را بیان می کند و ضوابط آیین نامه های طراحی معمولا بر اساس مقدار این تنش استوار است.

ε_y کرنش در شروع ناحیه پلاستیک

ε_{sh} کرنش در شروع ناحیه سخت شدگی[3]

ε_{ult} کرنش نهایی در انتهای ناحیه سخت شدگی

f_{ult} تنش‌نهایی[4]

۱-۴-۱۳ کرنش سختی[5]، کار سختی[6] یا کار سرد[7]

به عملیاتی که در دمای محیط و به منظور تغییر مشخصات مکانیکی ماده انجام می گیرد، کرنش سختی، سخت شدگی کرنشی، کار سختی، کار سرد، شکل دهی سرد و یا سردکاری می‌گویند. این عملیات با ایجاد کرنش ماندگار[8] (در ناحیه پلاستیک) و تغییر آرایش کریستال های ماده همراه است. جهت تشریح کار سرد در آزمایش کشش فولاد، فرض می‌شود بار کششی بر روی نمونه اعمال شده و سپس باربرداری انجام می‌شود. در این صورت، باتوجه‌به میزان بارگذاری و یا باتوجه‌به زمان استراحت، نمونه دارای رفتارهای متفاوتی خواهد بود.

[1] Proportional Limit
[2] Elastic Limit
[3] Strain Hardening Region
[4] Ultimate Stress
[5] Strain hardening
[6] Work Hardening
[7] Cold-working
[8] Residual strain

۱-۴-۱۳-۱ تاثیر میزان بارگذاری در رفتار

باتوجه‌به میزان بارگذاری، نمونه دارای رفتارهای متفاوتی خواهد بود.

a- بارگذاری در ناحیه الاستیک

چنانچه بارگذاری در ناحیه الاستیک انجام شود، کرنش ایجاد شده پس از باربرداری خنثی شده و کرنش نهایی صفر خواهد بود. در این وضعیت، ماده قابلیت بارگذاری مجدد را داشته و رفتار آن دچار تغییر نمی‌گردد.

b- بارگذاری تا ناحیه پلاستیک

چنانچه بارگذاری تا ناحیه پلاستیک شود ادامه یابد، کرنش منفی ناشی از باربرداری کمتر از کرنش بارگذاری بوده و تفاوت آنها به‌صورت کرنش ماندگار، در نمونه باقی می‌ماند.

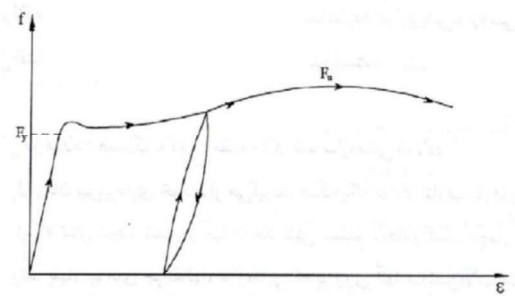
۱-۴-۱۳-۲ تاثیر زمان استراحت در رفتار

باتوجه‌به زمان استراحت، نمونه دارای رفتارهای متفاوتی خواهد بود.

به زمان بین باربرداری و بارگذاری مجدد نمونه، «**زمان استراحت**» می‌گویند که مقدار آن بر حسب نوع فولاد و شرایط بارگذاری، در محدوده ۸ تا ۲۴ ساعت است. چنانچه بارگذاری و باربرداری در ناحیه پلاستیک انجام شده باشد، رفتار نمونه در بارگذاری بعدی بر اساس زمان استراحت متفاوت خواهد بود.

a- بارگذاری پس از استراحتی کوتاه

چنانچه بارگذاری بعدی پس از استراحت کوتاه انجام شود، رفتار اولیه ماده (مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی) تغییر نمی کند ولی شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. این وضعیت در شکل ۱-۱۸ نشان داده‌شده‌است.



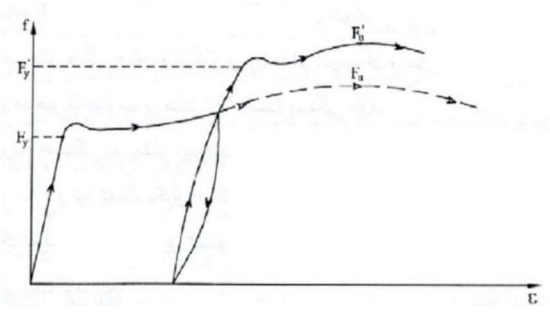
شکل ۱-۱۸ استراحت کوتاه

b- بارگذاری پس از استراحت طولانی

چنانچه بارگذاری بعدی پس از استراحت طولانی انجام شود، مشخصات فولاد تغییر خواهد کرد، به نحوی که مطابق شکل ۱-۱۹ تنش تسلیم و تنش‌نهایی افزایش یافته و طول ناحیه خمیری آن کاهش می‌یابد. از کاربردهای عملیات سرد می‌توان به ساخت کابلهای کششی پرمقاومت فولادی اشاره نمود. تارهای کابل اصلی، حاصل بافته شدن تارهای نازک فولاد است که بر روی آنها کار سرد انجام شده‌است.

در تولید نیمرخهایی که خم آنها توسط پرس انجام می‌شود، به دلیل کار سرد انجام شده، فولاد ناحیه خم دارای تنش تسلیم بالاتر و شکل‌پذیری کمتری می‌باشد. برخی آیین‌نامه‌ها باتوجه‌به این موضوع، افزایش مقدار تنش را در این ناحیه مجاز می دانند.

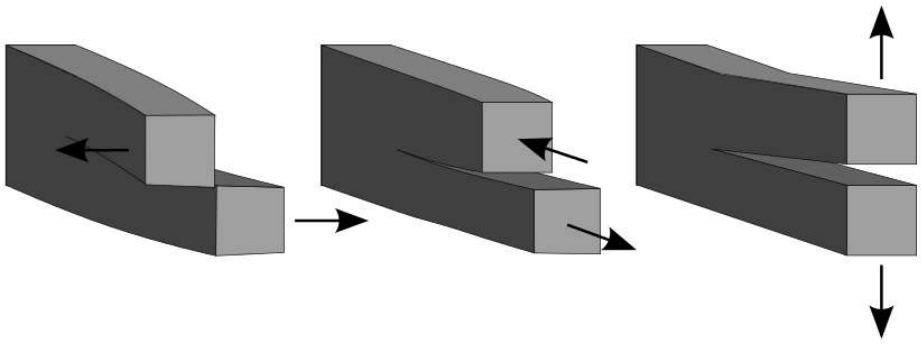
برای بازگشتن به خواص اولیه فولاد، لازم است طی عملیات بازپخت، فولاد به درجه حرارتی بالاتر از درجه حرارت بحرانی رسانده شود. سپس خنک شدن آن به کندی انجام شود تا کریستالیزاسیون ماده مطابق حالت اولیه صورت گیرد.



شکل ۱-۱۹ استراحت طولانی

۱-۴-۱۴ شکست فولاد

شکست فولاد بر اثر بار وارده، باتوجه‌به مدت زمان بارگذاری، به دو صورت شکل پذیر و ترد صورت می گیرد. از دیدگاه ماهیت تنش، شکست فولاد از طریق تنش کششی، تنش برشی داخل صفحه و تنش برشی عمود بر صفحه امکان پذیر است که ترک متناظر را مطابق شکل ۱-۲۰ با نام ترک کششی، ترک برشی داخل صفحه و ترک برشی عمود بر صفحه نامگذاری می‌کنند.



الف- ترک کششی **ب- ترک برشی داخل صفحه** **پ- ترک برشی عود بر صفحه**

شکل ۱-۲۰ انواع ترک باتوجه‌به تنش موثر در ایجاد شکست

a- شکست شکل پذیر[1]

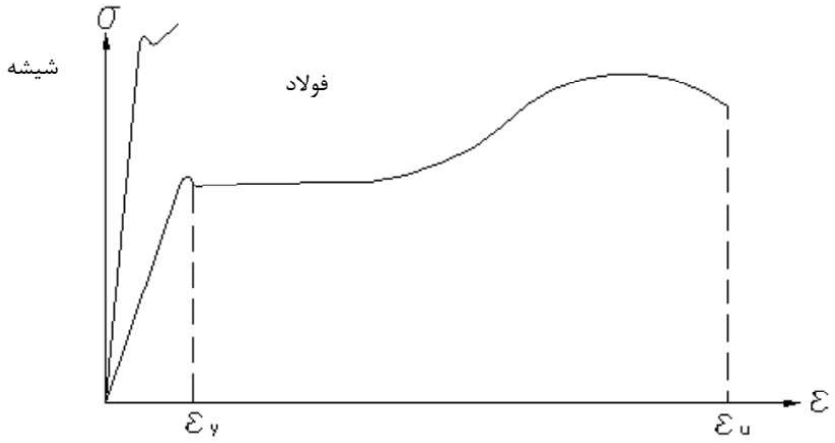
چنانچه بار کششی در دمای متعارف و به‌صورت تدریجی به نمونه وارد شود، فولاد وارد مرحله پلاستیک شده و سطح مقطع آن به مرور کاهش می‌یابد[2]. نهایتا مقدار تنش موجود در سطح مقطع از حد مقاومت فولاد بیشتر شده و نمونه گسیخته می‌شود.

[1] Ductile fracture

2 Necking

b- شکست ترد[1]

در شرایطی مانند بارگذاری در دمای کم و یا به‌صورت سریع، شکست نمونه قبل از هر گونه تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد که به آن شکست ترد یا تردشکنی می‌گویند. فولاد در درجه حرارت معمولی ماده ای انعطاف پذیر است ولی در دمای پایین و یا تحت تاثیر تنش های چند محوره، مطابق شکل ۱-۲۱، به ماده ای ترد و شکننده (مانند شیشه) تبدیل می‌شود.



شکل ۱-۲۱ نمودار تنش-کرنش برای مصالح فولاد (شکل پذیر) و شیشه (ترد)

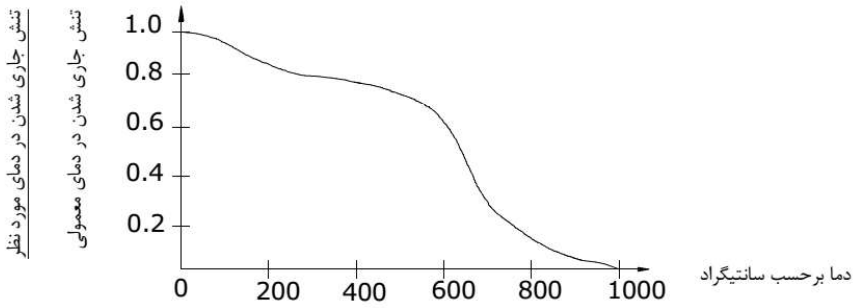
از عوامل مؤثر در ایجاد و یا تسریع تردشکنی، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

1 Brittle Fracture

- درجه حرارت: از دمای ۱۰- درجه سانتیگراد، شکل‌پذیری فولاد کاهش می‌یابد و در دمای ۴۵- درجه سانتیگراد، فولاد نرمه به فولادی ترد و شکننده تبدیل می‌شود (دمای تردشکنی بیشتر آلیاژها تا ۶۰- درجه سانتیگراد است). هرچه دما کمتر باشد، میزان تردشکنی بیشتر خواهد بود.
- سرعت در بارگذاری (بار ضربه‌ای).
- بارگذاری دینامیکی (رفت و برگشتی).
- نوع آلیاژ فولاد.
- هندسه اتصال و نوع اجرا.
- ممانعت از تغییر شکل قطعه.
- ضخامت قطعه (با افزایش ضخامت، احتمال تردشکنی افزایش می‌یابد).
- وجود ترکهای مویین، شیار یا زخم در قطعات فولادی (در اثر سرد شدن سریع قطعه حرارت دیده و یا جوشکاری شده، ترک های مویین در قطعه به وجود می آیند).
- وجود تنش کششی در قطعه.
- وجود تنش‌های سه محوری، ناشی از شکل عضو، نوع اتصال و یا ناشی از عملیات حرارتی و جوشکاری.

۱-۴-۱۵ عملیات حرارتی

فولاد ماده ای است که به حرارت حساس بوده و مشخصات مکانیکی آن در مقابل حرارت تضعیف می‌شود. بررسی رفتار فولاد در مقابل تغییرات حرارت جوی نشان داده است که تاثیر چندانی ندارد و این اثرات در تغییرات شدید مانند هنگام جوشکاری و آتش‌سوزی مطرح است.



شکل ۱-۲۲ تغییر تنش تسلیم در برابر دما

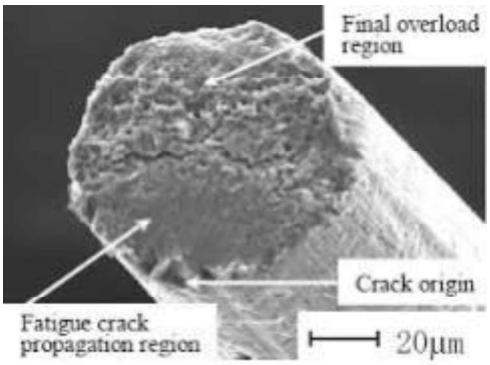
فولاد در دماهای بالا به‌صورت خمیری در می‌آید و لذا مشخصات مقاومتی آن کاهش و تغییرشکل‌ها و کرنش‌های آن افزایش می‌یابد. کاهش مقاومت فولاد در مقابل حرارت، بزرگترین عیب ساختمان‌های فولادی است که در حادثه یازدهم سپتامبر، سبب تخریب برج های دوقلوی آمریکا گردید. برای مقاوم کردن فولاد در برابر حرارت می‌توان از بتن پاشی اطراف اعضاء فولادی، رنگهای مقاوم در برابر حرارت و یا پوشش اعضاء با مواد عایق معدنی مانند کناف استفاده نمود.

با افزایش درجه حرارت، ضریب ارتجاعی فولاد، تنش تسلیم و تنش‌نهایی کاهش می‌یابد که برای رفع این نقیصه از عملیات بتن باشی و یا از رنگهای ضد حریق استفاده می‌شود. استفاده از پوشش های ضد حریق در حال حاظر برای اسکلت های فلزی بلند مرتبه الزامی است.

در عمل تبرید، فولاد را حداقل تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده سپس آن را یکباره با استفاده از آب یا روغن تا حدود ۱۹۰ درجه سانتیگراد خنک می‌کنند و در عمل با باز پخت این فولاد را دوباره ۶۲۰ درجه سانتیگراد حرارت داده و به‌صورت طبیعی در حرارت محیط خنک می‌کنند. به‌صورت خلاصه می‌توان گفت که تبرید فولاد سبب ایجاد ساختاری بسیار سخت و محکم می‌گردد و حرارت دوباره فولاد (باز پخت) موجب تقلیل مقاومت و سختی آن شده که شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد.

۱-۴-۱۶ خستگی[1]

همانگونه که در بخش های قبل ذکر شد خستگی از ویژگیهای سازه‌های فولادی است که در اثر تکرار مکرر بارگذاری و باربرداری ایجاد می‌شود و به شکل‌گیری ترکهای موضعی کوچک منجر می‌گردد. گستردگی ترکهای خستگی به تدریج به وسیله بارهای مکرر بعدی افزایش می‌یابد تا اینکه بالاخره مقطع عرضی مؤثر آنقدر کاهش می‌یابد که احتمال دارد گسیختگی فاجعه آمیزی رخ دهد. نمونه ای از ترک های ایجاد شده بر اثر خستگی در شکل زیر نشان داده‌شده‌است.

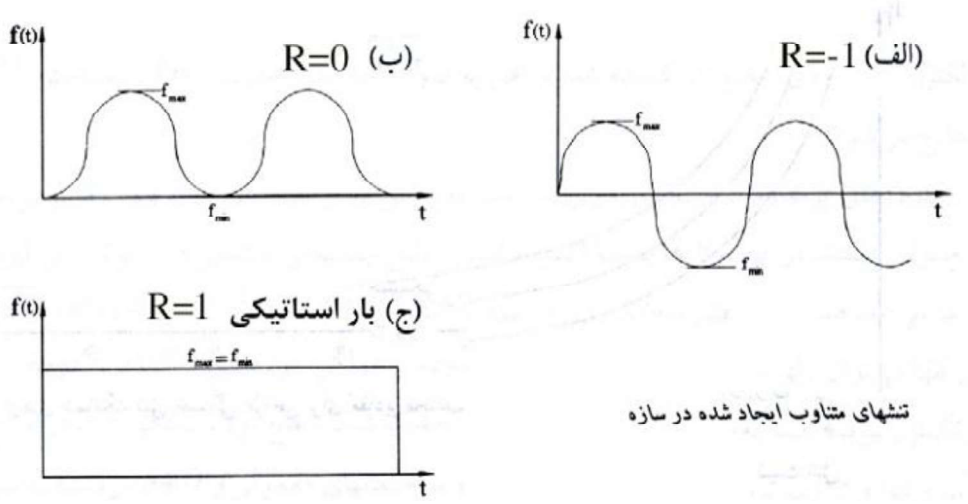


شکل ۱-۲۳ ترک های ناشی از خستگی در فولاد

قطعاتی که تحت بارهای دینامیکی و پیاپی قرار دارند، به مرور زمان خاصیت خود را از دست داده و به عبارتی فولاد خسته می‌شود. به علت خستگی، قطعه مقاومت اولیه خود را از دست داده و تحت تنش‌های به مراتب کوچکتری از تنش‌های اولیه (که قبلاً قطعه به راحتی تحمل می نموده) گسیخته می‌شود. پلها، تیرهای جرثقیل، سازه‌هایی که بر روی آنها ماشین آلات مانند توربین، ژنراتور، کمپرسور نصب شده‌اند، سازه‌هایی که در مجاورت فرودگاه ها قرار گرفته‌اند و سایر سازه‌های مشابه بایستی در مقابل پدیده خستگی کنترل شوند.

چنانچه نیروهای متناوبی که بر سازه وارد می‌شوند، در یک نقطه تنشهایی مطابق شکل ۱-۲۴ ایجاد کنند، تنش‌های حداقل و حداکثر و نسبت آنها قابل تعریف و استفاده خواهند بود.

[1] Fatigue



شکل ۱-۲۴ تنش های متناوب ایجاد شده در سازه

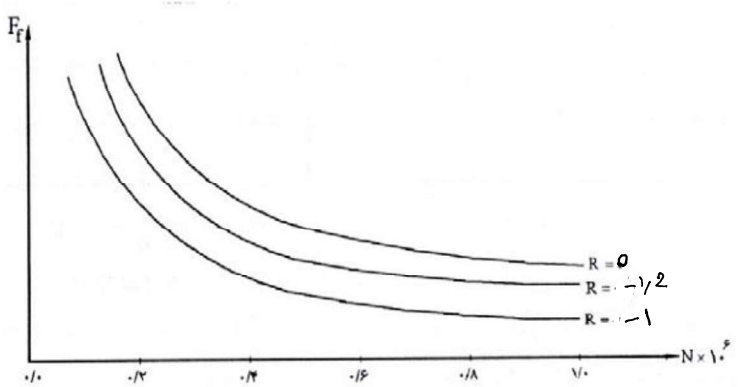
f_{max} تنش حداکثر ایجاد شده در سازه

f_{min} تنش حداقل ایجاد شده در سازه

f_t برابر fmax - fmin تفاوت تنش ایجاد شده در سازه

R برابر fmin/ fmax نسبت تنش های ایجاد شده در سازه (مقدار R برای بارگذاری های قبلی روی آن نشان داده شده بود).

آزمایش‌های مربوط به خستگی معمولاً بر روی نمونه‌های زیادی از یک مصالح با نسبت های مختلف تنش R انجام می گیرد. بارگذاری در تعداد تکرار مختلف نیرو آن قدر ادامه می‌یابد تا قطعه گسیخته شود. با رسم نمودار تنش f بر حسب تعداد تکرار نیرو N (منحنی F-N) که به نمودار خستگی یا نمودار ولر[1] مرسوم است، منحنی های طراحی بر اساس معیار خستگی که ارائه کننده حداکثر تنش مجاز طراحی است، بدست می‌آید. با افزایش تعداد تکرار نیرو (N) تنش مجاز طراحی در معیار خستگی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که تعداد تکرار نیرو در بعضی مواقع به چندین میلیون مرتبه می رسد و معمولاً از منحنی های لگاریتمی استفاده می‌شود. شکل ۱-۲۵ به‌صورت شماتیک منحنی F-N را برای مقادیر مختلف R نمایش می دهد.



شکل ۱-۲۵ نمودار شماتیک تنش خستگی طراحی برای مقادیر مختلف نسبت تنش

[1] Woehler

معمولاً تعداد تکرار نیرو برای تعیین تنش خستگی طراحی در سازه‌های فولادی $N= ۲*۱۰^۶$، در دستگاه های ماشین سازی $N= ۱۰*۱۰^۶$ و برای فلزات سبک نظیر آلومینیوم که در سازه‌های هواپیما و فضایی استفاده می‌شود، $N= ۱۰۰*۱۰^۶$ در نظر گرفته می‌شود.

تنش خستگی طراحی F_f نسبت به مقاومت گسیختگی F_u کمتر بوده و به‌عنوان مثال برای فولاد ST37 با $F_u = 3700$ برابر $F_f = 1500$ و برای فولاد ST52 با $F_u = 5200$ برابر $F_f = 1700$ (در تعداد تکرار زیاد N) خواهد بود.

چون در اغلب موارد، سازه‌هایی که تحت پدیده خستگی قرار می گیرند، عملکردی مناسب تری از آنچه منحنی (F–N) ارائه می کند، از خود نشان می‌دهند. لذا نگرش آیین نامه های جدید طراحی نسبت به پدیده خستگی با آنچه قبلاً بیان شد، متفاوت می‌باشد. در این نحوه برخود پس از ارائه تعریف جامعی از مجموعه بارها و تنش های وارده بر سازه و بارگذاری آن با تعداد دفعات تکرار که بر اساس شواهد و تجربه با استفاده از روش های آماری تعیین می‌شود، نسبت به انجام آزمایش‌های بهره برداری اقدام می‌شود. معمولا در طراحی سازه‌های فولادی گران قیمت مانند هواپیماها و سازه‌های فضایی خاص این روش متداول است و برای اغلب سازه‌های فولادی، ضوابط طراحی هنوز متکی بر نمودارهای F-N است.

در ساختمانها، بار ثقلی متغیر، بار زنده است که به دلیل کم بودن مقدار بار، خستگی ایجاد نمی کند. بار جانبی ناشی از زلزله، در هنگام بروز زلزله به تعداد دفعات کم (بسیار کمتر از مقادیر مربوط به پلها) ولی با مقدار بار قابل توجه، اعمال می‌شود و دیده شده‌است که این نوع بار اعمال شده به سازه، ایجاد خستگی می کند. مشخصات خستگی ایجاد شده تحت این بارگذاری با خستگی پلها متفاوت است و به دلیل تعداد سیکل های کم بارگذاری، با نامهای خستگی کم چرخه و خستگی بسیار کم چرخه نامگذاری شده‌اند.

۱۷-۴-۱ تورق[1]

ساختار درونی چوب مجموعه ای از الیاف به هم فشرده می‌باشد. عمل نورد در فولاد در واقع چنین را در داخل فولاد با شدت کمتری تولید می‌کند. در اتصال دو قطعه در اتصال جوشی فلز جوش در هنگام سرد شدن منقبض می‌شود. اگر این جمع شدگی عمود بر الیاف فرضی فولاد باشد گسیختگی داخلی (جدایی لایه‌ها) در امتداد سطح تماس دو لایه صورت می‌گیرد که به این عمل تورق (لمینیشن) می‌گویند. همچنین تورق یک نوع ترد شکنی نیز می‌باشد. باتوجه‌به این خصلت فولاد در اتصال جوشی دو قطعه بهتر است که تا حد امکان لایه‌های بیشتری در قسمت جوش قرار گیرند. نمونه ای از تورق ناشی از جوشکاری در شکل ۱-۲۶نشان داده‌شده‌است.

شکل ۱-۲۶ تورق ناشی از جوشکاری

[1] Lamination

۱-۴-۱۸ جوش پذیری[1]

جوش پذیری فولاد با افزایش سخت‌شدگی کاهش می‌یابد؛ بنابراین ارزیابی دقیق این موضوع حائز اهمیت می‌باشد. از نظر ارزیابی جوش پذیری نقش عناصر آلیاژی موجود در فولاد را با پارامتری به نام «کربن معادل» می‌سنجند.

«کربن معادل» یعنی اینکه بجای عناصر آلیاژی، فولاد چه مقدار کربن می‌تواند داشته باشد تا همان نقش را در جوش پذیری فولاد داشته باشد. یکی از راه های بررسی جوش پذیری فولاد محاسبه کربن معادل است. فرمول های مختلفی برای کربن معادل ارائه شده‌است که یکی از آنها به‌صورت زیر می‌باشد.

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

این فرمول طبق استاندارد کشور انگلیس (BS 4360) می‌باشد و در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و نشریه ۵۵ نیز آمده است. در این رابطه عناصر کربن C، منگنز Mn، کرم Cr، مولیبدن Mo، وانادیوم V، نیکل Ni و مس Cu موثر هستند و علامت اختصاری هر عنصر، معرف درصد همان عنصر در آنالیز شیمیایی فولاد است.

بدیهی است هر چه مقدار معادل کربن بیشتر باشد، سخت‌شدگی فولاد یا تمایل به تشکیل مارتنزیت بیشتر می‌شود. بدون در نظر گرفتن ضخامت و شکل قطعه، برای جوشکاری موفقیت آمیز باتوجه‌به میزان معادل کربن، بکار بردن توصیه های زیر مفید خواهد بود.

جدول ۱-۴ توصیه هایی بر اساس میزان کربن فولاد

معادل کربن بر حسب درصد	ملاحظات جوشکاری
کمتر از ۰,۴	بدون احتیاط – الکترودهای سلولزی یا روتیلی
۰,۴ تا ۰,۴۸	الکترودهای معمولی با ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه پیش گرمایش الکترود روپوش قلیایی کم هیدروژن بدون پیش گرمایش
۰,۴۸ تا ۰,۵۵	الکترودهای معمولی با ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه پیش گرمایش الکترود روپوش قلیایی کم هیدروژن با ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه پیش گرمایش الکترود اوستنیتی یا روکش قوسی فلزی گازی بدون پیش گرمایش
بیش از ۰,۵۵	الکترود روپوش قلیایی کم هیدروژن با ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه پیش گرمایش الکترود اوستنیتی یا روکش قوسی فلزی گازی بدون پیش گرمایش

طبق مبحث نهم، قابلیت جوش پذیری میلگردها بر اساس کربن معادل تعیین می‌شود. درصورتی‌که کربن معادل از ٪۰,۵۱ کمتر باشد، میلگرد قابل جوشکاری است و هر چه این مقدار کمتر باشد، قابلیت جوش پذیری آن بیشتر است.

[1] Weldability

۱-۵ بارگذاری

در جهان سرمایه‌داری و اقتصادی فعلی که قیمت مصالح و دستمزدها در حال افزایش است، بدست آوردن اقتصادی‌ترین راه حل برای طرح ایمن و بادوام سازه بسیار مهم است. اعضا سازه باید چنان انتخاب گردند و در کنار هم آرایش داده شوند که علاوه بر کارائی مناسب، اقتصادی‌ترین راه حل برای طراحی سازه حاصل شود. بطور کلی در طراحی، اصول زیر بایستی مدنظر قرارگیرد:

- حداقل هزینه
- حداقل وزن سازه
- حداقل زمان ساخت
- حداقل نیروی کار برای ساخت و نصب
- حداکثر بهره دهی برای کارفرما و عملکرد مناسب در طول زمان

اگر چه در ساخت و بهینه کردن رعایت تمام این اصول مشکل است، با اینحال عموماً ضابطه حداقل وزن که منوط به حداقل هزینه می‌شود، ضابطه مناسبی است ولی نباید سایر ضوابط عملی را فراموش نمود. بطور کلی مراحل طراحی یک سازه شامل بارگذاری، تحلیل سازه و سپس طراحی آن می‌باشد.

پس از تهیه نقشه اولیه و تعیین نوع سیستم باربر سازه، بایستی باتوجه‌به نوع و عملکرد سازه، نیروها و بارهای مؤثر به‌صورت کمی و به شکل مناسب باتوجه‌به ترکیب بارهای ارائه شده از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (حداقل بارهای وارده بر ساختمان) برروی سازه اعمال شود. برخی از انواع متداول بارها به شرح زیر می‌باشد:

۱-۵-۱ بار مرده

وزن اسکلت فولادی و همه مواردی که به طور دائم توسط آن حمل می‌شوند، بار مرده را تشکیل می‌دهند که باید در طرح ساختمان در نظر گرفته شوند. جابجایی این بارها نسبت به سازه ممکن نیست و چون جهت و مقدار آنها همواره در محلی معین و در راستای شتاب ثقل است، به آنها بار مرده گفته می‌شود. پوشش سقف، سقفهای معلق، لوله‌ها، کانالهای تهویه هوا، کابلهای برق، وسایل روشنایی و... از جمله عناصری هستند که در طول عمر سازه با آن همراه خواهند بود و از آن جدا نخواهند شد. جهت اطلاع بیشتر به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، مراجعه شود.

بار مرده عبارتست از وزن اجزاء دائمی ساختمان مانند تیر، ستون، دیوار، کف، راه پله، نازک کاری، پوشش و تاسیسات و تجهیزات ثابت[1].

۱-۵-۲ بار زنده (سربار)

بار زنده، باری غیر دائمی است که در حین بهره برداری به سازه وارد می‌شود. بارهای حین ساخت و بارهای محیطی مانند باد، برف، باران، زلزله و سیل جزو بار زنده محسوب نمی‌شوند[2].

بارهای زنده به دو گروه تقسیم می‌شوند:

[1] مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان بند۶-۳-۱

[2] مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان بند ۶-۵-۱-۱

- سربارهای ساکن ولی قابل حرکت مانند اثاثیه منزل، وسایل اداری و... یا بارهای زنده ولی با سرعت کم، مانند وزن اشخاص، حیوانات و... که بارهای ایستا (استاتیک) نامیده می‌شوند.
- سربارهای متحرک با اثر دینامیکی قابل توجه (بارهای ضربه ای) مانند ماشینها، آسانسورها، جرثقیل‌ها و موارد مشابه.

در تحلیل و طراحی سازه‌هایی که بارهای زنده دارای اثر ضربه را تحمل می‌کنند، بارهای یاد شده را باید با ضریب ضربه مناسبی افزایش داد.

برای ضرایب ضربه، در درجه اول اعداد ضربه مربوط به دستگاه بار گذارنده (درصورتی‌که به طور کتبی از طرف سازنده دستگاه موجود باشد) ملاک خواهد بود. درصورتی‌که چنین اعدادی موجود نباشد، باید حداقل افزایش بار زنده، مطابق با مبحث ششم از مجموعه مقررات ملی ساختمان را به‌عنوان ضریب ضربه در نظر گرفت. در موارد ذیل باید ضریب ضربه و اثر دینامیکی بار زنده منظور شود:

- بار تکیه گاه آسانسور
- بار تیرها و اتصالات حامل جرثقیل متحرک بزرگ (ارابه با راننده) و بلند کننده های کوچک (با کابل فرمان دستی).
- بار تکیه گاه ماشینهای دورانی، اعم از اینکه با موتور سر خود و یا محور محرک اتصالی کار کند.
- بار تکیه گاه ماشین‌آلات با حرکت متناوب.
- بار آویزهای کششی که کف و یا بالکن را تحمل می‌کنند.
- بارهای دینامیکی دیگر در صورت وجود.

۱-۵-۳ بار سیل

سیل طرح، سیلابی است که احتمال تجاوز از آن در سال ۱٪ باشد (دوره بازگشت ۱۰۰ سال). به ارتفاع موج این سیل، ارتفاع سیل طرح گفته می‌شود.

سازه باید به گونه ای طرح، اجرا و مهار گردد تا در مقابل شناوری، فرو ریختن و تغییر مکان جانبی دائمی ناشی از بار سیل طرح (مطابق با ترکیب بارها) مقاومت کند. همچنین بار ناشی از ضربه اشیائی که توسط سیل منتقل شده‌اند، به‌عنوان بار ضربه ای محسوب و در نظر گرفته می‌شود[1].

۱-۵-۴ بار برف

بار برف یکی از سربارهای وارده به بام ساختمانها است. بسته به موقعیت جغرافیایی و محل قرارگیری سازه از نظر مقدار ریزش برف، شکل سازه، وزش باد و ... بارهای حاصل از برف بر سازه‌ها تعیین و اعمال می‌شود. بار برف در آیین‌نامه‌ها معمولا به‌صورت درصدی از حداکثر بار برف روی زمین برآورد می‌شود.

در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان(۱۳۹۲)، بار برف بر روی بامها، P_r، را باتوجه‌به شیب و دمای بام، برف‌گیری و اهمیت سازه، برای هر متر مربع تصویر افقی سطح آن از رابطه زیر تعیین می‌کنند.

$$P_r = 0.7 C_s C_t C_e I_s P_g \qquad 1\text{-}1$$

[1] مبحث ششم بخش ۶-۶

P_gبار برف زمین،که برای نقاط مختلف کشور بین ۲۵ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمربع متغیر است.
C_sضریب شیب در بام‌ها
I_s ضریب اهمیت
C_eضریب برف‌گیری
C_tضریب شرایط دمایی

بار برف زمین P_g ، وزن لایه برف بر روی سطح افقی زمین است که احتمال تجاوز از آن در سال ۲٪ باشد (دوره بازگشت ۵۰ سال). بار برف بام P_t ، باتوجه‌به شیب و دمای بام، برف گیری و اهمیت سازه تعیین می‌شود.

۱-۵-۵ بار باران

شدت بارندگی طرح معادل شدت بارندگی با تداوم ۱ ساعت و دوره بازگشت ۱۰۰ سال می‌باشد[1].

عمق آب باران روی بام بر اساس شدت بارندگی، زهکشی بام و انباشتگی آب محاسبه می‌گردد.

۱-۵-۶ بار یخ

بار ناشی از یخ زدگی باران و برف باید در طراحی سازه و اجزاء حساس به یخ در نظر گرفته شود. ضخامت اسمی یخ بر اساس دوره بازگشت ۵۰ سال و با استفاده از مطالعات سازمان هواشناسی کشور و یا مطالعات محلی تعیین می‌گردد. همچنین در محاسبه نیروی باد در حالت وجود یخ، اثر افزایش ابعاد به اندازه ضخامت طراحی یخ باید در نظر گرفته شود[2].

۱-۵-۷ بار باد

بار ناشی از وزش باد، عموماً به‌صورت جانبی و افقی بر سازه اعمال می‌شود. در سازه‌های بلند و سبک، اثرات باد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در کلیه ساختمان‌های متعارف که دارای پلان متقارن و مستطیل شکل هستند، باد سبب فشار در قسمت بادگیر و مکش در پشت بادگیر می‌شود. البته ممکن است سبب مکش یا فشار در پشت بامها نیز شود که در اغلب حالات از اثر عمودی بار باد در مقابل بار برف صرفنظر می‌شود. معمولا جمع اثر جانبی باد به‌صورت یکجا و در سمت بادگیر اعمال می‌شود.

فشار خارجی یا مکش ناشی از باد برروی سطوح ساختمان از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p = I_w q C_e C_g C_p \qquad ۲-۱$$

q فشار مبنای باد است که از ضابطه آیین‌نامه تعیین می‌شود.
C_e ضریب بادگیری
C_g ضریب اثر جهشی
C_p ضریب فشار خارجی که بر مساحت وجه مورد نظر میانگین گیری شده باشد.
I_w ضریب اهمیت برای باد

[1] مبحث ششم بخش ۶-۸
[2] مبحث ششم بخش ۶-۹

سازه و کلیه اجزاء آن باید باتوجه‌به اثر باد طراحی و ساخته شوند. فشار مبنای باد، بر اساس سرعت متوسط ساعتی باد با احتمال تجاوز ۲٪ (دوره بازگشت ۵۰ سال) توسط ضریبی در مجذور سرعت باد تعریف می‌گردد[۱].

۱-۵-۸ بار زلزله

جهت محاسبه بار زلزله و اطلاع از ضوابط طرح لرزه ای به مراجع معتبر مراجعه گردد[۲].

۱-۵-۹ بار انفجار

در صورت نیاز به اعمال بار انفجار، پوسته سازه باید برای فشار از خارج به داخل یا برعکس به مقدار $2.0\frac{KN}{m^2}$ *طرح شوند. در نظر گرفتن بار انفجار برای ساختمان‌های با گروه خطر پذیری یک ضروری است*[۳].

۱-۶ طراحی سازه

معیارهایی که در طراحی یک سازه فولادی بایستی مد نظر قرار گیرند، می‌تواند معیار مقاومت، پایداری، تغییرمکان، رفتار دینامیکی، خستگی و تردشکنی به شرح زیر باشد.

a- معیار مقاومت

یکی از مهمترین معیارهایی است که در طرح سازه بایستی مورد نظر قرارگیرد. معیار مقاومت به دو صورت معیار تسلیم و معیار خمیری می‌تواند مطرح باشد. مطابق این معیار، سازه باید به گونه‌ای طرح شود که در هیچ حالتی تنش‌های آن به تنش‌های حدی و نهائی نرسد.

b- معیار تسلیم

براساس این معیار فرض می‌شود که اگر در یک نقطه از سازه، تنشها به تنش تسلیم فولاد برسند، سازه در آن نقطه مقاومت خود را در برابر تحمل بار اضافی از دست می‌دهد. بنابرین با اعمال یک ضریب اطمینان مناسب و باتوجه‌به رفتار الاستیک فولاد، سازه مورد نظر تحلیل شده و نتایج بدست آمده با مقدار مجاز آن کنترل و اعضای سازه طراحی می‌شوند.

c- معیارخمیری یا پلاستیک شدن

براساس این معیار چنانچه نقطه‌ای از سازه به تنش تسلیم برسد، کل سازه مقاومت خود را از دست نخواهد داد. در این معیار فرض می‌شود که پس از تسلیم شدن نقاطی از سازه، و با افزایش بارها، با انجام تغییرشکل‌هایی در همین نقاط تارهای دیگری نیز به تسلیم برسند تا در کل مقطع این نقاط به تنش تسلیم f_y رسیده و نهایتا در این نقطه مفصلی به نام مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود. بعد از

---

[۱] جهت اطلاع بیشتر به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) مراجعه شود.

[۲] به عنوان مثال، می توان به کتاب «مهندسی زلزله کاربردی»، تالیف نویسنده این کتاب مراجعه نمود.

[۳] مبحث ششم بخش ۶-۱۲

اینکه یک نقطه سازه به مفصل پلاستیک رسید، توزیع مجدد بار به نسبت سختی بین اعضای مختلف سازه صورت می‌گیرد تا در نقاط دیگری نیز مفصل پلاستیک[1] تشکیل شود و در نهایت به انهدام سازه منجر خواهد شد. در این معیار از تمامی مقاومت سازه استفاده شده و در نتیجه طرح اقتصادی‌تری نسبت به معیار تسلیم مورد نظر است.

d- معیار پایداری

ممکن است در بعضی از اعضای سازه یا کل سازه قبل از اینکه تنشها به تنش تسلیم برسد و یا مفاصل پلاستیک تشکیل شود، کمانش یا ناپایداری در سازه اتفاق بیفتد. معیار پایداری به ویژه در سازه‌های فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا به دلیل مقاومت بالای اعضا، مقاطع نسبت به سازه‌های بتنی ظریفتر هستند و امکان ایجاد کمانش کلی یا موضعی و ناپایداری در آنها وجود دارد.

e- معیار تغییرمکان

یکی از معیارها در طراحی سازه، معیار تغییر مکان است. در سازه‌های فولادی به دلیل بالا بودن مقاومت فولاد، عموماً مقاطع ظریف‌تر که حاصل آن کاهش لنگر اینرسی است وجود دارد و این امر نباید باعث افزایش تغییرمکان در اعضا گردد که خود سبب ترک در سقف و دیوار احساس نامطلوب برای ساکنین می‌شود. از این رو در طراحی سازه‌های فولادی که دارای ابعاد کوچک در پلان و ارتفاع زیاد هستند و حرکت جانبی آنها زیاد باشد و نیز در تیرهایی با دهانه بزرگ، معیار تغییر مکان بایستی مورد توجه قرار گرفته و کنترل شود.

f- معیار رفتار دینامیکی

در طراحی سازه‌ها، بارها معمولاً به‌صورت استاتیکی در نظر گرفته می‌شوند، حال آنکه در برخی موارد خاص، نظیر بارهای ناشی از اثر ضربه و یا پلهای با دهانه بزرگ که ترافیک سنگین را تحمل می‌کنند و یا ساختمان‌های بلند و لاغر تحت بار جانبی، معیار رفتار دینامیکی بایستی مد نظر قرار گیرد.

g- معیار خستگی

وقتی که سازه تحت تأثیر سیکلهای مکرر بارگذاری و باربرداری قرار گیرد (بدون اینکه تنشها از تنش تسلیم و یا پلاستیک تجاوز کند) در سازه انهدام و شکست رخ دهد که از آن به‌عنوان پدیده خستگی یاد می‌شود. پدیده خستگی به نوع بار و تعداد چرخه‌های بارگذاری و باربرداری و خواص فولاد بستگی دارد. این پدیده به ویژه در اتصالات سازه‌های فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در عمل باتوجه‌به تعداد سیکل بارگذاری محتمل در سازه از مقاومت جاری شده کاهش یافته فولاد در طراحی آن استفاده می‌شود.

---

[1] Plastic Hinch

h- معیار تردشکنی

در فولادهای با کربن زیاد و مقاومت بالا، پدیده ترد شکنی می‌تواند رخ دهد. در این صورت هنگامی که سازه تحت اثر بار قرار می گیرد، بدون آنکه در آن اثری از کاهش تدریجی سختی مشاهده شود، به‌صورت ناگهانی شکست رخ می‌دهد. کنترل معیار ترد شکنی در سازه‌های فولادی در صورت استفاده از فولاد با مقاومت بالا، الزامی است.

۱-۷ تحلیل سازه، پیش نیاز طراحی

پس از آنکه نحوه ترتیب و قرارگیری اجزای سازه مشخص شده و بارهای وارده اعمال شد، سازه بایستی تحلیل شود. منظور از تحلیل یک سازه تعیین تلاشها شامل (لنگرهای خمشی، نیروهای برشی، نیروهای محوری و...) و نیز تغییرمکانها است.. برای سازه‌های بلند که تحت اثر نیروهای جانبی ناشی از زلزله و باد قرار می‌گیرند و از حرکت جانبی آنها جلوگیری نشده باشد، بایستی اثرات ثانویه موسوم به $P\text{-}\Delta$ در تحلیل سازه‌ای مد نظر قرارگیرد. باید دانست جوابهای تحلیل سازه همواره یکتاست، امّا نتیجه طراحی یک سازه می تواند یکتا نباشد.

۱-۷-۱ مشخصات هندسی مقطع

نحوه محاسبه برخی مشخصات هندسی مقطع قبلا در درسهای استاتیک و مقاومت مصالح ذکر گردیده که در این بخش یادآوری می‌گردد. یک مهندس محاسب باید توانایی محاسبه و اظهار نظر در باره کلیه مشخصات هندسی هر مقطعی را داشته باشد. لازم به ذکر است جداول آماده پروفیلها (جداول اشتال) مشخصات هندسی را برای مقاطع پروفیل تک ارائه می‌نمایند که در این کتاب مشخصات مذکور با اندیس i نمایش داده می‌شود (مثلا A_i برای مساحت تک پروفیل).

۱-۷-۲ دسته‌بندی مشخصات مقطع

مشخصات سطح مقطع از نظر محاسباتی به دو دسته مشخصات پایه‌ای یا اصلی و مشخصات ثانوی یا نتیجه شده طبقه‌بندی می‌گردند. مشخصات اصلی، مستقیماً از طریق سطح مقطع و مشخصات مصالح محاسبه می‌شوند. این مشخصات عبارتند از:

- مساحت مقطع
- گشتاور اول سطح حول یک محور
- گشتاور دوم سطح حول یک محور
- گشتاور لختی حول یک محور
- مساحت برشی در راستای یک محور
- ثابت پیچشی
- ثابت اعوجاج
- اساس مقطع پلاستیک حول یک محور
- مرکز برش

برخی دیگر از مشخصات سطح مقطع، از مشخصات اصلی نتیجه و یا بر مبنای آنها محاسبه می‌شوند. این مشخصات عبارتند از:

- مرکز هندسی نسبت به یک محور مشخص
- مرکز پلاستیک نسبت به یک محور مشخص
- اساس مقطع الاستیک حول یک محور
- شعاع ژیراسیون حول یک محور
- لنگر لختی نسبت به محورهای اصلی خمش
- زاویه دوران محور اصلی خمش

۱-۷-۳ مساحت و مرکز سطح

محاسبه مساحت نسبت به سایر مشخصات ساده‌تر است. از این ویژگی برای تعیین سختی محوری اعضا و تنشها و کرنش‌ها و تغییرشکل‌ها در مقطع استفاده می‌شود.

$$A = \int dA \; ; \; A = \sum_{i=1}^{n} A_i \qquad ۳\text{-}۱$$

A مساحت مقطع

مختصات مرکز سطح مقطع، یکی دیگر از مشخصات هندسی مهم مقطع است.

$$\overline{x} = \frac{\int xdA}{A} \; ; \; \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \qquad ۴\text{-}۱$$

$$\overline{y} = \frac{\int ydA}{A} \; ; \; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

$\bar{x}$ و $\bar{y}$ مختصات مرکز سطح

۱-۷-۴ لنگر سطح

گشتاور اول سطح از حاصل ضرب مساحت بخشی از مقطع در فاصله مرکز آن از محورهای مشخص شده بدست می‌آید. مقدار Q در پروفیل های نوردشدهدر جدول اشتال ارائه شده‌است.

$$Q_x = y \int dA \; ; \; Q_x = \sum_{i=1}^{n} A_i \bar{y}_i$$
$$Q_y = x \int dA \; ; \; Q_y = \sum_{i=1}^{n} A_i \bar{x}_i \qquad ۵\text{-}۱$$

Q_x و Q_y گشتاور اول سطح حول محورهای x و y

لنگر لَختی، ممان اینرسی یا گشتاور دوم سطح از حاصل ضرب مساحت در مجذور فاصله مرکز سطح مقطع تا محور مورد نظر بدست می‌آید.

$$I_x = y^2 \int dA \; ; \; I_x = \sum_{i=1}^{n} \bar{I}_{xi} + A_i y_i^2$$
$$I_y = x^2 \int dA \; ; \; I_y = \sum_{i=1}^{n} \bar{I}_{yi} + A_i x_i^2 \qquad ۶\text{-}۱$$

چنانچه مساحت در فاصله مرکز سطح از دو محور عمود برهم ضرب شود، نتیجه بدست آمده گشتاور لختی حاصل ضرب نامیده می‌شود. این گشتاور برای مقاطعی که دارای حداقل یک محور تقارن هستند، برابر صفر است.

$$I_{xy} = \int xydA \; ; \; I_{xy} = \sum_{i=1}^{n} \bar{I}_{xy_i} + A_i \, xy \qquad ۷-۱$$

گشتاور لختی قطبی:

$$J_\circ = \int r^2 dA$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \qquad ۸-۱$$

$$J_\circ = I_x + I_y$$

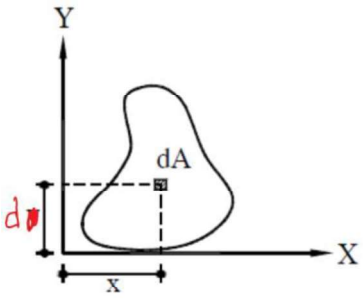
۱-۷-۵ قضیه محورهای موازی

برای انتقال گشتاور لختی نسبت به محورهایی به موازات محورهایی که از مرکز سطح می‌گذرند، از «قضیه محورهای موازی» استفاده می‌شود:

$$I = \bar{I} + A\,d^2 \qquad ۹-۱$$

$\bar{I}$ گشتاور لختی (دوم سطح) نسبت به مرکز سطح

d فاصله محور دلخواه موازی از مرکز سطح است.



شکل ۱-۲۷ محاسبه مشخصات اصلی مقطع

۱-۷-۶ مساحت برشی

از مساحت برشی در محاسبه سختی عضو در برابر تغییرشکل‌های برشی و همچنین برای محاسبه میانگین تنش برشی استفاده می‌شود. مساحت برشی همواره، کمتر از مساحت مقطع است. نسبت مساحت برشی به مساحت مقطع به‌عنوان ضریب شکل تعریف می‌شود. در صورت نامتقارن بودن هندسه مقطع، مساحتهای برشی در راستای محورهای مختلف آن یکسان نخواهد بود. به‌عنوان نمونه برای مقطع I شکل این مساحت برابر با ارتفاع پروفیل در ضخامت جان خواهد بود.

۱-۷-۷ ثابت پیچشی

ثابت پیچشی در واقع نوعی گشتاور لختی است و برای محاسبه سختی پیچشی مقطع بکار می‌رود. همانند مساحت برشی، ثابت پیچشی نیز بستگی به توزیع تنش‌های برشی دارد. نحوه توزیع تنش برشی در مقاطع تو پر، مقاطع باز جدار نازک و مقاطع بسته جدار نازک متفاوت است. محاسبه ثابت پیچشی مقاطع تو پر پیچیده‌ترین نوع محاسبات برای تعیین ثابت پیچشی می‌باشد.

در مقاطع دایره‌ای به شعاع مقطع r ، مقدار J از رابطه $J = \frac{\pi r^4}{2}$ محاسبه می‌شود.

در مقاطع مستطیلی، ثابت پیچشی (J) بستگی به نسبت دو بعد دارد و از رابطه کلی زیر محاسبه می‌شود:

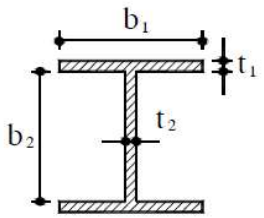
$$J = Kxy^3 \qquad ۱۰-۱$$

در رابطه فوق x و y ابعاد مقطع مستطیلی و x بعد بزرگتر آنست. در جدول زیر فهرست مقادیر K برای نسبتهای ابعادی مختلف داده‌شده‌است.

جدول ۱-۵ مقادیر برای نسبتهای ابعادی مختلف

x/y	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
K	0.141	0.196	0.229	0.249	0.263	0.281	0.299	0.307	0.313

مقطع نیمرخهای بالدار می‌تواند به تعدادی مستطیل تقسیم شود. برای هر مستطیل، J با استفاده از رابطه ارائه شده به‌صورت مجزا محاسبه می‌شود. J کل مقطع از مجموع J اجزای تشکیل دهنده مقطع محاسبه می‌شود. به دلیل اینکه مقاطع بالدار می‌توانند به‌صورتهای مختلفی تقسیم شوند، باید کمترین مقدار J را به‌عنوان ثابت پیچشی مقطع استفاده نمود.



شکل ۱-۲۸ نیمرخ جدار نازک باز

برای نیمرخ های جدار نازک باز مطابق شکل بالا، مقدار J از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$J = \sum \frac{bt^3}{3} = 2\frac{b_1 t_1^3}{3} + \frac{b_2 t_2^3}{3} \qquad ۱۱-۱$$

۱-۷-۸ ثابت اعوجاج

همانند ثابت پیچشی، ثابت اعوجاج مربوط به سختی پیچشی اعضای سازه‌ای از نوع تیر است. این ثابت معمولاً برای اعضایی که دارای مقاومت پیچشی اندکی بوده و سطح مقطع آنها از دو انتها در برابر اعوجاج محافظت شده باشد، دارای اهمیت است.

۱-۷-۹ محورهای اصلی

هر مقطع دارای یک محور خمش اصلی و یک محور خمش فرعی است که از مرکز سطح پلاستیک آن می‌گذرند. اگر محورهای اصلی بر روی محورهای محلی سطح مقطع قرار نداشته باشد، می‌بایست خصوصیات تغییر یافته باتوجه‌به محورهای اصلی محاسبه شده و در تحلیل و طراحی به کار روند.

زاویه محورهای اصلی:

$$tan\,2\,\alpha = \frac{2I_{xy}}{I_y - I_x} \Rightarrow \begin{cases} \alpha \\ \alpha + \frac{\pi}{2} \end{cases} \qquad ۱۲\text{-}۱$$

گشتاور لختی سطح:

$$I_{max,min} = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \frac{1}{2}\left[\left(I_x - I_y\right)^2 + 4I_{xy}^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad ۱۳\text{-}۱$$

چنانچه مقطع حداقل دارای یک محور تقارن باشد، محورهای اصلی مقطع همان محورهای x یا y می‌باشد و در آن $\alpha = ۰$ خواهد بود.

۱-۷-۱۰ اساس مقطع الاستیک

اساس مقطع الاستیک در حالت کلی با فرض خطی بودن کرنش بکار می‌رود. اساس مقطع حول هر محور، از تقسیم لنگر لختی بر موقعیت دورترین تار مقطع (در راستای محور عمود بر محور خمش) بدست می‌آید:

$$S_x = \frac{I_x}{C_y}$$
$$S_y = \frac{I_y}{C_x} \qquad ۱۴\text{-}۱$$

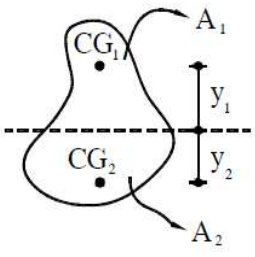
که در آن C_x و C_y فاصله دورترین تار از محور x یا y می‌باشد.

۱-۷-۱۱ اساس مقطع پلاستیک

اساس مقطع پلاستیک، بیشتر در تعیین ظرفیت نهایی مقاطع در خمش بکار می‌رود. در این حالت فرض می‌شود که نیمی از مقطع تحت فشار و نیمی تحت کشش است، بنابراین فاصله بین مرکز نیمه فوقانی و تحتانی تا محور خنثی پلاستیک، در مساحت قسمت تحت کشش و فشار ضرب شده و از مجموع آنها اساس مقطع پلاستیک بدست می‌آید:

$$Z = Q_t + Q_b = A_1Y_1 + A_2Y_2 \qquad ۱۵\text{-}۱$$

مقدار Z در پروفیلهای نوردشده و متقارن دو برابر Q است (Q_t گشتاور اول نیمه بالای سطح و Q_b گشتاور اول نیمه پایین سطح است).



شکل ۱-۲۹ محاسبه اساس مقطع پلاستیک

۱-۷-۱۲ شعاع ژیراسیون

در اکثر موارد، شعاع ژیراسیون به‌عنوان معیاری در پایداری کمانش مقطع مورداستفاده قرار می‌گیرد. شعاع ژیراسیون حول هر محور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

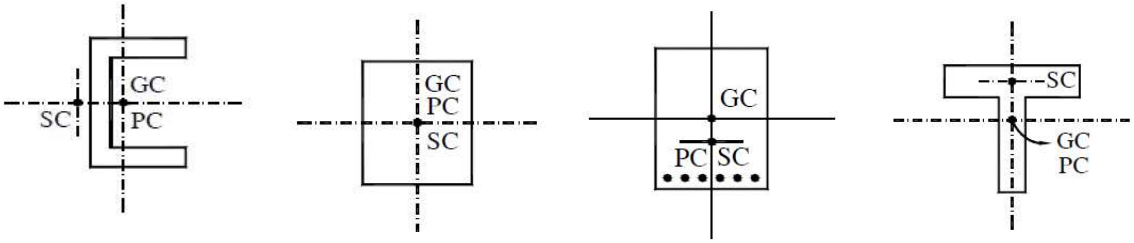
$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$
$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \qquad ۱-۱۶$$

I معرف لنگر لختی حول محور مورد نظر و A معرف مساحت مقطع آن است. مفهوم فیزیکی شعاع ژیراسیون به معنای دوری مصالح از محور یا پراکندگی مصالح از محور می‌باشد.

در مقاطع دوبل متقارن، بجای استفاده از رابطه فوق، می‌توان از مشخصات شعاع ژیراسیون مقطع تک استفاده نمود که این موضوع، در مثالهای مرتبط با محاسبه مشخصات مقطع دوبل IPE و مقطع دوبل ناودانی، استفاده شده‌است. در این کتاب در صورت نیاز به شعاع ژیراسیون مقطع و عدم نیاز به سایر مشخصات مقطع مانند I_y از این روش استفاده شده و شعاع ژیراسیون به‌صورت مستقیم محاسبه شده‌است.

۱-۷-۱۳ مرکز هندسی، مرکز پلاستیک و مرکز برش

مرکز هندسی (GC) مرکز سطح مقطع صرفنظر از نوع مصالح بکار رفته در آن مقطع است. مرکز پلاستیک (PC) مرکز سطح مقطع با در نظر گرفتن مشخصات مصالح آن مقطع است. به عبارت دیگر، مرکز پلاستیک همان مرکز هندسی است، با این فرض که کلیه مصالح مختلف مقطع با نسبت مدول الاستیسیته (n) به یک مصالح مبنا تبدیل شده باشد. برای مقطع با یک نوع مصالح، مرکز هندسی همان مرکز پلاستیک است. مرکز برش (SC) نقطه‌ای است که اگر نیرویی در آن محل وارد شود، باعث ایجاد دوران و پیچش در مقطع نگردد. این نقطه می‌تواند هم در محدوده مقطع و هم در خارج از مقطع قرارگیرد.

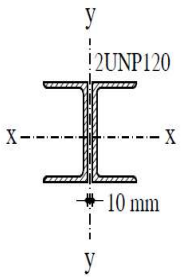


شکل ۱-۳۰ نحوه قرار گیری مرکز هندسی، مرکز پلاستیک و مرکز برش

در ادامه، نحوه محاسبه مشخصات مقاطع مختلف، در قالب مثال ارائه می‌گردد.

مثال ۱-۷

شعاع ژیراسیون مقطع دوبل UNP12 پشت به پشت با فاصله ۱ سانتی‌متر را مطابق شکل ۱-۳۰ برای دو محور اصلی محاسبه کنید.



شکل ۱-۳۱ مقطع دوبل ناودانی پشت به پشت

حل:

باتوجه‌به شکل ۱-۳۰شکل فوق، مشخصات هندسی UNP12 از جدول اشتال به شرح زیر می‌باشد:

$$UNP12: A_0 = 17cm^2, e = 1.6cm, I_{x0} = 364cm^4, I_{y0} = 43.2cm^4; r_{x0} = 4.62cm; r_{y0} = 1.59cm$$

$$A = 2A_0 = 2 * 17 = 34\ cm^2$$

$$I_x = 2I_{x0} = 2 * 364 = 728\ cm^4$$

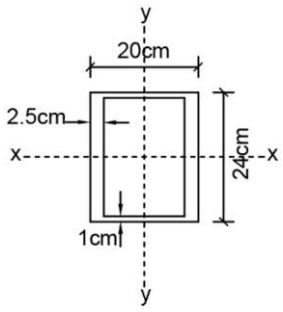
$$I_y = 2\left[I_{y0} + A_0(e + 0.5)^2\right] = 2[43.2 + 17(1.6 + 0.5)^2] = 236.3\ cm^4$$

$$r_x = \sqrt{\frac{2I_{X0}}{2A_0}} = \sqrt{\frac{728}{34}} = 4.62\ cm = r_{x0}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{2I_{y0}}{2A_0} + \frac{2A_0(e+0.5)^2}{2A_0}} = \sqrt{r_{y0}^2 + (e + 0.5)^2} = \sqrt{1.59^2 + (1.6 + 0.5)^2} = 2.63\ cm$$

محاسبه شعاع ژیراسیون به‌صورت کوتاهتر نیز امکانپذیر است. به مثال بعدی توجه کنید.

مثال ۸-۱ شعاع ژیراسیون مقطع قوطی شکل زیر را برای دو محور اصلی محاسبه کنید (مربوط به مثال ۲-۶).



شکل ۱-۳۲ مقطع قوطی

حل:

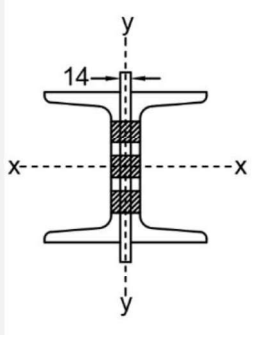
$$I_x = \frac{20\times24^3}{12} - \frac{15\times22^3}{12} = 9730cm^4$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{9730}{150}} = 8.05cm$$

$$I_y = \frac{24\times20^3}{12} - \frac{22\times15^3}{12} = 9812.5cm^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{9812.5}{150}} = 8.09cm$$

مثال ۹-۱ شعاع ژیراسیون مقطع دوبل ناودانی شکل زیر را برای دو محور اصلی محاسبه کنید (مربوط به مثال ۲-۱۰).



شکل ۱-۳۳ مقطع دوبل ناودانی

حل:

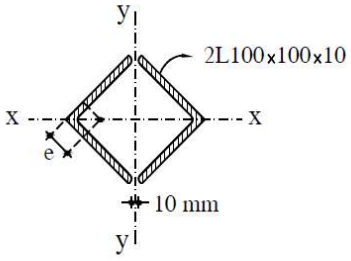
$$UNP14: A = 20.4cm^2, t_w = 0.7cm, r_x = 5.45cm., r_y = 1.75cm, e = 1.75cm$$

$$r_x = r_{x_\circ} = 5.45cm$$

$$r_y = \sqrt{{r_{y\circ}}^2 + (e + 0.7)^2} = \sqrt{1.75^2 + (1.75 + 0.7)^2} = 3.01cm$$

مثال ۱۰-۱

شعاع ژیراسیون مقطع دوبل نبشی L10 را مطابق شکل ۱-۳۴ برای دو محور اصلی محاسبه کنید.



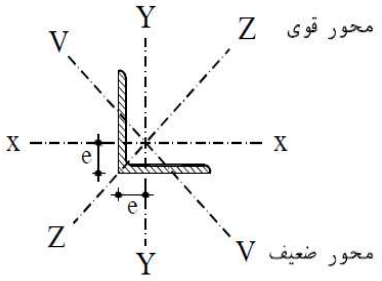
شکل ۱-۳۴ مقطع مثال ۸-۱

حل:

باتوجه‌به شکل ۱-۳۴ و شکل ۱-۳۵ مشخصات هندسی L10 از جدول اشتال به شرح زیر می‌باشد:

$$L10: A_0 = 19.2cm^2, e = 2.82cm, r_z = 3.82cm, r_v = 1.95cm$$

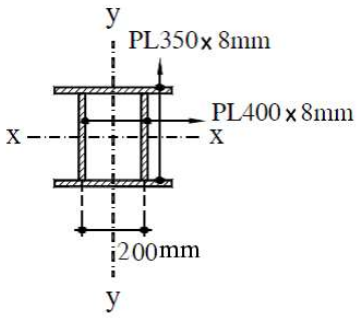
$$A = 2A_0 = 2 * 19.2 = 38.4\ cm^2$$
$$r_x = r_{x0} = 3.82\ cm$$
$$r_y = \sqrt{r_v^2 + \left(\frac{a\sqrt{2}}{2} - e\sqrt{2} + 0.5\right)^2} = \sqrt{1.95^2 + \left(\frac{10\sqrt{2}}{2} - 2.82\sqrt{2} + 0.5\right)^2} = 4.08\ cm$$



شکل ۱-۳۵ محورهای قوی و ضعیف نبشی

مثال ۱۱-۱

شعاع ژیراسیون مقطع شکل ۱-۳۶ را برای دو محور اصلی محاسبه کنید.



شکل ۱-۳۶ مقطع مثال ۱۱-۱

حل:

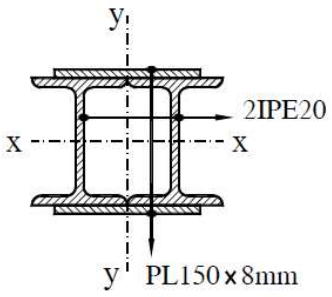
باتوجه‌به شکل فوق برای مقطع ساخته شده از ورق، مشخصات هندسی به شرح زیر می‌باشد:

$$A = 2(40 \times 0.8) + 2(35 \times 0.8) = 120cm^2$$
$$I_x = 2 * \frac{0.8*40^3}{12} + 2 * \frac{35\times0.8^3}{12} + 2 * 35 * 0.8 * 20.4^2 = 31841.3cm^4$$
$$I_y = 2 * \frac{0.8\times35^3}{12} + 2 * \frac{40\times0.8^3}{12} + 2 * 40 * 0.8 * 10^2 = 12120.1cm^4$$
$$S_x = \frac{I_x}{\bar{y}} = \frac{31841.3}{\frac{40+2*0.8}{2}} = 1530.8cm^3$$
$$S_y = \frac{I_y}{\bar{x}} = \frac{12120.1}{\frac{35}{2}} = 692.6cm^3$$
$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{31841.3}{120}} = 16.29cm$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{12120.1}{120}} = 10.05cm$$

مثال ۱۲-۱

اساس مقطع شکل ۱-۳۷ را حول محور قوی محاسبه کنید.



شکل ۱-۳۷ مقطع مثال ۱۲-۱

حل:

مشخصات هندسی $IPE20$ از جدول اشتال به شرح زیر می‌باشد:

$$IPE20: A = 28.5cm^2\ ;\ I_x = 1940cm^4\ ;\ I_y = 142cm^4$$

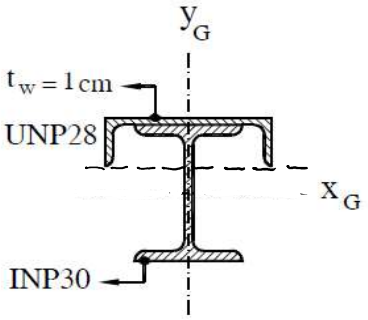
$$A = 2 \times 28.5 + 2(15 \times 0.8) = 81.0cm^2$$

$$I_x = 2 \times 1940 + 2 * \frac{15 \times 0.8^3}{12} + 2 * 15 * 0.8 * 10.4^2 = 6477.1cm^4$$

$$S_x = \frac{I_x}{\bar{y}} = \frac{6477.1}{\frac{20+2*0.8}{2}} = 599.7cm^3$$

مثال ۱۳-۱

$I_{xy_G}, I_{y_G}, I_{x_G}$ را برای شکل زیر محاسبه کنید.



شکل ۱-۳۸ مقطع مثال ۱۳-۱

حل:

گام ۱- مشخصات پروفیلها از جدول اشتال

$$INP30(d = 30cm, A = 69.0cm^2, I_x = 9800cm^4, I_y = 451cm^4)$$
$$UNP28(A = 53.3cm^2, e = 2.53cm, I_x = 6280cm^4, I_y = 399cm^4)$$

گام ۲- مرکز سطح

$$x_G = 0$$
$$y_G = \frac{A_{I30}\times\frac{d}{2}+A_{U28}(d+t_{wUNP}-e)}{A_{I30}+A_{U28}}$$
$$y_G = \frac{69.0\times15+53.3\times(30+1-2.53)}{69.0+53.3} = 20.87cm$$

گام ۳- لنگر اینرسی اجزاء مقطع حول محور اصلی

$$INP30: I_{x_G} = I_x + A(y_G - \frac{d}{2})^2 = 9800 + 69.0 \times (20.87 - 15)^2 = 12177cm^4$$
$$INP30: I_{y_G} = I_y = 451cm^4$$
$$UNP28: I_{x_G} = I_y + A(d + t_w - y_G - e)^2 = 399 + 53.3 \times (31 - 20.87 - 2.53)^2 = 3478cm^4$$
$$UNP28: I_{y_G} = I_x = 6280cm^4$$

گام ٤- لنگر اینرسی مقطع

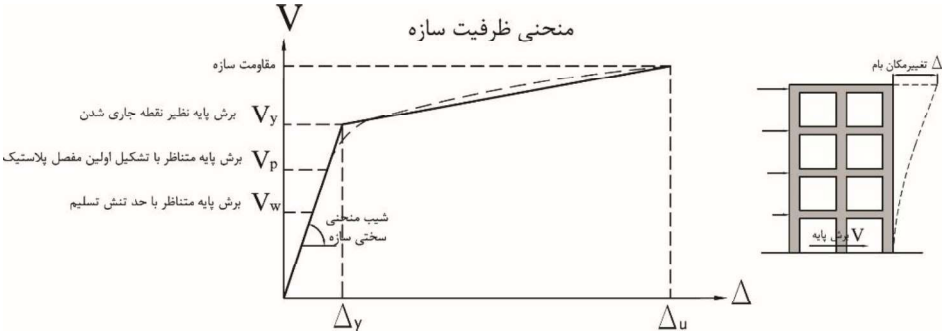
$$I_{x_G} = 12177 + 3478 = 15655cm^4$$
$$I_{y_G} = 451 + 6280 = 6731cm^4$$

به دلیل تقارن در مقطع

$$I_{xy_G} = ٥$$

۱-۷-۱۴ منحنی ظرفیت سازه و مفهوم سختی، مقاومت و شکل‌پذیری

برای درک رفتار یک سازه تحت بارهای افزایشی و به ویژه رفتار غیرخطی سازه و بررسی وضعیت مقاوم‌سازی سازه، ابتدا باید منحنی ظرفیت سازه ترسیم گردد. برای ترسیم منحنی ظرفیت سازه، ابتدا نیروی زلزله کمی به سازه اعمال نمودار برش پایه (V) بر حسب تغییرمکان بام (Δ) ترسیم می‌گردد. سپس نیروی زلزله افزایش داده می‌شود و وضعیت ایجاد مفاصل پلاستیک و نقاطی که به حد نهایی خود می‌رسند، مورد بررسی قرار می‌گیرد و منحنی به‌صورت نقطه به نقطه مطابق شکل ۱-۳۹ ترسیم می‌گردد.



شکل ۱-۳۹ منحنی ظرفیت سازه

چند معیار در رابطه با این منحنی تعریف می‌شود:

- سختی سازه: به مقدار نیروی لازم جهت ایجاد تغییر مکان واحد سختی گفته می‌شود. شیب منحنی بار-مقاومت از منحنی ظرفیت سازه، سختی سازه را نشان می‌دهد. نرمی سازه مخالف عبارت سختی سازه است.
- مقاومت سازه: حداکثر نیرو و یا تنشی را که سازه تحمل می‌کند را مقاومت سازه می‌گویند.
- شکل‌پذیری سازه: شکل‌پذیری یک سازه، پتانسیل استهلاک انرژی را نشان می‌دهد و عملکرد قطعه در رفتار غیرخطی سازه را بیان می‌کند. به نسبت تغییرمکان نهایی (Δ_u) سازه به تغییرمکان جاری‌شدن (Δ_y) سازه ضریب شکل‌پذیری (μ) سازه گفته می‌شود.

$$\mu = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \qquad ۱۷\text{-}۱$$

مثال ۱۴ـ۱

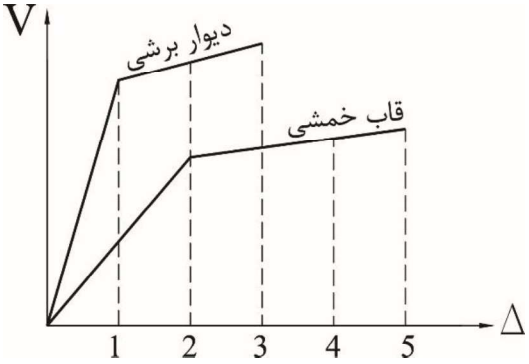
منحنی رفتار یک قاب خمشی و یک دیوار برشی در شکل زیر نشان داده‌شده‌است. کدام جمله در مورد رفتار سازه‌ها صحیح است؟

الف- دیوار برشی از قاب خمشی سخت‌تر است.

ب- دیوار برشی از قاب خمشی مقاوم‌تر است.

ج- دیوار برشی از قاب خمشی شکل‌پذیرتر است.

د- همه موارد



شکل ۱-۴۰ نمایش منحنی های رفتار قاب خمشی و دیوار برشی

حل:

باتوجه‌به تعاریف ذکر شده پاسخ د صحیح است.

۱-۷-۱۵ ضریب رفتار

این ضریب در بر گیرنده آثار عواملی از قبیل شکل‌پذیری، درجه نامعینی و اضافه مقاومت موجود در سازه است و بر حسب نوع مصالح و سیستم باربر سازه از جدول‌هایی آماده در آئین نامه ۲۸۰۰ برداشت می‌گردد.

بر اساس این ضریب می‌توان ضریب رفتار سازه R را از روابط زیر تعیین نمود:

$$\boldsymbol{R = R_\mu R_p R_w} \leftarrow \begin{cases} \boldsymbol{R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}} \\ \boldsymbol{R_p = \frac{V_y}{V_p}} \\ \boldsymbol{R_w = \frac{V_p}{V_w}} \end{cases} \qquad \text{۱۸-۱}$$

در این رابطه مقدار R_W در روش طراحی حدی برابر ۱ و در طراحی به روش تنش مجاز برابر ۱,۴ می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد ضریب شکل‌پذیری سازه (μ) ارتباط مستقیم با ضریب رفتار سازه (R) دارد، بنابراین هر سازه‌ای که شکل‌پذیرتر است، دارای ضریب رفتار (R) بزرگتری است.

۱-۸ آیین‌نامه‌های طراحی

بمنظور یکنواختی روش محاسبات و ایجاد ایمنی مطلوب و هماهنگ در محاسبه و ساخت ابنیه فنی، دستورالعملهایی از طرف سازمان های ذیربط در هر کشور، حاصل از نتایج تحقیقات، تجربه و قضاوت مشترک مهندسی، صادر می‌شود که به آنها آیین نامه گفته می‌شود. یک آیین نامه مجموعه قواعدی است که به منظور ایمنی سازه بر مبنای روابط تئوری و نتایج تجربی، تدوین شده‌است. به طور کلی تدوین یک آیین‌نامه باتوجه‌به مراحل زیر صورت می‌پذیرد:

- مطالعه و بررسی علمی
- پیشنهاد یکسری ضوابط توسط افراد محقق و مجرب
- تاییدیه این ضوابط توسط یک مرجع قانونی و لازم‌الاجرا شدن ضوابط

فلسفه طراحی و فرهنگ مهندسی کشورهای مختلف، باعث شده‌است که در دنیا آیین‌نامه‌های متعددی با اندیشه‌های گوناگون شکل بگیرد. آنچه مسلم است اینکه در ایران استفاده از مقررات ملی ساختمان به دلیل سازگاری با فرهنگ ساخت و ساز و مهندسی کشور و اقلیم و ... لازم‌الاجرا می‌باشد. ولی در مواردی که در آیین‌نامه ضابطه‌ای ذکر نشده‌است، می‌توان به آیین‌نامه‌های معتبر دیگر کشورها مراجعه نمود.

نکته مهم در انتخاب کشور و آیین‌نامه موردنظر این است که باید آن کشور از نظر شرایط اقلیمی و لرزه‌ای، فرهنگ ساخت و ساز، کیفیت اجراء، کیفیت مصالح، دانش مهندسی و اجرائی مشابه شرایط کشوری که ساختمان در آن بنا می‌شود، باشد.

از این رو باید مهندسان محاسب با آیین‌نامه‌های جدید و معتبر موجود در دنیا آشنا باشند تا بتوانند حسب مورد و نیاز به آن مراجعه نمایند. جهت آشنایی مشخصات تعدادی از آیین‌نامه‌های فولاد علاوه بر آیین‌نامه فولاد ایران (مبحث دهم مقررات ملی) ذکر می‌شود:

۱-۸-۱ مبحث دهم مقررات ملی ایران

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی (توسط دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان)، مرجع اصلی طراحی سازه‌های فولادی در کشور است. نسخه‌های اخیر مبحث دهم در سالهای ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲ و پیش‌نویس نسخه آخر در سال ۱۳۹۹ ارائه شده‌است.

۱-۸-۲ آیین‌نامه AISC

موسسه ساختمان‌های فولادی آمریکا[1] آیین‌نامه طراحی اجزاء فولادی (AISC 360)، اتصالات از پیش تایید شده فولادی (AISC 358) و طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی (AISC 341) را هر چند سال به‌صورت نسخه جدید ارائه می‌نماید. به‌عنوان مثال آخرین نسخه طراحی اجزاء فولادی در سال ۲۰۱۶ ارائه شده که با نام AISC 360-16 شناخته می‌شود. در حال حاضر ضوابط این آیین‌نامه در نرم‌افزارهای مهندسی مانند ETABS قابل دسترسی می‌باشند.

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، از نظر ضوابط و روشهای طراحی شباهت زیادی به آیین‌نامه‌های AISC-360 و AISC 358-16 و AISC 341-16 دارد.

۱-۸-۳ سایر آیین‌نامه‌ها

آیین‌نامه‌های دیگری در زمینه طراحی سازه‌های فولادی ارائه شده‌اند که در این خصوص می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- آیین‌نامه اشتو[2] مرتبط با انجمن حمل و نقل و بزرگراه های آمریکا، یکی از آیین‌نامه‌های پر کاربرد در سطح جهانی برای طراحی پلها می‌باشد . این آیین‌نامه دارای بخشی برای پلهای فولادی و بخشی برای پلهای بتنی است.
- معاونت راهبردی ریاست جمهوری (سازمان مدیریت و برنامه ریزی) تعدادی نشریه در زمینه ضوابط، بارگذاری، اصول و معیارهای طراحی پلها دارد. از این جمله می‌توان به نشریه ۱۳۹ (بارگذاری پلها) و آیین‌نامه طرح هندسی راهها اشاره نمود.

[1] American Institute of Steel Construction

[2] American Association of State Highway and Transportation (AASHTO

- آیین‌نامه UBC
- آیین‌نامه پایداری الاستیک فولاد آلمان $DIN-414$
- مبحث کمانش در آیین‌نامه آلمان $DIN-18800$
- آیین‌نامه ساختمان‌های فولادی انگلستان $BS-449$
- آیین‌نامه پل سازی انگلیسی $BS-153, BS-5400$
- آیین‌نامه ساختمان‌های فولادی فرانسه $CM-66$

۱-۹ فلسفه یا روش طراحی

بطور کلی بر مبنای معیارهای رفتار ارتجاعی و غیرارتجاعی، از روشهای مختلف در طراحی سازه استفاده می‌شود.

۱-۹-۱ روش تنش مجاز[1]

در فرمول بندی به روش تنش مجاز عمدتا از معیار تسلیم استفاده می‌شود. پس از آنکه نیروهای داخلی اعضا در اثر بارهای سرویس به سازه تعیین گردید و تنش‌های حاصله f_Q تعیین شدند، این تنشها با مقدار مجاز خود یعنی F_Q مقایسه می‌شوند. تنش‌های مجاز بر اساس معیار تسلیم همراه با ضریب اطمینان[2] مربوطه از سوی آیین‌نامه تعیین می‌شوند. برای طرح اقتصادی و ایمن بایستی همواره رابطه زیر برقرار باشد:

$$f_Q < F_Q \qquad ۱-۱۹$$

به‌عنوان مثال برای یک تیر دو سر گیردار، تحت اثر بار گسترده q ، اولین نقاطی که به تنش تسلیم می‌رسند نقاط تکیه‌گاهی با لنگر خمشی $\frac{qL^2}{12}$ هستند. حال چنانچه مقطع تیر یک مربع مستطیل با ابعاد b و h باشد، به گونه‌ای که خمش حول محور موازی با بعد b پدید آید، نتیجه می‌شود:

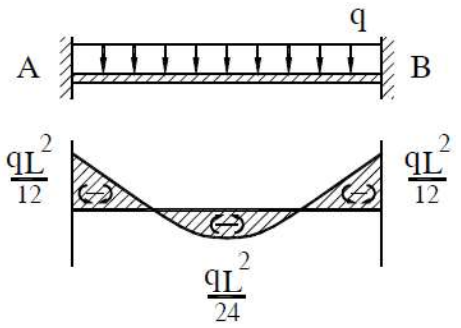
$$f_b = \frac{MC}{I} = \frac{\frac{qL^2}{12}\frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{qL^2}{2bh^2} \qquad ۱-۲۰$$

$$F_b = \frac{f_y}{S.F} \Rightarrow f_b = \frac{qL^2}{2bh^2} \leq \frac{f_y}{S.F}$$

نمودار لنگر تیر دو سر گیردار در شکل ۱-۴۱ نمایش داده‌شده‌است.

[1] Allowable stress Design

[2] Safety Factor (S.F)



شکل ۱-۴۱ تیر دو سر گیردار تحت بارگسترده یکنواخت

بدین ترتیب در طراحی تیر مذکور ابعاد b و h مقطع تیر، باید به گونه‌ای انتخاب شوند که رابطه بالا بر قرار باشد.

در طراحی سازه‌ها به روش تنش مجاز، برای تعیین تنش‌های موجود f_Q احتمال همزمانی تأثیر بارها با استفاده از ترکیب بارها در نظر گرفته می‌شود. اجزای سازه باید برای ترکیبی از بارها که بیشترین اثر را در آن جزء ایجاد می‌کند، طراحی شوند.

۱-۹-۱-۱ ضریب اطمینان

کلیه سازه ها و هر یک از قطعات سازه‌ها بایستی قادر باشند باری بیشتر از آنچه عملاً بر آنها وارد می‌شود تحمل کنند. عوامل مؤثر بر اعمال ضرایب اطمینان عبارتند از:

- ممکن است مقادیر بارهای وارده بر سازه بیش از آنچه باشد که در نظر گرفته شده‌است.
- اجرای ناقص سازه باعث تقلیل مقاومت سازه می‌شود.
- ممکن است خواص مکانیکی در نظر گرفته شده برای مواد مصرفی با آنچه در واقعیت است تفاوت داشته باشد.
- در بعضی مواقع ابعاد واقعی اعضای سازه با آنچه در محاسبات در نظر گرفته شده‌است تفاوت دارد.
- اعضای سازه ممکن است قبل از بارگذاری دارای نقص عضو و نیز تنش‌های پسماند در هنگام ساخت باشند.
- همواره در روشهای تحلیلی سازه‌ها فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که ممکن است با واقعیت متمایز باشد.

بر این اساس، حداقل مقاومت سازه باید از حداکثر بار وارده بیشتر باشد و بنابراین داریم:

$$R - \Delta R = S + \Delta S$$
$$R\left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) = S\left(1 + \frac{\Delta S}{S}\right)$$
$$S.F. = \frac{R}{S} = \frac{1+\frac{\Delta S}{S}}{1-\frac{\Delta R}{R}}$$

۲۱-۱

R	مقاومت اسمی	ΔR	کاهش مقاومت
S	بار طراحی	ΔS	افزایش بار
ΔS/S	اضافه بار وارده بر سازه	ΔR/R	قلیل ظرفیت سازه

مثال ۱۵-۱

چنانچه برحسب اضافه بار اتفاقی، مقدار $\Delta S/S$ به۴۰٪ مقدار متوسط بارگذاری برسد و تقلیل مقاومتی $\Delta R/R$ برابر با ۱۵٪ مقدار قبلی شود، ضریب اطمینان مورد نیاز ایمنی سازه را به روش تنش مجاز محاسبه نمایید.

حل:

$$S.F.=\frac{1+0.4}{1-0.15}=\frac{1.4}{0.85}=1.65$$

$$\frac{1}{S.F.}=\frac{1}{1.65}=0.6$$

ضریب اطمینان در روش LRFD نیز در ضرایب بار و ضرایب کاهش مقاومت، لحاظ شده‌اند.

۱-۹-۱-۲ ترکیب بار روش تنش مجاز

از میان ترکیب بارهای طراحی به روش تنش مجاز، ترکیب بارهای زیر برای بارهای ثقلی و بار جانبی زلزله، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

$$\begin{aligned} &2)\ D+L \\ &7)\ D+0.75L+0.75(0.7E)+0.75S \end{aligned} \qquad ۲۲\text{-}۱$$

D	بار مرده	L	بار زنده (سربار)
E	بار زلزله طرح	S	بار برف

در ویرایشهای قدیم مبحث دهم، برای ترکیباتی که در آنها آثار باد، زلزله و یا دما وجود داشت، تنش مجاز به میزان ۳۳ درصد افزایش داده می‌شد. امّا در ویرایش ۱۳۹۲، افزایش تنش مجاز حذف و به جای آن ضریب کاهش ۰,۷۵ در ترکیب بار لحاظ گردیده‌است.

بطور کلی سازه می‌بایست برای تمام ترکیبات بارگذاری آیین نامه، تحلیل شود و طراحی هر عضو برای بحرانی‌ترین حالت، صورت پذیرد. در محاسبه ترکیب بارها، تاثیر بار سیال، فشار جانبی خاک، سیل، بارهای یخ جوی و بار باد وارده بر یخ می بایست بطور جداگانه اعمال گردد.

۱-۹-۲ روش مقاومت مجاز ASD

این روش بر اساس مقاومت اجزاء بنا شده که در آیین‌نامه امریکا و در پیش‌نویس مبحث دهم ویرایش ۱۳۹۹ ارائه شده‌است.

۱-۹-۳ روش حالات حدی LSD و یا روش ضرایب بار و مقاومت LRFD

روش طراحی حالت (ضریب بار-مقاومت) روش جدیدتری نسبت به روش تنش مجاز در طراحی سازه‌های فولادی می‌باشد و آیین‌نامه روش ضریب بار-مقاومت آمریکا یکی از آیین‌نامه‌های قابل استناد در این روش است. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، از نظر ضوابط و روش حدی شباهت زیادی به آیین‌نامه فوق دارد.

در طراحی سازه‌های فولادی به روش $LRFD$ که براساس معیار خمیری یا پلاستیک شدن است، نیروهای داخلی یک عضو که (در ضرایب بار ضرب می‌شوند) با مقاومت نهایی مقطع (که در ضرایب کاهنده ضرب شده) مقایسه می‌شوند. رابطه کلی در روش $LRFD$ به‌صورت زیر است:

ضریب کاهش مقاومت * نیروی ظرفیت اسمی = نیروی ظرفیت طراحی ≤ نیروی نیاز ضریبدار

$$P_u \le \phi P_n \rightarrow \frac{P_u}{\phi P_n} \le 1 \qquad \text{۲۳-۱}$$
$$V_u \le \phi V_n$$
$$M_u \le \phi M_n$$

ϕ	ضرایب کاهش مقاومت	P_u	نیروی محوری (کششی یا فشاری) ضریبدار مورد نیاز مقطع
P_n	نیروی محوری ظرفیت اسمی مقطع	V_u	نیروی برشی ضریبدار مورد نیاز مقطع
V_n	نیروی برشی ظرفیت اسمی مقطع	M_u	لنگر خمشی ضریبدار مورد نیاز مقطع
M_n	لنگر خمشی ظرفیت اسمی مقطع		

منظور از نیروهای مورد نیاز (نیروی محوری کششی یا فشاری، نیروی برشی و لنگر خمشی)، مقاومت مورد نیاز مقطع در برابر نیروهای داخلی ضریبدار است که بر اساس تحلیل سازه تحت ترکیب بار بحرانی از میان ترکیبات بارگذاری (مرتبط با حالتهای حدی مقاومت) مندرج در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین می‌شود.

در روش ضرایب بار و مقاومت، دو نوع ضریب اطمینان مورداستفاده قرار می گیرد. ضرایب اطمینان اصلی که در بارها اعمال می‌شوند و موسوم به ضرایب بار[1] هستند و ضریب اطمینان دیگری که موسوم به ضرایب مقاومت[2] بوده و در مقاومت مقطع اعمال می‌گردند.

۱-۹-۳-۱ ترکیب بار در روش حالات حدی

در طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت، نیروهای داخلی باید بر اساس تحلیل سازه تحت اثر ترکیبات بارگذاری نظیر حالت های حدی مقاومت مندرج در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین شود. ترکیب بارها در طراحی به روش حالت حدی مقاومت برای ساختمان‌های فولادی به قرار زیر است[3]:

$$\begin{aligned}
&1.4D \\
&1.2D + 1.6L + 0.5(L_r or\ \ S\ \ or\ \ R) \\
&1.2D + 1.6(L_r or\ \ S\ \ or\ \ R) + [L\ \ or\ \ 0.5(1.4W)] \\
&1.2D + 1.0(1.4W) + L + 0.5(L_r or\ \ S\ \ or\ \ R) \\
&1.2D + 1.0E + L + 0.2S \qquad \text{۲۴-۱} \\
&0.9D + 1.0(1.4W) \\
&0.9D + 1.0E \\
&1.2D + 0.5L + 0.5(L_r\ \ or\ \ S) + 1.2T \\
&1.2D + 1.6L + 1.6(L_r\ \ or\ \ S) + 1.0T
\end{aligned}$$

D	بار مرده	L	بار زنده
W	بار باد	S	بار برف

[1] Load Factor
[2] Resistant Factor
[3] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان

E بار زلزله

در محاسبه ترکیب بارها، تاثیر بار سیال، فشار جانبی خاک، سیل، بارهای یخ جوی و بار باد وارده بر یخ می بایست بطور جداگانه اعمال گردد. از میان ترکیب بارهای مندرج در آیین‌نامه، ترکیب بارهای رابطه ۱-۲۵ مرتبط با بارهای ثقلی مرده و زنده و بار جانبی (زلزله) بوده و در مسائل متداول مهندسی، دارای کاربرد بیشتری هستند.

$$1.4D$$
$$1.2D + 1.6L \qquad \text{۲۵-۱}$$
$$1.2D + 1.0E + L$$
$$0.9D + 1.0E$$

توجه: منظور از علامت مثبت و منفی در روابط ترکیب بار، صرفا عمل جمع یا تفریق جبری اعداد نبوده و جمع و تفریق اثرات بارها مورد نظر است.

برای روشن شدن مطلب به مثال زیر توجه شود:

مثال ۱۶-۱

سازه زیر تحت بار گسترده مرده (D) و برف (S) و بارهای متمرکز زنده (L)، باد (W) و زلزله (E) با مقادیر عددی زیر قرار دارد:

$$D = 15\frac{ton}{m}\ ; L = 10\ ton\ ; S = 7\frac{ton}{m}\ ; W = 20\ ton\ ; E = 25\ ton$$

در محاسبات، ترکیبات بارگذاری آیین‌نامه به شرح زیر مورد نظر است:

1) $1.4D$
2) $1.2D + 1.6L + 0.5S$
3) $1.2D + 1.6S + (L\ OR\ 0.5 * 1.4W)$
4) $1.2D + 1.4W + L + 0.5S$
5) $1.2D + E + L + 0.2S$
6) $0.9D + 1.4W$
7) $0.9D + E$
8) $1.2D + 0.5L + 0.5S$
9) $1.2D + 1.6L + 1.6S$

تکیه گاه سمت راست تیر، مد نظر بررسی می‌باشد. مطلوب است:

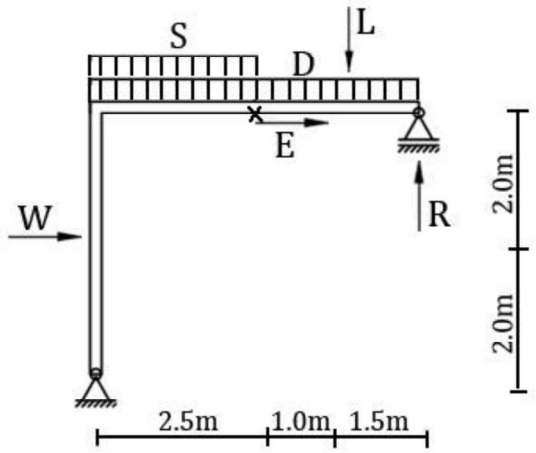
الف) محاسبه عکس‌العمل R ناشی از بارهای مختلف.

ب) محاسبه عکس‌العمل ضریبدار R ناشی از ترکیب بارهای مختلف.

ج) تعیین ترکیب بار بحرانی ثقلی و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار تکیه‌گاه ناشی از آن ترکیب بار.

د) تعیین ترکیب بار بحرانی و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار تکیه‌گاه ناشی از آن ترکیب بار.

ه) تعیین مقاومت برشی مورد نیاز برای طراحی تیر در ناحیه تکیه‌گاه سمت راست.



حل الف) محاسبه عکس‌العمل R ناشی از بارهای مختلف

عکس‌العمل R ناشی از بار مرده (**D**):

$$R_D = \frac{1}{5m}\left[\left(D = 15\frac{ton}{m}\right) * 5m * 2.5m\right] = 37.5\ ton$$

عکس‌العمل R ناشی از بار زنده (L):

$$R_L = \frac{1}{5m}[(L = 10ton) * 3.5m] = 7\ ton$$

عکس‌العمل R ناشی از بار برف (S):

$$R_S = \frac{1}{5m}\left[\left(S = 7\frac{ton}{m}\right) * 2.5m * 1.25m\right] = 4.375\ ton$$

عکس‌العمل R ناشی از بار باد (W):

$$R_W = \frac{1}{5m}[(W = 20ton) * 2m] = 8\ ton$$

عکس‌العمل R ناشی از بار زلزله (E):

$$R_E = \frac{1}{5m}[(E = 25ton) * 4m] = 20\ ton$$

حل ب) محاسبه عکس‌العمل ضریبدار R ناشی از ترکیب بارهای مختلف

ترکیب بار یک

$$1)\ 1.4D \rightarrow R_u^{(1)} = 1.4R_D = 1.4 * 37.5 = 52.5\ ton$$

ترکیب بار دو

$$2)\ 1.2D + 1.6L + 0.5S \rightarrow R_u^{(2)} = 1.2R_D + 1.6R_L + 0.5R_S = 1.2 * 37.5 + 1.6 * 7 + 0.5 * 4.375 = 58.39\ ton$$

ترکیب بار سه

$$3)\ 1.2D + 1.6S + (L\ OR\ 0.5 * 1.4W) \rightarrow R_u^{(3)} = 1.2R_D + 1.6R_S + \max(R_L\ , 0.5 * 1.4R_W) = 1.2 * 37.5 + 1.6 * 4.375 + \max(7\ , 0.5 * 1.4 * 8^{=5.6}) = 59\ ton$$

ترکیب بار چهار

4) $1.2D + 1.4W + L + 0.5S \rightarrow R_u^{(4)} = 1.2R_D + 1.4R_W + R_L + 0.5R_S = 1.2 * 37.5 + 1.4 * 8 + 7 + 0.5 * 4.375 = 65.39\ ton$

ترکیب بار پنج

5) $1.2D + E + L + 0.2S \rightarrow R_u^{(5)} = 1.2R_D + R_E + R_L + 0.2R_S = 1.2 * 37.5 + 20 + 7 + 0.2 * 4.375 = 72.88\ ton$

ترکیب بار شش

6) $0.9\text{D} + 1.4\text{W} \rightarrow R_u^{(6)} = 0.9R_D + 1.4R_W = 0.9 * 37.5 + 1.4 * 8 = 44.95\ ton$

ترکیب بار هفت

7) $0.9\text{D} + \text{E} \rightarrow R_u^{(7)} = 0.9R_D + R_E = 0.9 * 37.5 + 20 = 53.75\ ton$

ترکیب بار هشت

8) $1.2D + 0.5L + 0.5S \rightarrow R_u^{(8)} = 1.2R_D + 0.5R_L + 0.5R_S = 1.2 * 37.5 + 0.5 * 7 + 0.5 * 4.375 = 50.69\ ton$

ترکیب بار نه

9) $1.2D + 1.6L + 1.6S \rightarrow R_u^{(9)} = 1.2R_D + 1.6R_L + 1.6R_S = 1.2 * 37.5 + 1.6 * 7 + 1.6 * 4.375 = 63.2\ ton$

حل ج) تعیین ترکیب بار بحرانی ثقلی و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار تکیه‌گاه ناشی از آن ترکیب بار

در این مثال، ترکیب بارهای شماره یک تا سه، ترکیب بارهای شامل فقط بارهای ثقلی (و نه جانبی) هستند. بنابراین:

$R_u^{(1)} = 1.4R_D = 52.5\ ton$

$R_u^{(2)} = 1.2R_D + 1.6R_L + 0.5R_S = 58.39\ ton$

$R_u^{(3)} = 1.2R_D + 1.6R_S + R_L = 59\ ton$

$R_u^{(8)} = 1.2R_D + 0.5R_L + 0.5R_S = 50.69\ ton$

$R_u^{(9)} = 1.2R_D + 1.6R_L + 1.6R_S = 63.2\ ton$

ترکیب بار بحرانی ثقلی، ترکیب بار ۹ است و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار ناشی از بارهای ثقلی $R_u = 63.2\ ton$ می‌باشد.

حل د) تعیین ترکیب بار بحرانی و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار تکیه‌گاه ناشی از آن ترکیب بار

با مقایسه عکس‌العملهای بدست آمده از میان ۹ ترکیب بار، نتیجه می‌شود:

$R_u^{(5)} = 1.2R_D + R_E + R_L + 0.2R_S = 72.88\ ton$

بدین ترتیب ترکیب بار بحرانی، ترکیب بار ۵ است و حداکثر عکس‌العمل ضریبدار ناشی از آن $R_u = 72.88\ ton$ می‌باشد.

حل ه) تعیین مقاومت برشی مورد نیاز برای طراحی تیر در ناحیه تکیه‌گاه

مقاومت برشی مورد نیاز در تیر، در ناحیه تکیه‌گاه سمت راست، بیشترین نیروی عکس‌العمل ناشی از ترکیبات بارگذاری (در این مثال، ترکیب بار ۵) است:

$$V_u = R_u^{(5)} = 72.88\ ton$$

۱-۹-۳-۲ ضرایب کاهش مقاومت

علاوه بر ضرایب بار که به‌عنوان ضرایب اطمینان اصلی در روش طراحی نهایی بارها اعمال می‌شوند، لازم است ضرایب مقاومت ϕ نیز در مقاومت مقطع اعمال گردد. این ضرایب اعداد کوچکتر، مساوی واحد می باشند ($\phi \leq 1.0$)که مستقیماً در مقاومت مقطع اعمال می‌شوند. مقدار ضریب کاهش مقاومت بستگی به نوع مقاومت دارد و برای مقاومت های مختلف، متفاوت است. در رابطه با دلایل اختلاف ϕ برای مقاومت های مختلف، دونکته قابل بیان می‌باشد. نکته اول، ضریب ϕ بستگی به مقدار دقت و تئوری مورداستفاده در تعیین یک مقاومت دارد. برای مثال، ضریب مقاومت کششی ϕ_t برای تنش تسلیم فولاد $\phi_t = 0.9$ و برای مقاومت نهایی فولاد $\phi_t = 0.75$ می‌باشد. باتوجه‌به اینکه مقدار دقت در تعیین تنش تسلیم فولاد معمولاً بیشتر از مقاومت نهایی آن است، ضریب اطمینان کمتر برای تنش تسلیم در مقایسه با مقاومت نهایی فولاد به کار گرفته می‌شود. نکته دوم، مقدار ϕ باتوجه‌به اهمیت یک بخش از سازه تعیین می‌گردد. این موضوع در مورد اتصالات $\phi = 0.75$ در مقایسه با سایر اجزای سازه قابل تشخیص است. ضریب ϕ برای اتصالات، کمتر از سایر اجزای سازه است که نشاندهنده اهمیت بیشتر و ضریب اطمینان بیشتر برای طراحی اتصالات در مقایسه با سایر اجزای سازه می‌باشد. بنابراین با بکارگیری ضرایب مقاومت ϕ مواردی را که نمی‌توان مستقیماً در بارگذاری سازه در نظر گرفت، به روش دیگری در طراحی سازه، اعمال می‌شوند.

۱-۹-۳-۳ مؤلفه قائم نیروی زلزله

مطابق استاندارد ۲۸۰۰ مقدار مولفه قائم نیروی زلزله از رابطه $F_v = 0.6AIW_p$ به‌صورت رفت و برگشتی محاسبه می‌شود. مقدار این نیرو با فرض $A = 0.35, I = 1.0$ برابر $F_v = 0.21W_p$ خواهد بود. در مواردی که W_p معادل بار مرده D است، مؤلفه قائم زلزله به‌صورت افزایش یا کاهش ضریب D در ترکیب بارهای شامل بار لرزه‌ای، قابل اعمال است. به‌عنوان مثال در ترکیب بار $1.2D + L + E$ با فرض $F_v = 0.6AID$ خواهیم داشت:

$$\boldsymbol{1.2D + E + L \rightarrow (1.2 \pm 0.6AI)D + L + E} \qquad \text{۱-۲۶}$$

همچنین در ترکیب بار $0.9D + E$ خواهیم داشت:

$$\boldsymbol{0.9D + E \rightarrow (0.9 \pm 0.6AI)D + E} \qquad \text{۱-۲۷}$$

لازم به ذکر است در رابطه اول تاثیر مؤلفه قائم با علامت مثبت و در رابطه دوم، با علامت منفی تعیین کننده خواهد بود. جهت اطلاع از ضوابط مرتبط با مؤلفه قائم نیروی زلزله، تعریف دقیق W_p و موارد الزامی بودن محاسبه مؤلفه قائم، به استاندارد ۲۸۰۰ مراجعه شود.

۱-۹-۳-۴ ترکیب بار زلزله تشدید یافته

ترکیب بار زلزله تشدید یافته با جایگزینی نیروهای طرح (E) با زلزله تشدید یافته $(\Omega_0 E)$ در ترکیب متعارف بارها بدست می‌آیند که در آن Ω_0 ضریب اضافه مقاومت سیستم سازه‌ای است و به عوامل متعددی نظیر درجات نامعینی سازه، مقاومت های بالاتر از حد

تعیین شده مصالح مصرفی، سخت شدن کرنش ها، جزئیات بندی اعضاء، اثرات اجزاء غیر سازه‌ای و غیره بستگی دارد. مقدار این ضریب برای انواع سیستم سازه‌ای فولادی باید به شرح جدول زیر در نظر گرفته شود.

جدول ۱-۵: ضریب اضافه مقاومت Ω_0

نوع سیستم باربر جانبی لرزه ای	Ω_0
کلیه قابهای خمشی فولادی	۳
کلیه قابهای ساختمانی ساده توام با مهاربندی هم محور و برون محور فولادی	۲
کلیه سیستم های دوگانه یا ترکیبی	۲/۵

۱-۹-۳-۵ ترکیب بار نظیر حالت های حدی بهره برداری

ترکیبات بارگذاری نظیر حالت های حدی بهره برداری، باید مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان باشد[۱].

۱-۱۰ واحدهای مورداستفاده

در این کتاب مطابق سیستم SI برای طول از واحد سانتی‌متر (cm)، مساحت از واحد سانتی‌مترمربع (cm^2) ، نیرو از واحد تن نیرو (ton)، کیلوگرم نیرو (kgf) و دکا نیوتن (daN) استفاده می‌شود. برای تنش از واحد کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع $(\frac{kg}{cm^2})$ یا دکا نیوتن بر سانتی‌مترمربع $(\frac{daN}{cm^2})$ استفاده می‌شود. در سیستم انگلیسی برای طول واحد فوت (ft) و اینچ (in) که (هر اینچ معادل 2.54 سانتی‌متر و هر فوت 12 اینچ می‌باشد)، نیرو از واحد پوند (lb) و کیلو پوند $(kips)$، تنش از واحد پوند بر اینچ مربع $\left(\frac{lb}{in^2}\right)$ و یا کیلو پوند بر اینچ مربع ksi استفاده می‌شود. برای تبدیل واحدها می‌توان از جداول تبدیل آحاد استفاده نمود. نمونه‌ای از این تبدیل واحدها در زیر ارائه شده‌است.

$$\mathbf{1daN = 10N = \frac{10}{9.81}kgf \cong 1.02kgf}$$
$$\mathbf{1KN = 10^2 \times 10N = 100daN \cong 102kgf \cong 0.1ton}$$
$$\mathbf{1ton = 10^3 kgf = 981daN = 9.81kN} \qquad (۱-۲۸)$$
$$\mathbf{1kPa = 1\frac{kN}{m^2} = \frac{100daN}{100^2 \times cm^2} = \frac{1}{100} \times \frac{daN}{cm^2} \cong 0.01\frac{kgf}{cm^2} = 0.01bar}$$
$$\mathbf{1MPa \cong 10.2\frac{kgf}{cm^2} \cong 0.0102\frac{ton}{cm^2}}$$

در حل مسائل، هرکجا که نوع فولاد مشخص نشده‌است، منظور فولاد ST37 می‌باشد که در آن:

$$\mathbf{f_y = 2400\frac{kgf}{cm^2} = 2.4\frac{ton}{cm^2}}$$
$$\mathbf{f_u = 3700\frac{kgf}{cm^2} = 3.7\frac{ton}{cm^2}}$$
$$\mathbf{E = 200GPa = 2.04 * 10^6\frac{kgf}{cm^2} = 2040\frac{ton}{cm^2}}$$

[۱] مبحث ده مقررات ملی ساختمان بند ۱۰-۱-۲-۳-۱.

۱-۱۱ توجهات لازم

الف- در طراحی اجزا، در مثالهای مختلف این کتاب سعی شده‌است که از پروفیلهای استاندارد و رایج در بازار ایران استفاده گردد. به همین منظور مثلاً در طراحی نبشی از مقاطعی استفاده شده‌است که ابعاد بال در آنها ۱۰ برابر ضخامت بال می‌باشد.

ب- در انتخاب مثالهای این کتاب و انتخاب اعداد آن سعی شده‌است که حتی‌الامکان شرایط مسئله با شرایط واقعی در اجرا منطبق باشد.

ج- در انتهای هر فصل این کتاب تعدادی تمرین برای حل قرار گرفته است که با حل مسائل کلیه نکات مرتبط با هر فصل، یادآوری می‌گردد.

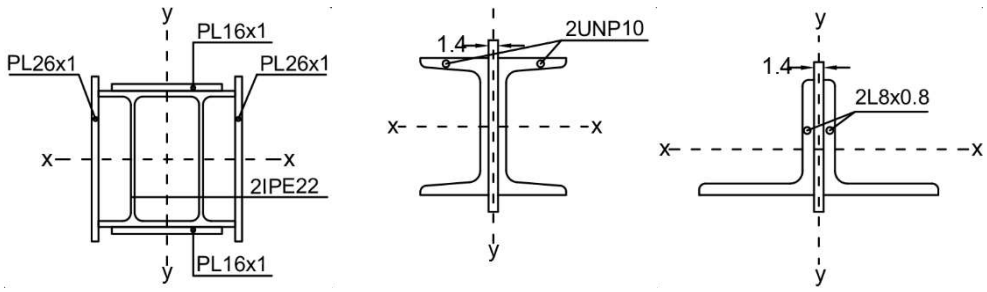
د-کلیه مطالب این کتاب بر مبنای طراحی به روش LRFD می‌باشد. لازم به ذکر است مطالب مشابه با این کتاب قبلا در کتاب دیگری با همین عنوان و به روش تنش مجاز تدوین و چاپ شده‌است.

ه- در حل مثال‌ها و یا مسائل، چنانچه بارهای مرده و زنده به تفکیک ارائه نشده باشد، مقدار بار مرده ٪ ۷۰ و بار زنده ٪ ۳۰ منظور گردد.

۱-۱۲ مسائل فصل اول

تمرین ۱-۱

مشخصات مقاطع زیر را حول دو محور x و y بیابید (ورق مابین دو پروفیل در نظر گرفته نشود و فقط فاصله آن در محاسبات منظور شود).

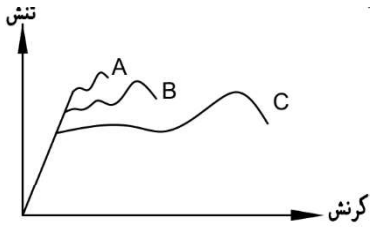


تمرین ۲-۱

با فرض رفتار الاستوپلاستیک برای فولاد نرمه با ضریب شکل‌پذیری μ نسبت انرژی تغییر شکل پلاستیک به انرژی تغییر شکل الاستیک فولاد را بدست آورید.

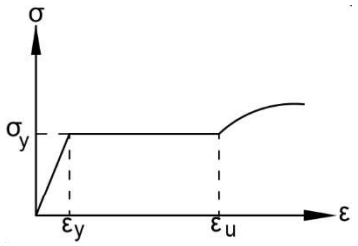
تمرین ۳-۱

نمودار تنش-کرنش سه نوع فولاد در شکل زیر داده‌شده‌است، در مورد شکل‌پذیری هر یک بحث نمایید.



تمرین ۴-۱

نمودار تنش-کرنش برای میله فولادی تحت اثر بارگذاری محوری افزایشی تا مرحله گسیختگی میله، مطابق شکل زیر می‌باشد. نسبت مدول طاقت به مدول ارتجاعی برای مصالح میله را محاسبه نمایید (ضریب شکل‌پذیری فولاد برابر μ می‌باشد).



تمرین ۵-۱

تفاوت ضرایب بار و مقاومت در روش LRFD آیین نامه AISC-2016 با ضوابط مبحث دهم ویرایش ۱۳۹۲ را بیان کنید.

تمرین ۶-۱

مثال ۱-۸ را با مقدار نیروی $E = -25\ ton$ حل نمایید.

تمرین ۷-۱

مثال ۱-۸ را با مقدار نیروی $W = -20\ ton$ حل نمایید.

تمرین ۸-۱

در مثال ۱-۸، نیروهای طراحی تکیه‌گاه سمت چپ را محاسبه نمایید:

الف) نیروی محوری مقاومت طراحی ستون (فشاری و کششی) معادل بیشترین و کمترین عکس‌العمل قائم تکیه‌گاه.

ب) نیروی برشی مقاومت طراحی ستون معادل عکس‌العمل افقی تکیه‌گاه.

تمرین ۹-۱

مثال ۸-۱ را با اعمال تغییر در شماره پروفیل، مجددا حل نمائید.

تمرین ۱۰-۱

مثال ۹-۱ را با افزودن یک ناودانی UNP20 به بال پائین، مجددا حل نمائید.

تمرین ۱۱-۱

در مثال ۱-۱۶ با معکوس کردن ناودانی و جابجایی آن به مقدار ۷,۵ سانتی‌متر در راستای افق (به سمت راست) گوشه ناودانی و پروفیل بر یکدیگر منطبق می‌شوند. مشخصات کامل مقطع حاصل را محاسبه نمایید.