سری عمران

فصل پنجم:

آشنایی با مفاهیم و محاسبات سازه‌های فولادی

فصل فولاد نیز مانند فصل استاندارد ۲۸۰۰، حاوی مطالب مفهومی و بعضاً پیچیده است که در قالب مجموعه مباحث جدول زیر، از مبحث دهم مقررات ملّی ساختمان و سایر کتب مرجع جمع‌آوری و تدوین شده است. مطالعه این فصل را با دقت کافی انجام دهید. توجه داشته باشید پاسخ دادن به برخی از سؤالات این فصل مستلزم درک و فهم عمیق مطالب آن است. در جدول زیر توزیع سؤالات آزمون‌های کارشناسی رسمی قوه قضائیه و دادگستری از سال ۸۸ تاکنون را مشاهده می‌کنید.

عنوان مجموعه مباحث	شمارهٔ بحث‌ها	تعداد سؤالات مطرح شده در آزمون‌های کارشناسی رسمی	
		قوهٔ قضائیه	دادگستری
مبانی فولاد و مباحث تکمیلی (پسماند، خوردگی، تورق و...)	۲-۱	۴	۱
تحلیل و طراحی اعضای خمشی (تیرها)	۴-۳	۶	۲
تحلیل و طراحی ستون‌های فولادی	۵	۷	۲
تحلیل و طراحی اعضای کششی و مفاهیم لرزه‌ای	۷-۶	۴	۲
مباحث تکمیلی (لانه‌زنبوری، مختلط، کف ستون، اتصالات)	۱۱-۸	۵	۳
بررسی ضوابط پیچ‌ها و رنگ‌آمیزی	۱۲	۱	۱

بحث ۱: آشنایی با فولاد

یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین مصالح مصرفی در صنعت ساختمان، فولاد است. مقاومت زیاد، شکل‌پذیری و سهولت اجرا با مقاطع فولادی، کار با این ماده را آسان و فراگیر کرده و به یکدیگر امکان ساخت سازه‌های مختلف را فراهم نموده است. همچنین نزدیک بودن مقاومت‌های کششی، فشاری و برشی این ماده به یکدیگر، طراحی آن را ساده‌تر می‌کند. بدیهی است قبل از هر چیز باید با این ماده و ویژگی‌های آن بیشتر آشنا شد. در حالت کلی محاسن و معایب فولاد را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- **محاسن:** مقاومت زیاد و در نتیجه کاهش وزن سازه و نیروی زلزله، یکنواختی و دوام در طول زمان (خزش ندارد)، قابلیت الاستیک، قابلیت چکش‌خواری یا شکل‌پذیری و تخریب پیش‌بینی شده، قابلیت توسعه سازه و اجرای سریع آن از محاسن فولاد است.
- **معایب:** هوازدگی، خوردگی، زنگ زدن در تماس با آب، مقاوم نبودن در برابر آتش‌سوزی و حساسیت در برابر کمانش از معایب فولاد است.

۱-۱- مواد تشکیل‌دهندهٔ فولاد

آهن فلزی است سنگین با وزن مخصوص ۷/۸۵ تن بر متر مکعب که در دمای ۱۵۳۰ درجه سلسیوس ذوب می‌شود. فولاد به‌صورت سنگ‌آهن به وفور در طبیعت و معادن یافت می‌شود. برای تولید فولاد ابتدا از سنگ‌آهن، آهن خام را تولید کرده (توسط عمل احیاء در کورهٔ بلند به وسیلهٔ کُک به عنوان منبع انرژی کارخانجات ذوب آهن) و در مرحلهٔ بعد پس از دفع مواد زائد و افزودن عناصری به آن، شمش فولادی را تولید می‌کنند. این آلیاژها اگرچه نهایتاً ٪۳ از وزن فولاد را تشکیل می‌دهند ولی تأثیر زیادی در خواص و مشخصات مکانیکی فولاد خواهند داشت. به‌طوری‌که بدون افزودن این مواد، قابل استفاده در صنعت ساختمان نمی‌باشد. در ادامه تأثیر اضافه کردن هر یک از مواد را با هم بررسی خواهیم کرد.

۱- **کربن (C):** افزودن کربن به فولاد، باعث افزایش مقاومت فولاد (تنش تسلیم) تا یک محدودهٔ مشخص شده ولی تردی و شکنندگی آن را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر بارهای ضربه‌ای و دینامیکی کاهش می‌دهد. همچنین کربن زیاد، خاصیت جوش‌پذیری فولاد و شکل‌پذیری آن را نیز به شدت کاهش می‌دهد.

۲- **منگنز (Mn):** باعث افزایش مقاومت فولاد در برابر ضربه و سایش شده و شکل‌پذیری آن را افزایش می‌دهد.

۳- **مولیبدن (MO):** باعث افزایش مقاومت گرمایی و سختی فولاد شده و شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد.

۴- **مس (Cu) و سیلیسیوم (Si):** باعث افزایش مقاومت فولاد در برابر خوردگی می‌شود.

۵- **نیکل (Ni):** باعث افزایش شکل‌پذیری فولاد می‌شود.

۶- **کُرُم (Cr):** باعث افزایش مقاومت فولاد در برابر زنگ‌زدگی می‌شود.

۱-۲- انواع فولاد

۱- **فولاد کربن‌دار:** اگر مقدار درصد کربن از ۲ درصد کمتر باشد، فولاد و اگر بین ۲ تا ۴/۵ درصد باشد آن را چدن می‌نامند. فولاد کربن‌دار فولادی است که علاوه بر آهن، کربن، مس، منگنز و سیلیکن هم دارد.

تذکر: فولاد ساختمانی رایج در ساختمان‌سازی، فولاد $\underline{ST\,37}$ بوده که درصد کربن آن بین ۰/۲۵ الی ۰/۲۹ درصد قرار داشته و در ردهٔ فولاد با کربن ملایم قرار می‌گیرد و به آن فولاد نرمه گفته می‌شود. تنش تسلیم این فولادها در بازهٔ مقابل قرار می‌گیرد: $۲۲۰۰\,kg/cm^۲ < F_y < ۲۴۰۰\,kg/cm^۲$

۲- فولاد پرمقاومت و کم‌آلیاژ: این فولاد با افزودن مقادیر ناچیزی کروم، مس، منگنز و ... به فولادهای کم‌کربن ساخته می‌شود. افزودن این آلیاژها، باعث ریزتر شدن ساختمان بلوری آهن و افزایش مقاومت آن می‌شود. تنش تسلیم این فولادها، در بازهٔ زیر قرار می‌گیرد: $۲۸۰۰\,kg/cm^۲ < F_y < ۴۸۰۰\,kg/cm^۲$

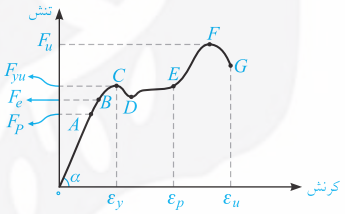
تذکر ۱: فولاد $\underline{ST\,۵۲}$ در ردهٔ فولادهای پرمقاومت و کم‌آلیاژ قرار دارد. این نوع از فولاد مقاومت قابل قبولی در مقابل جوشکاری داشته و برای این عمل، احتیاج به هیچ‌گونه پیش‌گرمایش و پس‌گرمایش ندارد.

تذکر ۲: اعداد بعد از ST در $ST\,۳۷$ و $ST\,۵۲$، مقاومت نهایی فولاد (F_u) را برحسب کیلوگرم بر میلی‌مترمربع $(kg/mm^۲)$ در آزمایش کشش نشان می‌دهند.

۳- فولاد آلیاژی آب‌دیدهٔ بازپخت شده: اگر فولادهای پرمقاومت و کم‌آلیاژ را آب داده و سپس بازپخت نماییم (عملیات اصلاح گرم)، می‌توان به تنش‌های تسلیم بیشتر از $۶۰۰۰\,kg/cm^۲$ رسید. عمل بازپخت، تنش تسلیم فولاد را افزایش داده و شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. برای جوشکاری در این فولادها احتیاج به تدابیر ویژه می‌باشد و این نوع فولاد، کاربرد زیادی در کارهای ساختمانی ندارد.

۱-۳- منحنی تنش - کرنش در فولاد نرمهٔ ساختمانی

کامل‌ترین نمودار تنش - کرنشی که می‌توان برای فولاد ساختمانی با استفاده از آزمایش کشش مستقیم میلهٔ فولادی تحت نیروی کششی P رسم کرد، مطابق شکل مقابل است:



در این نمودار موارد زیر حائز اهمیت است:

۱) هریک از نقاط A، B، C، D، E، F و G نمایندهٔ حد مشخصی در فولاد می‌باشند که عبارتند از:

نقطهٔ A: حد خطی
نقطهٔ B: حد الاستیک
نقطهٔ C: نقطهٔ تسلیم بالایی فولاد
نقطهٔ D: نقطهٔ تسلیم پایینی فولاد
نقطهٔ E: حد سخت‌شدگی مجدد
نقطهٔ F: نقطهٔ تنش ماکزیمم فولاد
نقطهٔ G: حد نهایی فولاد

۲) در ناحیهٔ OA، نمودار تنش - کرنش به‌صورت خطی تغییر کرده و شیب نمودار در این قسمت ثابت بوده و معرف مدول الاستیسیتهٔ فولاد است. $E=\tan\alpha$ و $f=E\varepsilon$

F_p حد تناسب تنش نام داشته و رفتار سازه تا این تنش، به‌صورت الاستیک و خطی بوده و از قانون هوک پیروی می‌کند. دقت شود که در مباحث فولادی، برای تنش به جای نماد σ معمولاً از نماد f استفاده می‌کنیم.

۳) در ناحیهٔ AB، نمودار تنش - کرنش به‌صورت خطی نبوده ولی ماده خاصیت الاستیک دارد. به عبارتی در صورت برداشتن بارگذاری از روی سازه، تغییرشکل پسماند صفر است.

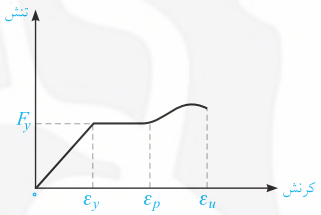
F_e حد الاستیک تنش نام داشته و از F_p تا F_e، رفتار ماده غیرخطی ولی الاستیک است.

۴ در ناحیهٔ DE، مقاومت قطعه به شدت پایین بوده و بدون افزایش در بار، تغییرشکل زیادی در قطعه ایجاد می‌شود.

۵ در ناحیهٔ EF(*strain hardening*)، فولاد مجدداً دچار مقاومت شده و قابلیت تحمل بار اضافی پیدا می‌کند. در این ناحیه با افزایش کرنش، تنش نیز افزایش می‌یابد. به این حالت سخت‌شوندگی کرنشی نیز گفته می‌شود.

نکات مهم:

۱ در فولاد نرمهٔ ساختمانی، نقاط A، B، C و D تقریباً بر یکدیگر منطبق بوده و با تقریب خوبی می‌توان آنها را با یک نقطه تخمین زد. با توجه به این موضوع، معمولاً از نمودار ایده‌آل تنش - کرنش مقابل برای فولاد استفاده می‌کنیم:



دقت شود که در نمودار تنش - کرنش ایده‌آل، حدود F_p، F_e و F_{yu} بر یکدیگر منطبق شده و برابر F_y است.

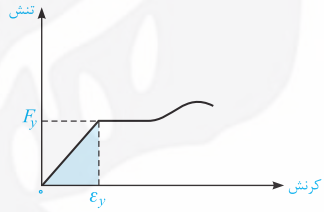
۲ در نمودار تنش - کرنش، سه ناحیه را با توجه به مقادیر کرنش مشخص می‌کنیم:

$0 < \varepsilon < \varepsilon_y$: ناحیهٔ الاستیک $\qquad \varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_p$: ناحیهٔ پلاستیک

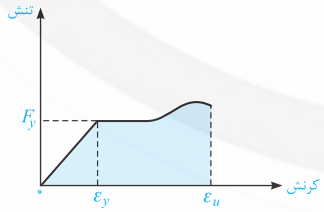
$\varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_u$: ناحیهٔ سخت‌شدگی مجدد

طول ناحیهٔ بین ε_p و ε_y مشخص‌کنندهٔ خاصیت شکل‌پذیری فولاد بوده و در طراحی پلاستیک سازه حائز اهمیت است.

۳ مساحت زیر نمودار تنش - کرنش، معادل انرژی کرنشی جذب شده توسط واحد حجم مصالح می‌باشد. با توجه به این موضوع، دو پارامتر زیر برای فولاد تعریف می‌شود:



فنریت: سطح زیر نمودار تنش - کرنش در ناحیهٔ الاستیک، معادل فنریت ماده است و به آن مدول برجهندگی نیز می‌گویند. این انرژی کرنشی پس از باربرداری حذف می‌شود زیرا تنش‌ها و کرنش‌ها در مصالح صفر می‌شود. با افزایش F_y، مساحت زیر نمودار در ناحیهٔ الاستیک افزایش یافته و فنریت ماده افزایش می‌یابد.



طاقت (چقرمگی): سطح زیر نمودار تنش - کرنش تا لحظهٔ شکست، معادل طاقت فولاد است و به آن مدول چقرمگی نیز می‌گویند. این پارامتر را معمولاً به شکل‌پذیری فولاد مرتبط می‌کنند.

برای جذب انرژی بیشتر در ناحیهٔ پلاستیک، بایستی از فولاد با طاقت بالاتر استفاده کرد.

۴ از نسبت ε_u (کرنش نهایی) به ε_y(کرنش تسلیم)، به عنوان شکل‌پذیری فولاد یاد می‌شود. هرچه این نسبت بزرگتر باشد، شکل‌پذیری سازه فولادی نیز بیشتر است.

$$\mu = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$$

۵ قابلیت چکش‌خواری از خواص مهم فولاد است که به‌صورت نسبت کرنش شروع ناحیهٔ سخت‌شدگی به کرنش شروع ناحیهٔ پلاستیک تعریف می‌شود و آن را با ψ نشان می‌دهند. فولاد نرمه قابلیت چکش‌خواری مناسب و فولادهای با مقاومت بالا قابلیت چکش‌خواری کمتری دارند.

۱-۴- مشخصات مصالح فولادی

مصالح به کار رفته شامل نیمرخ‌ها، ورق‌ها، تسمه‌ها، میلگردها، پرچ‌ها، پیچ‌ها، واشرها، مهره‌ها، میل‌مهارها، الکترودها و ... باید مطابق با استانداردهای ملّی ایران باشد. در صورتی که برای بعضی از مصالح استاندارد ایران تهیه نشده باشد، باید یکی از استانداردهای معتبر بین‌المللی (ترجیحاً استاندارد *ISO*) را مورد استفاده قرار داد. در ادامه به بررسی مهمترین مشخصات مصالح فولادی می‌پردازیم.

۱ فولاد سازه‌ای باید دارای مقاومت و شکل‌پذیری مناسب بوده و کاملاً جوش‌پذیر باشد. همچنین در بعضی از کاربردها، فولاد سازه‌ای باید طاقت ضربه‌ای مطلوب داشته و در برابر جداشدگی لایه‌ای مقاوم باشد. حدود کمی هر یک از مشخصه‌های مورد اشاره، در صورت نیاز باید در نقشه‌های اجرائی و مدارک فنی طرح معرفی گردیده یا به استانداردی که مشخصه‌های موردنظر را محدود نموده است، ارجاع داده شود.

۲ **ضریب ارتجاعی یا مدول الاستیسیته:** همان شیب منحنی تنش - کرنش فولاد قبل از جاری شدن مصالح بوده که با پارامتر E نشان داده می‌شود. مقدار این پارامتر برای همهٔ فولادهای متداول یکسان بوده و برابر است با:

$$E = ۲\times۱۰^{۵}\ MPa \simeq ۲\times۱۰^{۶}\ kg/cm^{۲}$$

۳ **تنش تسلیم و تنش نهایی:** تنش تسلیم یا تنش جاری شدن مصالح فولادی با F_y نشان داده شده و تنش نهایی با F_u بیان می‌شود. برای فولادهای رایج ST ۳۷ و ST ۵۲ داریم:

جدول ۱: تنش تسلیم و تنش نهایی در فولادهای ST ۳۷ و ST ۵۲

	تنش تسلیم (F_y)	تنش نهایی (F_u)
(ST ۳۷)	۲۴۰ MPa یا ۲۴۰۰ $kg/cm^{۲}$	۳۷۰ MPa یا ۳۷۰۰ $kg/cm^{۲}$
(ST ۵۲)	۳۶۰ MPa یا ۳۶۰۰ $kg/cm^{۲}$	۵۲۰ MPa یا ۵۲۰۰ $kg/cm^{۲}$

نکته: عناوین ST ۳۷ و ST ۵۲، نام‌های مرسوم برای فولادهای تولیدی در ایران هستند. در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، فولادهای دیگری مانند S ۲۳۵ و S ۳۵۵ برای فولادهای ساخت ایران بیان شده که تنش تسلیم آنها به‌ترتیب ۲۳۵ MPa و ۳۵۵ MPa می‌باشد.

تذکر ۱: مطابق مبحث دهم، تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد سازه‌ای (F_y) نباید از ۴۶۰ مگاپاسکال بیشتر باشد.

۴ **ضریب پواسون:** این مقدار با پارامتر υ نشان داده شده و برای مصالح فولادی برابر ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود.

۵ **مدول الاستیسیتهٔ برشی:** این مقدار با پارامتر G نشان داده شده و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$G = \frac{E}{۲(۱+\nu)} \xrightarrow{\upsilon = ۰/۳} G = \frac{E}{۲/۶} = \frac{۲\times۱۰^{۵}}{۲/۶} \simeq ۷/۷\times۱۰^{۴}\ MPa \simeq ۷/۷\times۱۰^{۵}\ kg/cm^{۲}$$

۶ **ضریب انبساط حرارتی:** این مقدار با پارامتر α نشان داده می‌شود و برابر $۱۲\times۱۰^{-۶}\ \frac{۱}{^\circ C}$ می‌باشد.

تذکر: پارامترهای E ، G ، υ و α در تمامی فولادها یکسان بوده و افزودنی‌های مختلف به فولاد بر روی آنها تأثیر چندانی ندارد.

۷ **چگالی یا وزن مخصوص:** این مقدار که معمولاً با نماد γ نشان داده می‌شود برای فولادهای متعارف $۷۸۵۰\ kg/m^۳$ می‌باشد.

نمونه سؤالات بحث (۱)

تمرین ۱: نماد ۵۲ ST معرف کدام‌یک از عبارات زیر است؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) فولاد با درصد کربن بالا با حداقل مقاومت نهایی ۵۲ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع در آزمایش کشش
۲) فولاد با حداقل مقاومت نهایی ۵۲ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع در آزمایش کشش
۳) فولاد با حداقل مقاومت نهایی ۵۲ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع در آزمایش خمش
۴) فولاد خشکه با حداقل مقاومت نهایی ۵۲ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع در آزمایش خمش

حل: براساس نکات درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۲: برای افزایش مقاومت فولاد در برابر خوردگی کدام مورد مناسب است؟ (دادگستری - ۷۶)

۱) رنگ کردن فولاد
۲) استفاده از فولاد پُرمقاومت
۳) افزودن آلیاژ مس
۴) همهٔ موارد

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳: برای افزایش مقاومت فولاد در برابر زنگ‌زدگی: (دادگستری - ۸۴)

۱) کربن فولاد را می‌گیرند.
۲) به آن مقداری فسفر اضافه می‌کنند.
۳) به آن مقداری گوگرد اضافه می‌کنند.
۴) به آن مقداری کُرُم اضافه می‌کنند.

حل: براساس نکات درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴: با افزایش مقدار کربن در آلیاژ فولاد:

۱) جوش‌پذیری فولاد بهتر می‌شود.
۲) فولاد شکننده شده، مقاومت آن افزایش یافته و جوش‌پذیری آن کاهش می‌یابد.
۳) فولاد شکننده شده، شکل‌پذیری آن افزایش یافته و جوش‌پذیری آن کاهش می‌یابد.
۴) هیچ تأثیری در خواص فولاد به‌وجود نمی‌آید.

حل: با توجه به توضیحات درسنامه، گزینه (۲) صحیح است.

بحث ۲: مباحث تکمیلی آشنایی با فولاد

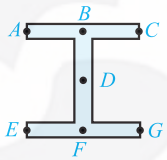
در این بخش به مباحث دیگری که در سازه‌های فولادی حائز اهمیت است می‌پردازیم.

۲-۱- اثر حرارت و تنش‌های پسماند

در تهیهٔ پروفیل‌های فولادی در مراحل مختلف عملیات نورد فولاد، سرد شدن غیریکنواخت پروفیل باعث ایجاد تنش پسماند در پروفیل می‌شود. در مورد تنش‌های پسماند، موارد زیر حائز اهمیت است:

۱) به‌طور معمول در نورد یک پروفیل، قسمت‌هایی از مقطع که تمرکز جرم کمتری دارند زودتر سرد شده و دچار تنش‌های پسماند فشاری می‌شوند. قسمت‌هایی که تمرکز جرم بیشتری دارند (مانند محل اتصال بال و جان تیر) دیرتر سرد شده و دچار تنش‌های پسماند کششی می‌شوند.

۲) در اثر جوشکاری نیز در مقطع تنش‌های پسماند ایجاد می‌شود که مقادیر آن، در مقایسه با تنش‌های پسماند ناشی از نورد فولاد بیشتر است. از طرفی عملیاتی مانند چکش‌کاری فولاد، تنش‌های پسماند را آزاد می‌کند.



به‌طور مثال در مقطع I شکل مقابل نقاطی مانند A، C، D، E و G زودتر سرد شده و نقاطی مانند B و F دیرتر سرد می‌شوند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در پنج نقطهٔ اول، تنش پسماند از نوع فشاری و در دو نقطهٔ دیگر از نوع کششی می‌باشد.

تذکر: باید توجه شود که تنش پسماند بر روی مقاومت نهایی عضو تحت کشش تأثیری نداشته و تأثیر آن بر روی مقاومت فشاری عضو است.

۲-۲- خستگی در فولاد

در یک سازهٔ فولادی تحت اثر نیروهای متناوب (مثل زلزله)، هنگامی که تعداد تناوب بارهای اعمالی زیاد شده و این بارها در سازه ایجاد تنش کششی کنند، بدون این که تنش ایجاد شده به حد تسلیم برسد، سازه می‌تواند دچار گسیختگی و شکست شود که این پدیده **خستگی** نام دارد. این پدیده در مورد پل‌ها، سازه‌های مرتبط با ماشین‌آلات مرتعش و سکوهای دریایی بیشتر مشاهده می‌شود.

۲-۳- مقاومت سازه‌های فولادی در برابر آتش‌سوزی

فولاد در مجاورت آتش‌سوزی به شدت آسیب‌پذیر بوده و در مدت ۱۰ الی ۲۰ دقیقه، مقاومت خود را به سرعت از دست می‌دهد. با انجام تدابیر مناسب برای سازه‌های فولادی، می‌توان مقاومت آنها را در مقابل آتش‌سوزی تا حدود ۳ ساعت حفظ کرد. این تدابیر عبارتند از:

۱) استفاده از رنگ‌های مخصوص مقاوم در برابر آتش‌سوزی

۲) استفاده از بتن‌پاشی و ملات ماسه سیمان به ضخامت $۱/۵\,cm$ و مدفون کردن فولاد در بتن

۳) استفاده از گچ‌کاری‌های مخصوص

تذکر: با افزایش درجهٔ حرارت، تنش تسلیم فولاد (F_y) و مدول یانگ (E) آن کاهش می‌یابد. این موضوع از بزرگترین عیوب سازه‌های فولادی بوده و باعث تخریب سریع آنها در آتش‌سوزی می‌شود.

حفاظت ساختمان‌ها در برابر آتش باید مطابق با الزامات مبحث سوم مقررات ملی ساختمان صورت گیرد. درجه‌بندی مقاومت اعضای سازه‌های فولادی در برابر آتش برحسب نوع ساختار و نوع عضو سازه‌ای تابعی از مساحت، ارتفاع و تصرف با توجه به مقررات مبحث مذکور تعیین می‌گردد که در محدودهٔ ۱ تا ۳ ساعت است.

۲ روش‌های حفاظت در برابر آتش عبارت است از رنگ‌های پف‌کننده، تخته‌های مقاوم در برابر حریق، حفاظت با استفاده از بتن، حفاظت با استفاده از گچ برگ‌ها، حفاظت با استفاده از مواد حفاظتی پایه معدنی پاششی، حفاظت با استفاده از بلوک‌های بنایی

۳ مقدار ضریب انبساط حرارتی در دماهای بالا به شرح زیر تعیین می‌شود:

- فولاد ساختمانی و میلگردها: ضریب انبساط حرارتی در دماهای بالاتر از ۶۶ درجه سلسیوس برابر $۱/۴\times۱۰^{-۵}/^{\circ}C$ در نظر گرفته شود.
- بتن معمولی: ضریب انبساط حرارتی در دماهای بالاتر از ۶۶ درجه سلسیوس برابر $۱/۸\times۱۰^{-۵}/^{\circ}C$ در نظر گرفته شود.
- بتن سبک: ضریب انبساط حرارتی در دماهای بالاتر از ۶۶ درجه سلسیوس برابر $۰/۷۹\times۱۰^{-۵}/^{\circ}C$ در نظر گرفته شود.

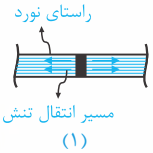
۴ مقاومت و سختی مصالح با افزایش دما کاهش می‌یابد.

۲-۴- خوردگی در فولاد

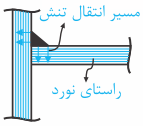
فولاد تحت اثر شرایط محیطی با واکنش‌های شیمیایی خورده شده و مقاومت آن کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. برای حفاظت فولاد در برابر خوردگی از روش‌های حفاظت کاتدی، رنگ کردن و ... استفاده می‌شود.
فولادهای پرمقاومت و کم آلیاژ، مقاومت خوردگی به مراتب بیشتری نسبت به فولادهای نرمهٔ معمولی دارند. برای بهبود مقاومت فولادهای نرمه در برابر خوردگی از مس یا سیلیسیوم استفاده می‌شود.
تذکر: برای سازه‌هایی که به‌صورت جدی در معرض خوردگی قرار دارند توصیه می‌شود از فولادهای زنگ نزن با آلیاژهای کرم، نیکل و مولیبدن استفاده شود.

۲-۵- تورق در فولاد

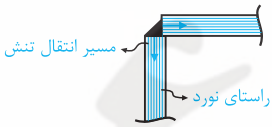
یک قطعه چوب را در نظر بگیرید. ساختار چوب مجموعه‌ای از الیاف به هم فشرده و به موازات هم بوده و درنتیجه مقاومت کششی چوب در امتداد طولی (به موازات الیاف)، به مراتب بیشتر از امتداد عرضی (عمود بر الیاف) است.
نورد فولاد نیز همین ویژگی را با شدت کمتری در فولاد به وجود می‌آورد. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که در جوشکاری، فلز جوش هنگام سرد شدن جمع می‌شود و اگر جهت قرارگیری دو قطعه از نظر هندسی مناسب نباشد (عمود بر امتداد الیاف فرضی) گسیختگی داخلی در امتداد سطح الیاف ایجاد می‌شود که به آن تورق یا ورقه ورقه شدن می‌گویند که یک نوعی از تردشکنی است. در یک جوشکاری صحیح باید تنش‌های ناشی از جوشکاری، به موازات راستای نورد باشد تا از شکست ترد اتصال جلوگیری شود. به عنوان مثال می‌توان به شکل‌های زیر اشاره کرد که در آن جوشکاری انجام شده در شکل (۲) مناسب نمی‌باشد.



(۱)



(۲)



(۳)

۲-۶- آشنایی با پروفیل‌های فولادی

در کشور ما، از دیرباز مقاطع فولادی با استاندارد اروپایی نظیر *DIN* آلمان معمول بوده و کارخانجات ذوب‌آهن در ایران نیز چنین مقاطعی را به بازار عرضه می‌کنند. پروفیل‌های فولادی رایج و موارد استفادهٔ آنها به شرح زیر است:

۱) *INP*- این مقطع برای تحمل لنگرهای خمشی در تیرها می‌باشد. مزیت این مقطع سبکی وزن و ممان اینرسی بزرگ نسبت به محور افقی می‌باشد. از طرفی این مقاطع دارای ممان اینرسی کم حول محور قائم خود هستند. به علت شیب بال‌ها، این مقاطع برای اتصالات پیچی و پرچی کاربرد مناسبی ندارند. امروزه از این مقطع کمتر استفاده می‌شود.

۲) *IPE*- معروف‌ترین پروفیل مورد استفاده در صنعت ساختمان است. دارای خواص مشابه *INP* بوده و کاربرد عمدهٔ آن استفاده به عنوان عضو خمشی است. این مقاطع دارای پهنای بال بیشتر بوده و به علت مسطح بودن بال، برای اتصالات پیچی و پرچی مناسب هستند.

۳) *IPB*- این نیمرخ‌ها با نام مقاطع *I* شکل بال پهن یا *H* شکل موسوم می‌باشند. عرض بال این مقاطع برای پروفیل‌های تا عمق ۳۰۰ میلی‌متر، با عمق مقطع مساوی است. ممان اینرسی این مقاطع حول دو محور مناسب بوده و نسبت ممان اینرسی حول محور ضعیف به قوی، در این‌گونه نیمرخ‌ها بیشتر از این نسبت برای نیمرخ‌های *IPE* و *INP* است. استفاده از این مقاطع به‌صورت تکی برای ستون‌ها امکان‌پذیر است. در تیرها از این مقطع استفاده نمی‌شود.

۴) ناودانی *C*- این نیمرخ‌ها تنها دارای یک محور تقارن می‌باشند و کاربرد آنها به‌صورت تکی معمولاً تولید پیچش می‌کند. این نیمرخ‌ها به‌صورت جفت برای ستون‌ها و بادبندها کاربرد دارند و به‌صورت تکی نیز به عنوان لاپه برای پوشش سقف‌های شیب‌دار به کار می‌روند.

۵) نبشی *L*- این نیمرخ به‌صورت بال مساوی و یا نامساوی تولید می‌شود. بیشترین کاربرد نبشی‌ها در ساختمان، نشیمن اتصالات مفصلی تیر به ستون، اتصال خورجینی، اتصال ستون به صفحه ستون و از نمره‌های کوچکتر آن برای شاسی‌کشی آسانسور و اجرای نماهای ساختمانی و زیرسازی آن استفاده می‌شود.

۶) *Z* شکل- از این نیمرخ بیشتر در پوشش سقف‌های شیبدار (لاپه‌ها) استفاده می‌شود. بعضی از کارخانجات فولادسازی اعضایی با نورد سرد با مقاطعی به شکل *Z* و ناودانی تولید می‌کنند.

۲-۷- سازهٔ فولادی یا بتنی

یکی از رایج‌ترین سؤالات از مهندسین عمران این است که ساختمان فولادی مناسب‌تر است یا بتنی؟ در حالت کلی باید گفت در صورت طراحی مناسب با اصول آیین‌نامه، تفاوت خاصی در بحث پایداری بین آنها وجود ندارد. اما نکاتی در این موضوع حائز اهمیت است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۱ معمولاً هزینهٔ مصالح و اجرای یک ساختمان با اسکلت فولادی مقداری بیشتر از اسکلت بتنی است.

۲ برای ساخت اسکلت فولادی نیاز به خرید یکبارهٔ آهن‌آلات و داشتن سرمایهٔ اولیه است در حالی‌که در ساختمان بتنی طبقه به طبقه می‌توان مصالح را تهیه کرد.

۳ زمان ساخت اسکلت فولادی سریع‌تر است و در ساختمان بتنی مجبور به گذراندن زمان برای کسب مقاومت لازم در بتن طبقات پایین هستیم.

۴ در ساختمان فولادی المان‌های کنترلی کمتری برای نظارت وجود دارد. به‌طور مثال اگر جوش یا اجرای اتصال پیچی مناسب باشد عامل دیگری برای کنترل وجود ندارد. اما در ساختمان بتنی از تولید تا اجرای بتن عواملی چون طرح اختلاط، سیمان، سنگدانه، افزودنی، آب مناسب برای تولید بتن، حمل بتن، تراکم، عمل‌آوری، مشخصات میلگردها، طول‌های پوشش و مهاری و... باید کنترل شود تا اطمینان کافی از اجرای مناسب بتن داشته باشیم.

۵ اسکلت‌های فولادی مقاطع تیر و ستون کوچکتری نسبت به اسکلت بتنی دارند. این موضوع از نظر طراحی معماری و ایجاد فضاهای بهتر مناسب‌تر است.

۶ سازه‌های فولادی غالباً در برابر اثرات آتش‌سوزی حساس‌ترند و برای مقاوم کردن آنها توصیه می‌شود از پوشش‌های ضد حریق برای مقاطع استفاده شود، در صورتی‌که سازه‌های بتنی تحمل حرارت‌های بالاتری را دارند.

۷ در سازه‌های فولادی تمام المان‌ها و جزئیات نمایان هستند و در صورت داشتن نقص می‌توان آن را اصلاح یا مرمت کرد، اما در سازه‌های بتن‌آرمه بسیاری از المان‌ها داخل بتن مدفون شده و اصلاح آنها احتمالاً یا امکان‌پذیر نبوده و یا با خرابی همراه است.

نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۵: بروز پدیدهٔ تورق یا پارگی لایه لایه در اتصالات جوشی عمدتاً به دلایل زیر می‌باشد: (قوهٔ قضائیه - ۸۰)

۱) وجود ناخالصی‌های غیرفلزی در شمش فولادی که در اثر نورد به صورت لایه لایه قرار می‌گیرند.

۲) هندسهٔ اتصال

۳) هر دو

۴) هیچ‌کدام

حل: با توجه به مفاهیم درسنامه، نحوهٔ قرارگیری المان‌ها در کنار هم در هنگام جوشکاری یا به عبارتی دیگر هندسهٔ اتصال در ایجاد پدیدهٔ تورق نقش اساسی دارد. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۶: اسکلت بتنی در برابر آتش‌سوزی مقاوم‌تر است یا اسکلت فولادی؟ (دادگستری - ۷۰)

۱) اسکلت بتنی ۲) اسکلت فولادی ۳) هر دو یکسان هستند ۴) هیچ‌کدام

حل: با توجه به نکات درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۷: برای کدام‌یک از اجزای سازه موضوع خستگی اهمیت بیشتری دارد؟

۱) تیر ۲) ستون ۳) بادبند ۴) صفحه ستون

حل: با توجه به مطالب درسنامه، خستگی در اثر بارگذاری متناوب و فقط در اعضای کششی می‌تواند منجر به تردشکنی آنها شود. بنابراین بادبندها که در اثر بارگذاری ناشی از زلزله به تناوب به فشار و کشش می‌افتند اهمیت بیشتری در خستگی خواهند داشت. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

بحث ۳: طراحی اعضا براساس خمش

یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در طراحی المان‌ها و اعضای سازه‌های فولادی موضوع خمش و تنش‌های ناشی از آن است. اعضای سازه‌های فولادی با معیار خمش طراحی می‌شوند و سپس با سایر معیارها مانند برش و پیچش کنترل می‌شوند. برای آشنایی با مفاهیم این بحث همراه ما باشید.

۳-۱- مبانی طراحی

در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مبنای طراحی سازه‌ها، بررسی و کنترل آن‌ها در حالت‌های حدی برای حصول ایمنی و قابلیت بهره‌برداری است.

۳-۱-۱- حالت‌های حدی

حالت‌های حدی به شرایطی اطلاق می‌شوند که اگر تمام یا بخشی از سازه به هر یک از آن حالت‌ها برسند، قادر به انجام وظایف خود نبوه و از حیز انتفاع خارج می‌شوند. مطابق مبحث دهم، تعیین پیکربندی، ابعاد و مشخصات اجزای سازه باید به نحوی باشد که مجموعهٔ سازه، شامل اعضا و اتصالات آن، تحت شرایط بارگذاری محتمل، به هیچ یک از حالت‌های حدی زیر نرسد.

۱ حالت‌های حدی مقاومت

حالت‌های حدی مقاومت حالت‌هایی هستند که مجموعهٔ سازه، شامل اعضا و اتصالات آن، ضمن حفظ انسجام خود، تحت اثر ترکیبات مختلف بارگذاری تا رسیدن به آن حالت‌ها (نظیر تسلیم، گسیختگی، کمانش و...) از مقاومت کافی و شکل‌پذیری مورد نیاز برخوردار بوده و پس از رسیدن به هر یک از آنها پایداری خود را از دست می‌دهند.

۲ حالت‌های حدی بهره‌برداری

حالت‌های حدی بهره‌برداری حالت‌هایی هستند که مجموعهٔ سازه، شامل اعضا و اتصالات آن، تا حد رسیدن به آن حالت‌ها (نظیر قابلیت نگهداری، حفظ ظاهر، دوام، آسایش و ...) وظایف خود را به‌طور کامل انجام می‌دهند و پس از رسیدن به هر یک از آنها قادر به انجام وظایف خود نخواهند بود.

۳-۱-۲- طراحی براساس حالت‌های حدی مقاومت

مطابق این مبحث، برای تأمین الزامات حالت‌های حدی مقاومت، استفاده از روش ضرایب بار و مقاومت (به اختصار *LRFD*) یا روش مقاومت مجاز (به اختصار *ASD*) قابل قبول بوده، لیکن در یک سازهٔ فولادی، به‌کارگیری هم‌زمان دو روش مورد اشاره قابل قبول نیست.

- در طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت (*LRFD*)، دو دسته ضرایب ایمنی به شرح زیر در تحلیل و طراحی منظور می‌گردد:

الف) ضرایب بار (γ)، که مقدار آنها به میزان عدم اطمینان در برآورد مقدار بارها و ایجاد بحرانی‌ترین شرایط در ترکیبات بارگذاری بستگی دارد، مقدار این ضرایب بار باید مطابق با ترکیبات بارگذاری ارائه شده در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان باشد. این ضرایب اکثراً بزرگ‌تر از یک و ندرتاً برابر یک یا کوچک‌تر از یک هستند.

ب) ضرایب کاهش مقاومت (ϕ)، که مقدار آنها با توجه به دقت تئوری‌های مقاومت مصالح مورد استفاده، نوع حالت حدی مقاومت، تغییرات احتمالی مشخصات مصالح و رواداری‌های ابعادی مقطع تعیین می‌گردد. مقادیر ضریب کاهش مقاومت (ϕ) در مبحث دهم برای هر عضو، اتصال یا جزء سازه‌ای ارائه شده‌اند. این ضرایب عموماً کوچک‌تر یا حداکثر مساوی یک هستند.

- در طراحی به روش مقاومت مجاز (ASD) نیز دو دسته ضرایب ایمنی به شرح زیر در تحلیل و طراحی منظور می‌گردد:

الف) ضرایب بار (γ) که از ترکیبات بار معرفی شده در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان برای روش طراحی مقاومت مجاز به دست می‌آیند. این ضرایب اکثراً مساوی یک و ندرتاً کوچک‌تر از یک هستند.

ب) ضرایب اطمینان (Ω) که مقادیر آنها با توجه به عدم قطعیت‌های طراحی، نوع حالت حدی مقاومت و اهمیت عضو، اتصال یا جزء سازه‌ای در فصل‌های مبحث دهم معرفی شده است. مقادیر Ω عموماً بین ۱/۵ تا ۲/۰ در تغییر هستند.

نکته ۱: در طراحی برای حالت‌های حدی مقاومت، حالت‌های حدی تسلیم، گسیختگی، کمانش، تشکیل مکانیزم خمیری، ناپایداری و واژگونی باید مورد کنترل قرار گیرند.

نکته ۲: در روش ضرایب بار و مقاومت، طراحی اعضای مختلف سازه باید چنان صورت گیرد که مقاومت طراحی (ϕR_n) بزرگ‌تر یا مساوی مقاومت مورد نیاز (R_u) باشد. یعنی

$$R_u \le \phi R_n$$

در رابطه فوق هر یک از پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

R_u = مقاومت مورد نیاز که منظور از آن همان نیروهای داخلی موجود در مقطع موردنظر تحت اثر ترکیبات مختلف بارگذاری است. در طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت، نیروهای داخلی باید براساس تحلیل سازه تحت اثر ترکیبات بارگذاری نظیر حالت‌های حدی مقاومت مندرج در مبحث ششم مقررات ملّی ساختمان تعیین شود.

ϕ = ضریب کاهش مقاومت.

R_n = مقاومت اسمی عضو می‌باشد.

۳-۱-۳- طراحی براساس حالت‌های حدی بهره‌برداری

مجموعهٔ سازه، شامل اعضا و اتصالات آن، باید از نظر قابلیت بهره‌برداری مورد کنترل و طراحی قرار گیرند. الزامات حالت‌های حدی بهره‌برداری در بخش بعدی ارائه شده است. ترکیبات بارگذاری نظیر حالت‌های حدی بهره‌برداری باید مطابق با ترکیبات بارگذاری ارائه شده در مبحث ششم مقررات ملّی ساختمان باشد. در این حالت هیچ‌گونه ضرایب کاهش مقاومت در نظر گرفته نمی‌شود.

نکته: معیارهای طراحی برای تأمین الزامات حالت‌های حدی بهره‌برداری باید مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شوند.

جدول ۲ : معیارهای طراحی برای تأمین الزامات حالت‌های حدی بهره‌برداری

ردیف	معیار طراحی
۱	کنترل تغییرشکل
۲	کنترل تغییرمکان‌های جانبی
۳	کنترل ارتعاش (لرزش)
۴	ملاحظات پیش‌خیز
۵	ملاحظات آثار ناشی از حرکت باد
۶	کنترل اثرات تغییر دما و خودکرنشی
۷	کنترل لغزش اتصالات

۳-۲- اصول تحلیل

هدف از تحلیل سازه، تعیین مقاومت مورد نیاز (R_u) و یا نیروهای داخلی در قطعات مختلف سازه و تغییرمکان نقاط مختلف تحت اثر ترکیبات بارگذاری موردنظر، با در نظر گرفتن مشخصات هندسی و مکانیکی آنها است. در مبحث دهم روش‌های تحلیل زیر مجاز می‌باشند:

۱) **تحلیل الاستیک:** در این روش تحلیل، کلیهٔ نیروهای داخلی در مقاطع مختلف قطعات سازه با فرض الاستیک بودن رفتار مصالح و کوچک بودن تغییرشکل‌های ایجاد شده و براساس تئوری الاستیسیته تعیین می‌شوند. استفاده از این روش تحلیل برای بررسی و کنترل معیارهای طراحی هر دو حالت حدی مقاومت و بهره‌برداری مجاز است.

۲) **تحلیل غیرالاستیک:** در این روش تحلیل، کلیهٔ نیروهای داخلی در مقاطع مختلف قطعات سازه با توجه به رفتارهای غیرالاستیک سازه تعیین می‌شوند. کاربرد این روش تحلیل فقط محدود به بررسی و کنترل معیارهای طراحی حالت‌های حدی مقاومت بوده و از آن نمی‌توان برای بررسی و کنترل معیارهای طراحی حالت‌های حدی بهره‌برداری استفاده کرد.

۳-۲- مشخصات مقاطع

مشخصات مقاطع به‌طور مستقیم در طراحی مقاطع فولادی نقش دارند و لازم است تا آنها را بشناسیم. بنابراین در این بخش و در قالب جدول به‌طور اختصار به معرفی هر یک از آنها می‌پردازیم:

جدول ۳ : مشخصات مقاطع

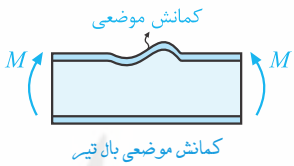
ردیف	نام پارامتر	نماد	واحد	رابطهٔ محاسبه	توضیحات و کاربرد
۱	سطح مقطع	A	mm^2	—	● برای مقاطع معروف با مراجعه به اشتال به‌دست می‌آید. ● برای مقاطع ترکیبی از مجموع مساحت‌ها به‌دست می‌آید. ● در اکثر مسائل به‌ویژه محاسبهٔ ظرفیت محوری ستون‌ها کاربرد دارد.
۲	محور خنثی الاستیک (تار خنثی)	$\bar{y}_e$	mm	$\bar{y}=\frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i}$	● مکان هندسی نقاطی از مقطع که در آنها تغییر طول نسبی در خمش برابر صفر است. ● برای محاسبهٔ ممان اینرسی (I) مقاطع کاربرد دارد. ● تنش روی تار خنثی برای مقاطع تحت خمش برابر صفر است.
۳	محور خنثی پلاستیک	y_p	mm	$A_t = A_p$	● مکان هندسی نقاطی از مقطع که مساحت بالا و پایین آن یکسان است. ● برای محاسبهٔ اساس مقطع پلاستیک و لنگر خمشی پلاستیک مقطع کاربرد دارد.

ادامهٔ جدول ۳ : مشخصات مقاطع

ردیف	نام پارامتر	نماد	واحد	رابطهٔ محاسبه	توضیحات و کاربرد
۴	ممان اینرسی	I	mm^4	$I = I_\circ + Ad^2$	به عبارتی توانایی هندسی مقطع در مقابل خمش می‌باشد. هرچه مقدار آن بیشتر باشد ظرفیت خمشی عضو بیشتر است. در تعیین اساس مقطع الاستیک و لنگر خمشی الاستیک مقطع کاربرد دارد. در محاسبهٔ تنش‌های برشی و ظرفیت محوری ستون‌ها هم کاربرد دارد.
۵	اساس مقطع الاستیک	S	mm^3	$S = \frac{I}{C}$	بیانگر مقاومت مقطع در برابر لنگر خمشی است. در محاسبهٔ لنگر خمشی الاستیک مقطع کاربرد دارد. هرچه مقدار آن بیشتر باشد، ظرفیت خمشی الاستیک مقطع بیشتر است.
۶	اساس مقطع پلاستیک (خمیری)	Z	mm^3	$Z = \sum A_i \bar{y}_i$	برای تعیین مقاومت خمشی پلاستیک مقطع کاربرد دارد. هرچه مقدار آن بیشتر باشد ظرفیت خمشی عضو بیشتر است.
۷	ممان استاتیک	Q	mm^3	$Q = A\bar{y}$	در تعیین اساس مقطع پلاستیک و محاسبهٔ نیروی وارد بر بخشی از مقطع کاربرد دارد.
۸	شعاع ژیراسیون	r	mm	$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$	در محاسبهٔ ظرفیت محوری فشاری ستون‌ها کاربرد دارد. هرچه مقدار آن بیشتر باشد مقاومت فشاری عضو بیشتر است.
۹	ثابت پیچشی	J	mm^4	$J = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{3} bt^3$	بیانگر مقاومت مقطع تحت لنگر پیچشی می‌باشد. در تعیین ظرفیت مقطع در حالت کمانش پیچشی ـ جانبی کاربرد دارد.
۱۰	ضریب شکل	SF	–	$SF = \frac{M_p}{M_y} = \frac{Z}{S}$	یک پارامتر بدون بُعد است. هرچه کوچکتر باشد لنگر پلاستیک و الاستیک به هم نزدیکتر شده و از ظرفیت مصالح بیشتر استفاده می‌شود. برای مقاطع I شکل بین ۱/۱ تا ۱/۲ می‌باشد (مقطع ایده‌آل)
۱۱	لنگر الاستیک (تسلیم)	M_y	$ton.m$	$M_y = F_y S$	کمترین لنگری است که باعث شروع جاری شدن تارهای مقطع می‌شود. مقدار آن وابسته به نوع فولاد و شکل مقطع می‌باشد.
۱۲	لنگر پلاستیک	M_p	$ton.m$	$M_p = F_y Z$.	لنگری است که باعث جاری شدن تمام مقطع می‌شود. مقدار آن وابسته به نوع فولاد و شکل مقطع می‌باشد.

۳-۳- اصول طراحی تیرها

در طراحی قطعات خمشی (تیرها)، دو موضوع بـر مقـدار مقاومـت خمـشی مقطع تأثیر مستقیم دارد:



الف) کمانش موضعی: بر اثر لنگرهای خمشی وارد بر مقطع، یکی از بال‌های مقطع تحت فشار قرار می‌گیرد. با توجه به کم بودن ضخامت بال و جان در مقاطع I شکل اگر نسبت پهنا به ضخامت در جان و بال محدود نشده باشد، مقطع تحت اثر تنش‌های فشاری تمایل به کمانش به صورت موضعی دارد. کمانش موضعی اجزاء مقطع تحت بارهای وارده یک ضعف محسوب می‌شود و موجب کاهش ظرفیت مقطع خواهد شد.

نکته: به منظور کنترل نسبت پهنا به ضخامت در مقاطع مختلف و در نتیجه استفاده بهینه از مصالح و رسیدن به مقاومت‌های خمشی بیشتر، آیین‌نامه محدودیت‌هایی را برای مقاطع مختلف بیان کرده است. در تمام این محدودیت‌ها رابطهٔ زیر را مشاهده خواهید کرد:

$$\frac{b}{t} \le \alpha \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

در این رابطه، b عرض بال یا جان مقطع و t ضخامت آن می‌باشد. ضریب α با توجه به مقاطع مختلف مقادیر متفاوتی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید نسبت فوق با پارامتر E رابطهٔ مستقیم و با F_y رابطهٔ عکس دارد.

به عبارتی در صورت استفاده از فولاد قوی‌تر عبارت $\frac{b}{t}$ کاهش می‌یابد.

درصورتی‌که به یک مقطع، لنگر خمشی وارد شود قسمتی از مقطع تحت کشش و قسمتی دیگر تحت فشار قرار می‌گیرد. در این‌صورت مقطع یکی از سه وضعیت زیر را دارد:

۱) **مقطع فشرده:** اگر اتصال بال به جان مقطع به‌صورت سرتاسری و پیوسته باشد و در ناحیهٔ فشاری مقطع، نسبت پهنا به ضخامت همهٔ اجزای مقطع از مقدار λ_p تجاوز نکند.

۲) **مقطع غیرفشرده:** اگر نسبت پهنا به ضخامت یک یا چند جزء مقطع از مقدار λ_p بیشتر بوده ولی از λ_r کمتر باشد.

۳) **مقطع با اجزای لاغر:** اگر نسبت پهنا به ضخامت یک یا چند جزء مقطع از λ_r بیشتر شود.

تذکر: در مورد کمانش موضعی به نکات زیر توجه کنید:

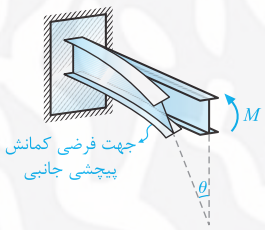
- مقادیر λ_p و λ_r محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای هستند که با نسبت $\frac{E}{F_y}$ رابطه مستقیم دارند. از آن جا که پارامتر E مقدار ثابتی دارد می‌توان گفت با افزایش F_y، مقدار λ_p , λ_r کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر برای تأمین شرایط باید از پهنای کمتر و ضخامت بیشتر برای مقاطع استفاده کرد.

ضریب α با توجه به نوع مقطع و هندسه آن مطابق جداول مبحث دهم تعیین خواهد شد.

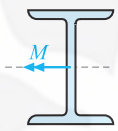
$$\frac{b}{t} \le \alpha \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

- مطابق آیین‌نامه استفاده از مقاطع لاغر در بال (کمانش موضعی در بال رخ دهد) به هیچ‌وجه مجاز نمی‌باشد. اما در صورتیکه مقطع لاغر در جان باشد می‌توان در تیرورق‌ها از آن استفاده کرد که البته این موضوع باعث کاهش تنش مجاز مقطع خواهد شد.
- پروفیل‌های نورد شدهٔ کارخانه‌های ذوب آهن معمولاً پروفیل‌های فشرده هستند.
- برای مقاطع با بال فشاری فشرده لزومی به در نظر گرفتن کمانش موضعی بال فشاری نمی‌باشد.

ب) کمانش کلی یا کمانش بال فشاری (پیچشی - جانبی): تیر نشان داده شده در شکل مقابل را درنظر بگیرید. برای درک بهتر مفاهیم کمانش پیچشی ـ جانبی با توجه به شکل مقابل، به موارد زیر اشاره می‌کنیم:



- با توجه به لنگر وارد شده بر تیر، قسمت بالایی تیر تحت فشار و قسمت پایینی آن تحت کشش قرار دارد.



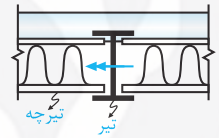
- اصولاً کمانش را در بال فشاری و حول یکی از محورهای (۱-۱) و (۲-۲) می‌توان بررسی کرد. با توجه به وجود جان، احتمال کمانش حول محور (۱-۱) ضعیف بوده و کمانش محور (۲-۲) محتمل‌تر است.

- با توجه به مفاهیم مقاومت مصالح، مقاطع به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی تمایل به خم شدن حول محورهای قوی را نداشته و به همین دلیل به سمت محور ضعیف تمایل پیدا می‌کنند. در صورتی که جلوی این رفتار گرفته نشود، عضو در سرتاسر طول خود تحت کمانش قرار می‌گیرد. این کمانش به گونه‌ای است که قسمت فشاری عضو از میانتار اولیهٔ خود خارج شده و مقطع دچار کمانش پیچشی - جانبی می‌شود. وضعیت این نوع کمانش در شکل زیر نشان داده شده است:

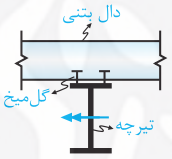
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بال کششی در هنگام کمانش تغییرمکان کمی داشته و تا حد امکان از ایجاد کمانش بال فشاری جلوگیری می‌کند.

- این نوع کمانش به ابعاد بال فشاری و طول آزاد آن بستگی دارد. تغییر ابعاد بال فشاری، در اکثر موارد، گزینهٔ مناسبی برای جلوگیری از این نوع کمانش نمی‌باشد و در عمل با استفاده از تکیه‌گاه جانبی در نقاط مختلف تیر یا در کل طول آن جلوی این نوع کمانش گرفته می‌شود.
- کمانش پیچشی - جانبی هنگامی رخ می‌دهد که تیر حول محور قوی خم می‌شود. در خمش حول محور ضعیف، تیرها همواره مهار جانبی شده محسوب می‌شوند و اصولاً کمانش پیچشی ـ جانبی برای آنها رخ نمی‌دهد. به‌عنوان مثال وضعیت مهار جانبی شدن تیرچه‌های فولادی واقع در سقف‌های کامپوزیت، تیرچه بلوک و طاق‌ضربی را بررسی کنیم:

مقاطعی که بال فشاری آنها در داخل سقف بتنی قرار دارد، مهار جانبی شده درنظر گرفته می‌شوند. از جملهٔ این سقف‌ها، می‌توان به سقف‌های کامپوزیت و تیرچه بلوک هنگامی‌که بر آنها لنگر مثبت وارد می‌شود اشاره کرد.

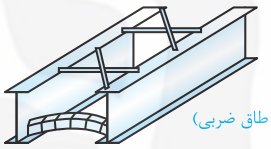


(سقف تیرچه بلوک)



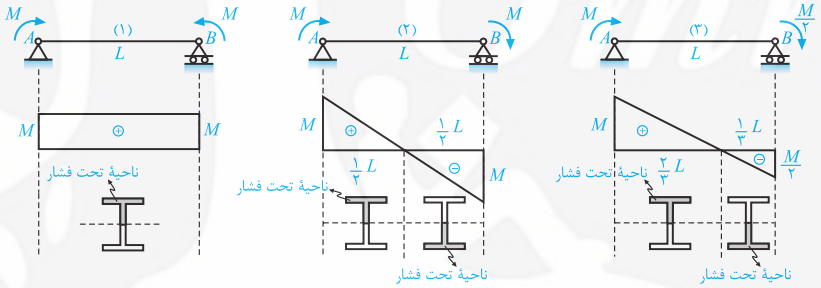
(سقف کامپوزیت)

در سقف طاق‌ضربی تأمین تکیه‌گاه‌های جانبی مناسب مشکوک به نظر می‌رسد. اما استفاده از میلگردهای ضربدری در هر دهانه، می‌تواند تا حدودی سبب مهار جانبی شدن تیرچه‌ها در سقف طاق‌ضربی شود.


(سقف طاق ضربی)

۳-۴- مفهوم ضریب C_b (ضریب اصلاح کمانش پیچشی ـ جانبی)

در بحث کمانش پیچشی جانبی، یکی از مهمترین موضوعاتی که باید به آن توجه شود، مفهوم انحنای ساده و مضاعف است. برای درک بهتر این مفهوم، به سه تیر مهار جانبی نشده که در آنها نمودار لنگر خمشی و ناحیهٔ تحت فشار رسم شده است، توجه کنید:



در مورد این سه تیر، می‌توان به موارد زیر توجه کرد:

۱ در هر سه تیر، حداکثر لنگر خمشی برابر M بوده و می‌خواهیم وضعیت کمانش پیچشی - جانبی در آنها را مقایسه کنیم.

۲ در تیر (۱)، لنگر وارد بر تیر مثبت بوده و ناحیهٔ تحت فشار در تمام طول تیر، در بالا قرار دارد. در این حالت نیمهٔ بالایی تیر در طول L، مانند یک ستون که تحت نیروی فشاری است، قصد کمانش دارد.

۳ در تیر (۲) با توجه به تغییر علامت لنگر، عملاً در $\frac{L}{۲}$ از سمت چپ تیر نیمهٔ بالایی تحت فشار است و در $\frac{L}{۲}$ از سمت راست تیر نیمهٔ پایینی تیر تحت فشار است. در این حالت گویی سمت چپ تیر در نیمهٔ بالایی با طول $\frac{L}{۲}$ قصد کمانش دارند و همچنین در سمت راست تیر نیمهٔ پایینی با طول $\frac{L}{۲}$ قصد کمانش دارد.

۴ در تیر (۳) نیز وضعیت مشابهی با تیر (۲) وجود دارد با این تفاوت که تیر (۳)، به یک قسمت بلند با طول $\frac{۲L}{۳}$ و یک قسمت کوتاه با طول $\frac{L}{۳}$ تقسیم شده است.

۵ در تیر (۲) و (۳) که ناحیهٔ فشاری در قسمتی از تیر در بالا و در قسمتی از تیر در پایین است، وضعیت بهتری از لحاظ کمانش پیچشی - جانبی نسبت به تیر (۱) که در آن ناحیهٔ فشاری کلاً در بالا است، وجود دارد.
تیر (۲) و (۳) که در آنها در طول تیر لنگر تغییر علامت می‌دهد، اصطلاحاً تیر با **انحنای مضاعف** و تیر (۱) که در آن لنگر تغییر علامت نمی‌دهد، اصطلاحاً تیر با **انحنای ساده** می‌نامند.

۶ در مقایسهٔ تیر (۲) و (۳) نیز می‌توان گفت تیر (۲) وضعیت بهتری نسبت به (۳) دارد زیرا در آن عملاً تیر به دو قسمت با طول $\frac{۱}{۲}L$ تقسیم شده است در حالی‌که در تیر (۳)، تیر به دو قسمت با طول‌های $\frac{۲}{۳}L$ و $\frac{۱}{۳}L$ تقسیم شده است که خطر کمانش پیچشی - جانبی در طول $\frac{۲}{۳}L$، از خطر کمانش پیچشی و جانبی در تیر (۲) که دو قسمت با طول $\frac{۱}{۲}L$ دارد، بیشتر است.

آیین‌نامه برای در نظر گرفتن نقش تغییر لنگر خمشی در فاصلهٔ بین دو تکیه‌گاه جانبی بر روی کمانش پیچشی جانبی از ضریب C_b استفاده می‌کند. این ضریب برای اعضا با مقطع دارای یک محور تقارن و با انحنای ساده و خمش حول محور قوی و برای کلیه اعضا با مقطع دارای دو محور تقارن در حد فاصل دو مقطع مهار شده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$C_b = \frac{۱۲/۵\, M_{max}}{۲/۵\, M_{max} + ۳\, M_A + ۴\, M_B + ۳\, M_C} \leq ۳/۰$$

که در آن:

M_{max} : قدرمطلق لنگر خمشی حداکثر در حد فاصل دو مقطع مهار شده

M_A : قدرمطلق لنگر خمشی در نقطهٔ $\frac{۱}{۴}$ در حد فاصل دو مقطع مهار شده

M_B : قدرمطلق لنگر خمشی در نقطهٔ $\frac{۱}{۲}$ در حد فاصل دو مقطع مهار شده

M_C : قدرمطلق لنگر خمشی در نقطهٔ $\frac{۳}{۴}$ در حد فاصل دو مقطع مهار شده

در مورد ضریب C_b می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱ مطابق رابطهٔ فوق مقدار ضریب C_b به عدد ۳ محدود می‌شود.

۲ تغییرات لنگر خمشی در طول تیر روی ضریب C_b و در نتیجه ظرفیت خمشی تیر تأثیر مستقیم دارد.

۳ تیرهای با انحنای ساده شرایط نامساعدتری نسبت به تیرهای با انحنای مضاعف دارند. به همین دلیل ضریب C_b آنها کوچکتر است. منظور از انحنای ساده یا انحنای مضاعف، در شکل‌های زیر مشخص شده است.

انحنای مضاعف　　انحنای ساده

۴ برای تیرهای طره‌ای که انتهای آزاد آنها مهار نشده است، C_b مساوی واحد (یک) می‌باشد. همچنین برای اعضای خمشی با مقطع نامتقارن، C_b را می‌توان به‌طور محافظه‌کارانه مساوی واحد در نظر گرفت.

۵ در مورد تأثیر ضریب C_b در مقاومت و ظرفیت خمشی مقطع می‌توان دو حالت زیر را در نظر گرفت: (L_b فاصله مهارهای جانبی است)

الف) اگر $L_b \le L_p$ باشد، C_b نقشی در تعیین M_n ندارد و مقدار لنگر از رابطهٔ $M_n = ZF_y$ به‌دست می‌آید. اصطلاحاً در این حالت نیازی به در نظر گرفتن کمانش پیچشی جانبی نمی‌باشد.

ب) اگر $L_p < L_b \le L_r$ (کمانش پیچشی جانبی غیر ارتجاعی) و یا $L_b > L_r$ باشد (کمانش پیچشی جانبی ارتجاعی) باشد، ظرفیت خمشی متناسب با C_b می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش ضریب C_b شرایط مقطع در کمانش پیچشی جانبی بهتر شده و در نتیجه ظرفیت خمشی مقطع افزایش خواهد یافت:

$$M_n \propto C_b$$

۳-۵- الزامات تحلیل و طراحی برای تأمین پایداری

تأمین پایداری کل سازه و تمامی اجزای آن از الزامات تحلیل و طراحی است. مطابق الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، پایداری کل سازه و تمامی اجزای آن در صورتی تأمین می‌شود که آثار ذکر شده در زیر به نحو مؤثری در تحلیل و طراحی آنها لحاظ شده باشد.

۱ تغییر شکل‌های محوری، خمشی و برشی اعضای سازه و تغییرشکل‌های سایر اجزا (نظیر اتصالات) که در جابجایی سازه مؤثرند.

۲ آثار مرتبه دوم (شامل آثار $P-\delta$ و $P-\Delta$)

۳ نواقص هندسی (شامی کجی و ناشاقولی)

۴ کاهش سختی اعضا ناشی از رفتار غیرالاستیک عمدتاً در اثر تنش‌های پسماند

۵ عدم اطمینان در برآورد سختی و مقاومت

در ادامه و در قالب چند نکته به بررسی مهمترین مفاهیم مرتبط با این بخش می‌پردازیم.

۳-۵-۱- آثار مرتبه دوم $P-\delta$ و $P-\Delta$

الف) آثار مرتبه دوم $P-\delta$: آثار $P-\delta$ به آثار اضافی بارها به علت وجود انحنا در عضو مربوط می‌شود. این آثار سبب ایجاد لنگرهای خمشی اضافی می‌شوند که به علت عدم انطباق مرکز سطح مقطع بر خطی که دو انتهای بخشی از طول عضو را به هم وصل می‌کند، به‌وجود می‌آیند.

ب) آثار مرتبه دوم $P-\Delta$: آثار $P-\Delta$ به آثار اضافی بارها به علت تغییرمکان جانبی نسبی اعضا مربوط می‌شود و سبب ایجاد نیروهای اضافی داخلی می‌شوند که در مقاطع اعضا به علت برون‌محوری ناشی از تغییرمکان جانبی یک انتهای عضو نسبت به انتهای دیگر آن به وجود می‌آیند. تغییرمکان جانبی نسبی دو انتهای عضو ممکن است به علت بارهای قائم یا بارهای جانبی یا ترکیبی از آنها باشد.

۳-۵-۲- دسته‌بندی سیستم‌های قاب‌بندی شده و طول موثر کمانشی اعضا

در این بخش سیستم‌های قاب‌بندی شده به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند.

- قاب‌های مهار شده
- قاب‌های مهار نشده
- قاب‌های ثقلی

۱ قاب‌های مهار شده و طول مؤثر کمانشی اعضا

قاب‌های مهار شده به قاب‌هایی گفته می‌شوند که در آنها پایداری جانبی و مقاومت در برابر بارهای جانبی به سختی خمشی ستون‌ها وابسته نبوده و در آنها حرکت جانبی قاب با تکیه‌کردن بر مهاربندی‌های مورب، دیوارهای برشی و یا به شیوه‌های مشابه مقید می‌شود.

نکته: در این گونه قاب‌ها، ضریب طول مؤثر (K) برای اعضای فشاری باید برابر ۱/۰ در نظر گرفته شود مگر آنکه تحلیل دقیق مقدار کمتری را تعیین نماید.

۲ قاب‌های مهار نشده و طول مؤثر کمانشی اعضا

قاب‌های مهار نشده به قاب‌هایی گفته می‌شوند که سختی خمشی ستون‌ها در پایداری جانبی و مقاومت قاب‌ها در برابر بارهای جانبی سهیم می‌باشد. ضریب طول موثر (K) در این نوع قاب‌ها باید با استفاده از تحلیل کمانشی به‌دست آید و هیچ‌گاه نباید کوچکتر از ۱/۰ در نظر گرفته شود.

۳ قاب‌های ثقلی

قاب‌های ثقلی به قاب‌هایی گفته می‌شوند که سختی جانبی آنها در مقایسه با سختی جانبی سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی بسیار ناچیز بوده و فقط برای بارهای ثقلی طراحی می‌شوند. ستون‌های موجود در قاب‌های ثقلی باید براساس طول واقعی ستون ($K=1$) طراحی شوند. پایداری جانبی قاب‌های ثقلی باید از طریق قاب‌های خمشی، قاب‌های مهاربندی شده، دیوارهای برشی و یا سایر سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی، تأمین شود. آثار $P-\Delta$ ناشی از بار وارد بر ستون‌های ق+اب‌های ثقلی باید به سیستم‌های مقاومت در برابر بارهای جانبی منتقل شده و در تعیین مقاومت‌های مورد نیاز و طراحی اعضای سیستم‌های باربر جانبی مورد توجه قرار گیرند.

۳-۵-۳- روش‌های تحلیل مرتبه دوم

به جز در شرایط خاص، مقاومت‌های موردنیاز باید از طریق تحلیل‌های مرتبه دوم و با رعایت الزامات خاص محاسبه شوند. در مبحث دهم، استفاده از روش‌های تحلیلی زیر به عنوان روش‌های تحلیل مرتبه دوم مجاز دانسته شده است.

۱ تحلیل الاستیک مرتبهٔ دوم: تحلیل الاستیک مرتبهٔ دوم به تحلیل‌هایی گفته می‌شود که در آنها روش تحلیل سیستم سازه‌ای الاستیک بوده لیکن در حین تحلیل آثار مرتبهٔ دوم (شامل آثار $P-\delta$ و $P-\Delta$) در آن لحاظ می‌گردد.

۲ تحلیل مرتبه دوم از طریق الاستیک مرتبهٔ اول تشدید یافته: در مبحث دهم استفاده از روش تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول تشدید یافته به عنوان یک روش تحلیل مرتبه دوم مجاز دانسته شده است.

۳-۵-۴- الزامات تحلیل و طراحی

به‌طور کلی برای تأمین پایداری کل سازه و تمامی اجزای آن، به کار بردن هر روش تحلیل و طراحی علمی و منطقی که آثار ذکر شده در بخش ۳-۵ به نحوی موثری در آن لحاظ شده باشد، مجاز است. روش‌های تحلیل و طراحی ارائه شده در زیر با محدودیت‌ها و الزامات ذکر شده به عنوان روش‌های قابل قبول تحلیل و طراحی محسوب می‌گردند.

۱) روش تحلیل مستقیم ۲) روش طول موثر ۳) روش تحلیل مرتبه اول

تذکر ۱: در روش تحلیل مستقیم، آثار نواقص هندسی اولیه (شامل کجی و ناشاقولی اعضا) باید از طریق مدل کردن این نواقص در تحلیل مرتبهٔ دوم سازه انجام پذیرد.

تذکر ۲: کاربرد ملاحظات نواقص هندسی اولیه فقط برای تعیین مقاومت‌های مورد نیاز اعضاء محدود می‌گردد و برای سایر منظورات طراحی (نظیر کنترل تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، کنترل خیز تیرها، کنترل ارتعاش اعضا و کف‌ها و محاسبه زمان تناوب اصلی ساختمان) نباید ملاحظات نواقص هندسی اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۸: در تیرهای خمشی I، در مورد کمانش جانبی و کمانش موضعی جان تیر کدام گزینه مناسب‌تر است؟
(قوه قضائیه - ۸۶، ۸۷ و ۹۳)

۱) کمانش جانبی در اثر تنش فشاری بال فشاری است و کمانش موضعی جان به‌علت تنش برشی است.
۲) کمانش جانبی فقط در صورت اعمال بار جانبی افقی به‌وجود می‌آید ولی کمانش موضعی همیشه هست.
۳) کمانش جانبی و کمانش موضعی جان تیر همیشه به هم وابسته است.
۴) کمانش جانبی و کمانش موضعی هر دو در اثر نیروی فشاری محوری خارجی است.

حل: براساس مفاهیم بیان شده در درسنامه، می‌توان گفت گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۹: در تیرهایی که روی آنها بوسیله دال بتنی پوشیده شده که با برشگیرهای مناسب یکپارچه شده است (سقف *composite*) در کدام‌یک از حالات زیر نیاز به کنترل کمانش جانبی تیر نمی‌باشد؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۶ و ۸۷)

۱) کلاً نیاز نیست.
۲) در صورتی‌که ارتفاع تیر کمتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد.
۳) تنش‌ها ماکزیمم در تیر از $0/66\ F_y$ بیشتر نباشد.
۴) نیروی محوری به تیر وارد نشده باشد.

حل: با توجه به مفاهیم ارائه شده در درسنامه و مهار جانبی در این سقف‌ها، گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۱۰: کدام‌یک از موارد زیر در مورد ضریب C_b در تیرهای فولادی صحیح است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۳)

۱) این ضریب فقط برای تیرهای بدون اتکای جانبی بکار می‌رود.
۲) این ضریب به فشردگی مقطع تیر بستگی دارد.
۳) این ضریب برای تیرهای I بکار می‌رود.
۴) این ضریب برای تیرهایی بکار می‌رود که توأماً تحت تأثیر خمش و پیچش قرار گرفته باشند.

حل: براساس مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۱۱: شرط آن که پروفیلی به عنوان تیر فشرده محسوب شود، علاوه بر اتصال سرتاسری جان به بال چیست؟

۱) نسبت عرض به ضخامت قسمت‌های مختلف آن حد معینی تجاوز ننماید.
۲) نسبت عرض به ضخامت در عناصر فشاری آن از حد معینی تجاوز ننماید.
۳) نسبت طول دهانه تیر به عرض بال از حد معینی تجاوز ننماید.
۴) شرط دیگری وجود ندارد چون همه پروفیل‌های نورد شده از فولاد نرمه، فشرده محسوب می‌شوند.

حل: براساس مطالب درسنامه گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۲: برای کدام‌یک از حالات زیر بررسی کنترل کمانش پیچشی - جانبی لازم است؟

۱) مقطع ناودانی حول محور ضعیف

۲) مقطع I شکل فشرده با دو محور تقارن با خمش حول محور قوی

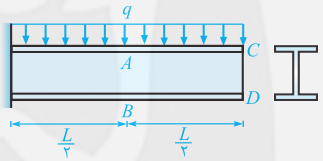
۳) مقطع I شکل نامتقارن با جان لاغر با خمش حول محور ضعیف

۴) مقطع قوطی توخالی با خمش حول محور قوی

حل: در خمش حول محور ضعیف که مقطع کمترین باربری خمشی را دارد، اساساً پدیده کمانش پیچشی جانبی اتفاق نمی‌افتد و بنابراین گزینه‌های (۱) و (۳) نمی‌توانند جواب تست باشند. از طرفی مقاطع قوطی شکل و لوله‌ای چون سختی پیچشی بالایی دارند، نمی‌توانند کمانش پیچشی - جانبی کنند و بنابراین گزینهٔ چهارم نیز قابل قبول نیست. در تیر I شکل فشرده در خمش حول محور قوی‌اش یکی از حالات حدی که باید بررسی شود، کمانش پیچشی - جانبی است.

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۳: در تیر طره زیر برای جلوگیری از کمانش پیچشی جانبی، بهترین نقطه برای قراردادن مهار جانبی کدام است؟



۱) A ۲) B

۳) C ۴) D

حل: برای تحلیل این سؤال جالب، به موارد زیر توجه کنید:

۱) همانطورکه گفتیم، بال فشاری را خطر کمانش پیچشی - جانبی تهدید می‌کند و باید مهار جانبی برای آن گذاشته شود.

۲) با دقت به بارگذاری، مشاهده می‌شود که در تیر لنگر منفی ایجاد شده و بال بالایی تحت کشش و بال پایینی تحت فشار قرار دارد و در نتیجه گزینه دوم یا چهارم صحیح است و نقاط B یا D باید مهار شود.

۳) اگر مهار جانبی در B قرار داده شود، طول مهار نشده $\frac{L}{۲}$ و اگر در نقطه D قرار داده شود، طول مهار نشده L خواهد بود و می‌توان گفت که حالت اول بهتر است و خطر کمانش پیچشی - جانبی را بیشتر کاهش می‌دهد. با توجه به این توضیحات، گزینهٔ (۲) صحیح است.

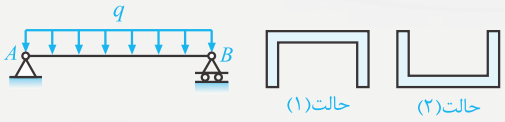
تمرین ۱۴: در کدام حالت ظرفیت تیر بیشتر است؟ (فرض کنید که خمش حول محور قوی ناودانی رخ داده است.)

۱) حالت (۱)

۲) حالت (۲)

۳) هر دو حالت یکسان هستند.

۴) نمی‌توان اظهارنظر کرد.



حل: وضعیت پروفیل ناودانی، در حالت (۱) بهتر از حالت (۲) است. دلایل این موضوع به شرح زیر است:

۱) محور خنثی (که در حالت الاستیک از مرکز سطح می‌گذرد) در حالت (۱) نسبت به حالت (۲) بالاتر بوده و ارتفاع ناحیهٔ فشاری در آن کمتر است. کوچکتر شدن تنش‌های فشاری در شکل (۱) نسبت به شکل (۲)، وضعیت ایده‌آل‌تری را برای آن ایجاد می‌کند.

۲) در حالت (۱)، شرایط اجزاء برای کمانش موضعی سخت‌تر از حالت (۲) می‌باشد. دقت شود که قسمت فشاری AB در حالت (۱) در دو لبه مقید بوده در حالی که اعضاء فشاری CD و EF در حالت (۲) در یک لبه مقید می‌باشند.

با توجه به کوچکتر بودن ارتفاع ناحیهٔ فشاری، پتانسیل کمانش پیچشی جانبی و کمانش موضعی در حالت (۱)، کمتر از حالت (۲) بوده و ظرفیت تیر بیشتر است. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۱۵: تعریف ضریب شکل *(shape factor)* در تیرهای خمشی چیست؟

۱) نسبت ممان‌اینرسی به ممان اولیهٔ سطح
۲) نسبت ممانی که در مقطع ایجاد حالت پلاستیک کامل می‌کند به ممان ماکزیمم الاستیک
۳) نسبت سطح مقطع به محیط تیر
۴) نسبت ارتفاع به عرض مقطع

حل: براساس مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۶: برای یک تیر دوسر مفصل، یک بار از پروفیل IPE و بار دیگر از پروفیل IPB استفاده کرده‌ایم. با توجه به مفاهیم سازه‌های فولادی، کدام پروفیل بیشتر مستعد کمانش پیچشی - جانبی می‌باشد؟ (فاصلهٔ تکیه‌گاه‌های جانبی در تیر، برای دو حالت یکسان است.)

۱) IPE ۲) IPB
۳) یکسان است. ۴) نمی‌توان اظهارنظر کرد

حل: همان‌طور که گفتیم، کمانش پیچشی جانبی به علت تمایل مقطع برای خمش حول محور ضعیف رخ می‌دهد. در یک تیر هرچه نسبت ممان اینرسی محور ضعیف به ممان اینرسی محور قوی بزرگتر باشد (یعنی I_y بیشتر به I_x نزدیک‌تر شود)، میزان این تمایل کاهش یافته و احتمال رخ دادن کمانش پیچشی جانبی کاهش می‌یابد. در پروفیل IPB که به‌عنوان مقطع بیشتر برای ستون‌ها کاربرد دارد، نسبت $\frac{I_y}{I_x}$ بزرگتر از پروفیل IPE بوده و استعداد کمانش پیچشی - جانبی در آن کمتر می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۱۷: به‌منظور بالا بردن مقاومت اسمی خمشی تیرهای فولادی I شکل در خمش، باید کدام قسمت آنها را در فواصل مناسب مهار نمود؟

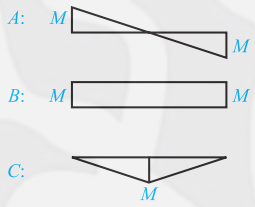
۱) بال کششی ۲) بال فشاری ۳) جان ۴) بال بالایی

حل: با توجه به مفاهیم بیان شده در درسنامه در تیرهای فولادی I شکل، به‌منظور بالا بردن مقاومت اسمی خمشی باید بال فشاری را در فواصل مناسب با تکیه‌گاه‌های جانبی مهار نمود، زیرا امکان وقوع کمانش جانبی در اجزای فشاری محتمل‌تر است. توجه داشته باشید که بال بالایی لزوماً در هر شرایطی تحت فشار نیست مانند تیر طره که بال بالایی در کشش است. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۸: نمودار لنگر خمشی بین تکیه‌گاه‌های جانبی سه تیر مشابه، مطابق شکل مقابل است. خطر کمانش پیچشی - جانبی در کدام تیر کمتر است؟

۱) A ۲) B

۳) A و B ۴) C



حل: در تیر (A) وضعیت انحنای مضاعف به وجود آمده و با توجه به مفاهیم کمانش پیچشی- جانبی، در بین سه گزینه کمترین احتمال رخ دادن کمانش پیچشی - جانبی را دارد. با محاسبهٔ ضریب C_b نیز می‌توان این موضوع را نشان داد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بحث ۴: مباحث تکمیلی طراحی تیرها

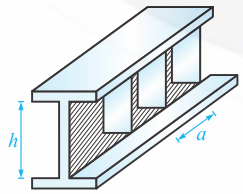
همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد تیرها به وسیلهٔ خمش طراحی شده و در نهایت با سایر موارد از قبیل برش، پیچش، تغییر شکل و... کنترل می‌شوند. در این بحث به بررسی این موارد خواهیم پرداخت.

۴-۱- برش در تیرها

تنش‌های برشی در نیمرخ‌های نورد شده و در تیرهایی که دارای دهانه‌های معمولی هستند، معمولاً تعیین‌کننده نمی‌باشد. در تیرهایی که دارای دهانه‌های کوچک بوده و بارهای سنگین را تحمل می‌کنند، ممکن است تنش‌های ناشی از برش بحرانی شوند. برای بررسی مفاهیم برش، به نکات زیر توجه کنید:

۱) در تیرهای I شکل، وجود بال، باعث توزیع یکنواخت تنش در جان مقطع می‌شود و به‌صورت مستقیم در تحمل تنش برشی نقش کمی بر عهده دارد و بیشتر تنش برشی توسط جان تحمل می‌شود. بنابراین در صورتی‌که جان مقطع از حد مشخصی نازک‌تر باشد، احتمال رخ دادن پدیدهٔ کمانش برشی یا کمانش قطری در جان وجود دارد.

۲) تیر باید به گونه‌ای باشد که کمانش برشی بعد از تسلیم خمشی اتفاق بیفتد، به عبارتی دیگر خمش بر طراحی حاکم باشد و به وسیلهٔ برش کنترل شود.



۳) در صورتی‌که جان تیر در برابر بارهای وارده جوابگو نباشد و احتمال وجود کمانش قطری باشد می‌توان از سخت‌کننده‌های عرضی با فواصل مشخص استفاده کرد. بدیهی است هرچه فاصلهٔ سخت‌کننده‌ها کمتر باشد ظرفیت تیر در برش بیشتر خواهد شد.

۴) مقاومت برشی طرح برای مقاطع با جان سخت نشده و سخت شده بدون عمل میدان کششی، به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V_u \le \phi_v V_n \quad , \quad V_n = 0.6 F_y A_w C_v$$

ϕ_v: ضریب تقلیل مقاومت برشی (همواره برابر با ۰/۹ و تنها در یک حالت برابر ۱/۰)

A_w: مساحت جان مقطع که برابر است با حاصل ضرب عمق کلی مقطع در ضخامت جان ($A_w = dt_w$)

C_v: ضریب برشی جان (نسبت تنش کمانش برشی جان به تنش تسلیم برشی فولاد جان) که برای جان مقاطع I شکل نورد شده و با نسبت $\frac{h}{t_w} \le ۲/۲۴\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ برابر است با یک می‌باشد.

تذکر: باتوجه به رابطهٔ بیان شده، نیروی برشی مقاوم تیر تابع عوامل تنش تسلیم (F_y)، مساحت جان مقطع (A_w) و ضریب C_v می‌باشد و با آنها رابطهٔ مستقیم دارد. به‌عبارتی دیگر با افزایش ارتفاع جان یا کاهش ضخامت آن مقاومت برشی مقطع کاهش می‌یابد.

۴-۲- الزامات حالت‌های حدی بهره‌برداری در تحلیل و طراحی

الزامات این بخش به عواملی که از نظر شرایط بهره‌برداری در طرح و محاسبه مطرح هستند و در بخش‌های دیگر این بخش به آنها پرداخته نشده است، مربوط می‌شود. شرایط بهره‌برداری عبارت است از شرایطی که در آن مجموعهٔ سازه، شامل اعضا و اتصالات آن ضمن انجام نقش اصلی خود (مقاومت در برابر بارهای خارجی)، قابلیت نگهداری، حفظ ظاهر، دوام و آسایش ساکنین را تأمین می‌کند.

مجموعهٔ سازه شامل اعضا و اتصالات آنها، باید از نظر قابلیت بهره‌برداری مورد کنترل و طراحی قرار گیرند. در تحلیل و طراحی براساس حالت‌های حدی بهره‌برداری باید ضرایب ایمنی جزئی مقاومت (ϕ) و نیز مطابق ترکیبات بارگذاری ارائه شده در مبحث ششم مقررات ملّی ساختمان، ضرایب ایمنی جزئی بارها، برابر واحد در نظر گرفته شود. ملاحظات بهره‌برداری شامل موارد زیر است:

۴-۲-۱: ملاحظات پیش‌خیز

۴-۲-۲: تغییرشکل‌های قائم (کنترل‌خیز)

۴-۲-۳: تغییرمکان‌های جانبی

۴-۲-۴: ارتعاش (لرزش)

۴-۲-۵: ملاحظات آثار ناشی از حرکت باد

۴-۲-۶: انبساط و انقباض (آثار تغییر دما و خودکرنشی)

۴-۲-۷: لغزش اتصالات پیچی

۴-۲-۸: خوردگی

۴-۲-۱- ملاحظات پیش‌خیز

اگر برای بعضی از اعضای خمشی، پیش‌خیز به خصوصی لازم است تا در هنگام بارگذاری به شکل موردنیاز و در ارتباط با اعضای دیگر درآیند، باید اندازه، جهت و موقعیت پیش‌خیز در مدارک طرح و محاسبه و نیز در نقشه‌های سازه‌ای به روشنی مشخص شود.

تیرها و خرپاهایی که خیز معینی برای آنها قید نشده باشد، باید در کارخانه طوری ساخته شوند که به هر حال پس از نصب، تغییرشکل روبه بالا (پیش‌خیز) داشته باشند.

۴-۲-۲- تغییرشکل‌ها (کنترل خیز)

تغییرشکل اعضای سازه تحت ترکیبات بارگذاری نظیر شرایط بهره‌برداری باید به اندازه‌ای باشد که به سرویس‌دهی سازه لطمه‌ای وارد نشود. بدین منظور دو حالت قابل بررسی است:

حالت (الف): کلیه تیرهای فولادی و تیرهای مختلطی که در آن‌ها در هنگام بتن‌ریزی دال از پایه موقت استفاده شده باشد، باید طوری محاسبه و طراحی شوند که:

۱) تغییرشکل حداکثر ناشی از بار مرده و زنده در هر دهانه، از $\frac{۱}{۲۴۰}$ طول دهانه کوچکتر باشد.

$$\Delta_{D+L} \le \frac{L}{۲۴۰}$$

۲) تغییرشکل حداکثر ناشی از بار زنده در هر دهانه، از $\frac{۱}{۳۶۰}$ طول دهانه بیشتر نشود.

$$\Delta_{L} \le \frac{L}{۳۶۰}$$

حالت (ب): در تیرهای مختلط که در هنگام بتن‌ریزی دال از پایه‌های موقت استفاده نشده باشد، کنترل تغییرشکل‌های قائم این نوع تیرها باید شامل مراحل زیر باشد:

۱) تغییرشکل قائم ناشی از وزن تیر فولادی، دال بتنی و بارهای حین ساخت، براساس مقطع فولادی تنها محاسبه می‌شود.

۲) تغییرشکل قائم ناشی از بارهای مرده‌ای که بعد از گرفتن دال بتنی وارد می‌شوند. نظیر وزن کف‌سازی تیغه‌ها و موارد مشابه براساس مقطع مختلط محاسبه می‌شود.

۳) تغییرشکل قائم ناشی از بارهای زنده براساس مقطع مختلط محاسبه می‌شود.

۴) تغییرشکل محاسبه شده در مرحلهٔ ۱ نباید از $\frac{۱}{۳۶۰}$ طول دهانه بیشتر باشد.

۵) مجموع تغییرشکل‌های محاسبه شده در مراحل ۱، ۲ و ۳ نباید از $\frac{۱}{۲۴۰}$ طول دهانه بیشتر باشد.

۶) تغییرشکل محاسبه شده در مرحلهٔ ۳ نباید از $\frac{۱}{۳۶۰}$ طول دهانه بیشتر باشد.

تذکر ۱: در اعضای مختلط، تغییرشکل‌های اضافی در اثر خزش و افت بتن باید به نحو موثری در محاسبهٔ تغییرشکل‌ها در نظر گرفته شود.

تذکر ۲: در تیرهای طره‌ای، مقدار حداکثر تغییرشکل‌های قائم مجاز برحسب طول دهانه، می‌تواند به دو برابر افزایش داده شود.

۴-۲-۳- تغییرمکان‌های جانبی

تغییرمکان‌های جانبی کلی و نسبی باید به گونه‌ای باشند که تحت ترکیبات بارگذاری نظیر شرایط بهره‌برداری، یکپارچگی تیغه‌بندی‌های داخلی و پوشش‌های خارجی (نما) حفظ شود. همچنین این تغییرمکان‌ها باید به گونه‌ای باشند که تحت ترکیبات بارگذاری نظیر حالت‌های حدی مقاومت، از برخورد ساختمان‌های مجاور هم جلوگیری به‌عمل آید. برای تأمین شرایط مذکور، تغییرمکان‌های جانبی کلی و نسبی باید محدودیت‌های قید شده در مبحث ششم مقررات ملّی ساختمان را برآورده نمایند.

نکته: در مورد اعضای فولادی و مختلط نگه‌دارنده نماهای در معرض نیروی باد، تغییرمکان‌های جانبی باید به نحوی محدود شوند که از ترک‌خوردگی نازک‌کاری‌ها با شکل شیشه‌ها (بسته به جزئیات به‌کاررفته در ساخت آنها)، جلوگیری به عمل آید. در هر حال تغییرمکان‌های جانبی اعضای فولادی و مختلط نگهدارندهٔ نما تحت اثر نیروی باد نباید از $\frac{۱}{۳۰۰}$ طول دهانه (حد فاصل بین تکیه‌گاه‌های نما) بیشتر باشد.

۴-۲-۴- ارتعاش (لرزش)

تیرها و شاه‌تیرهایی که سطوح بزرگ خالی از تیغه‌بندی (یا خالی از عناصر دیگری که خاصیت میراکنندگی ارتعاش را دارند) را تحمل می‌کنند، باید با توجهی خاص به لرزش و ارتعاش حاصل از بارهای جنبشی (نظیر بارهای ناشی از رفت و آمد افراد، حرکت و توقف آسانسورها، حرکت ماشین‌آلات و نظایر آنها) محاسبه شوند. در تیرهای مربوط به این کف‌ها، فرکانس نوسانی تیر باید به اندازه‌ای باشد که از حد احساس بشری تجاوز ننماید.
حداقل فرکانس نوسانی (دوره‌ای) کف‌ها برای کاربری‌های مختلط نباید از مقادیر مشخص شده در جدول (۴) کمتر باشد.

جدول ٤: حداقل فرکانس نوسانی (دوره‌ای) کف‌ها

نوع کاربری	حداقل فرکانس نوسانی کف‌ها (f)
ساختمان‌های مسکونی و اداری	$f \geq ۵\ Hz$
ساختمان‌های تجاری - فروشگاه‌ها	$f \geq ۴\ Hz$
سالن‌های اجتماعات با صندلی‌های ثابت	$f \geq ۴\ Hz$
سالن‌های اجتماعات بدون صندلی‌های ثابت	$f \geq ۸/۵\ Hz$
تعمیرگاه‌ها، سالن‌های ژیمناستیک و ورزشی	$f \geq ۹/۵\ Hz$
پارکینگ‌ها	$f \geq ۴\ Hz$

برای محاسبهٔ فرکانس نوسانی (f)، می‌توان از رابطهٔ زیر استفاده نمود:

$$f = ۰/۱۸\sqrt{\frac{g}{\Delta_{is}}}$$

که در آن:
f : فرکانس نوسانی ارتعاش برحسب هرتز
Δ_{is} : تغییرمکان نسبی قائم حداکثر کف برحسب میلی‌متر تحت اثر بار مرده و بخشی از بار زنده که دائمی فرض می‌شود.
g : شتاب ثقل برابر $۹۸۱۰\ mm/s^۲$

تذکر: فرکانس دوره‌ای عکس زمان تناوب است:

$$f = \frac{۱}{T}$$

۴-۲-۵- ملاحظات آثار ناشی از حرکت باد

به منظور آسایش ساکنین، آثار ناشی از حرکت باد باید به نحو مؤثری در محاسبه و طراحی سازه مورد توجه قرار گیرد.

۴-۲-۶- آثار تغییرات دما و خودکرنشی

برای تأمین شرایط بهره‌برداری مناسب، در محاسبه و طراحی سازه باید اثرات تغییرات دما به نحو مؤثری مورد توجه قرار گیرد. خرابی پوشش‌های نمای ساختمان می‌تواند ناشی از نفوذ آب بوده و به هوازدگی منتهی شود. درمحاسبات، ضریب انبساط و انقباض حرارتی فولاد برابر ۱۲×۱۰^{-۶} به ازای هر درجهٔ سلسیوس در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲-۷- لغزش اتصالات

در مواردی که اثرات لغزش اتصالات پیچی باعث تغییرشکل‌هایی می‌شود که شرایط بهره‌برداری مناسب را به مخاطره می‌اندازد، طراحی اتصال باید به‌صورت لغزش بحرانی صورت گیرد.

۴-۳-ورق‌های تقویتی تیر

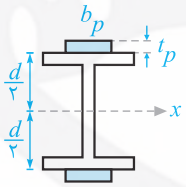
در طرح و اجرای تیرها، در مواردی نیمرخ‌های نورد شده باید تقویت گردند. دو دلیل اساسی برای تقویت نیمرخ‌های نورد شده عبارتند از:

۱) وجود تغییرات در لنگر خمشی در طول تیر، طراح را ترغیب می‌کند که از نیمرخ‌های فولادی با مقطع ثابت در طول تیر استفاده نکرده و در محل‌هایی که لنگر خمشی زیاد است، مقطع تیر را با اتصال ورق‌هایی که روی بال قرار می‌گیرند، تقویت نماید و در مجموع به یک طرح اقتصادی‌تر دست پیدا کند.

۲) در مواردی نیمرخ‌های موجود در بازار توانایی تحمل لنگرهای خمشی وارد بر تیرها را نداشته و باید از نیمرخ‌های موجود به همراه ورق تقویتی بهره برد.

تقویت تیرها معمولاً در محل بال تیرها و به‌صورت متقارن در محل دو بال انجام می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که در هنگام خمش محل محور خنثی تغییر چشمگیری نکرده و اساس مقطع کششی و فشاری به یک اندازه افزایش یابد. در مورد تقویت یک تیر نکات زیر حائز اهمیت است:

۱) ممان اینرسی و اساس مقطع تیر با اضافه شدن دو ورق با ابعاد $(b_p \times t_p)$ در بالا و پایین عبارت است از:



$$I_x = I_{x\,beam} + ۲\left[\frac{۱}{۱۲}b_p t_p^{۳} + (b_p t_p)(\frac{d}{۲}+\frac{t_p}{۲})^{۲}\right]$$

$$S_x = \frac{I_x}{\frac{d}{۲}+t_p}$$

توجه شود که $I_{x\,beam}$ ممان‌اینرسی نیمرخ اصلی و بدون ورق تقویتی حول محور خمش است.

۲) در محاسبات معمول و معمولاً از ممان‌اینرسی ورق حول محور خودش $\frac{۱}{۱۲}b_p t_p^{۳}$ و ضخامت ورق در مقابل ارتفاع تیر صرف‌نظر کرده که درنتیجه روابط به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$I_x = I_{x\,beam} + ۲[b_p t_p \times (\frac{d}{۲})^{۲}] \Rightarrow S_x = \frac{I_x}{\frac{d}{۲}}$$

۳ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، حداکثر مساحت مجاز ورق تقویتی را به ۷۰ درصد سطح مقطع کل بال محدود کرده است. یکی از دلایل این محدودیت، عدم استفاده از نیمرخ‌های ضعیف با ورق‌های تقویتی دارای سطح مقطع زیاد است. این موضوع، در ابعاد نیمرخ و ورق‌های تقویتی ناهماهنگی به وجود می‌آورد.

$$A_p \le ۰/۷(A_f + A_p) \Rightarrow \frac{A_p}{A_f} \le ۲/۳۳$$

۴ پیچ‌های پر مقاومت و جوش‌های اتصال‌دهندهٔ بال به جان و ورق‌های تقویتی به بال باید برمبنای برش افقی ناشی از تغییرات لنگر خمشی تیر طراحی شوند. توزیع طولی پیچ‌ها و جوش‌های منقطع باید متناسب با شدت برش باشد، این پیچ‌ها و جوش‌ها باید برای انتقال هر نیرویی که مستقیماً از طریق بال به جان منتقل می‌شود، طراحی گردند. مگر اینکه این نیرو به طریق دیگری به جان انتقال یابد.

۵ ورق‌های تقویتی که در تمام طول دهانه ادامه ندارند، باید بعد از نقطهٔ قطع محاسباتی به طول مشخصی ادامه یافته و در این طول پیچ‌های پرمقاومت اصطکاکی یا جوش گوشه به بال متصل شوند. این طول، طول گیرایی نامیده می‌شود.

۶ اتصال ورق در طول گیرایی باید برای انتقال برش افقی ناشی از مقاومت خمشی سهم ورق تقویتی از مقاومت خمشی تیر در نقطه قطع محاسباتی ورق (مساحت ورق تقویتی × تنش تسلیم فولاد) کافی باشد.

۷ حداقل طول گیرایی (a) که از انتهای ورق اندازه‌گیری می‌شود، باید به شرح زیر در نظر گرفته شود.

- برابر پهنای ورق تقویتی، در حالتی که جوش اتصال ورق تقویتی به تیر در طول a پیوسته و بعد ساق آن حداقل سه چهارم ضخامت ورق تقویتی باشد و در دو لبهٔ کناری ورق تقویتی و در لبهٔ انتهای ورق اجرا شود.
- یک و نیم برابر پهنای ورق تقویتی، در حالتی که بُعد جوش پیوسته به طول a در دو لبهٔ کناری ورق و در انتهای آن کمتر از سه چهارم ضخامت ورق تقویتی باشد.
- دو برابر پهنای ورق تقویتی، در حالتی که جوش پیوسته به طول a فقط در دو لبهٔ کناری ورق وجود دارد و در لبهٔ انتهایی جوش اجرا نمی‌شود.

نمونه سؤالات بحث (٤)

تمرین ۱۹: کدام‌یک از روش‌های زیر در کاهش خیز تیرها مؤثرتر می‌باشد؟

۱) اضافه نمودن سخت‌کننده‌ها
۲) تقویت جان تیرها
۳) تقویت بال‌های تیر
۴) اضافه نمودن مهارهای جانبی

- حل: با استفاده از روابط محاسبهٔ تغییر مکان (خیز) در تیرها می‌توان گفت، خیز تیر با ممان اینرسی مقطع رابطهٔ معکوس داشته و افزایش ممان‌اینرسی موجب کاهش خیز می‌شود. با توجه به مفاهیم مقاومت مصالح می‌توان گفت، تقویت بال‌ها بیشترین تأثیر را در افزایش ممان‌اینرسی دارد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است. گزینهٔ (۱) در افزایش تنش مجاز برشی، گزینهٔ (۲) در کاهش مقدار تنش برشی و گزینهٔ (۴) در افزایش مقدار تنش خمشی مجاز تأثیرگذار است.

تمرین ۲۰: برای کاهش اثر ارتعاش حاصل از بارهای جنبشی در یک تیر فولادی اصلی کف سالن، در مرحله طراحی، کدام‌یک از راه‌های زیر مؤثرتر است؟

۱) استفاده از فولاد ST ۵۲ به جای ST ۳۷
۲) افزایش سختی خمشی تیر
۳) افزایش سختی محوری تیر
۴) کاهش سختی خمشی تیر

حل: سختی خمشی را با EI معرفی کردیم. بنابراین با توجه به قرارگیری این پارامتر در صورت رابطهٔ فرکانس، با افزایش این پارامتر فرکانس افزایش یافته و اثر ارتعاش کمتر خواهد شد. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

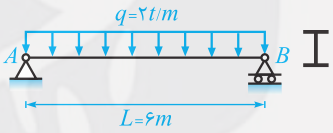
تمرین ۲۱: کدام‌یک از اقدامات زیر باعث افزایش مقاومت برشی مقطع I شکل نخواهد شد؟

۱) افزایش نمرهٔ پروفیل
۲) اضافه کردن سخت‌کننده به جان
۳) اضافه کردن ورق تقویتی به بال
۴) هیچ‌کدام

حل: افزایش نمرهٔ پروفیل و اضافه کردن سخت‌کننده باعث تقویت جان خواهد شد و طبق رابطهٔ مقاومت برشی مقطع، مساحت جان و در نتیجه مقاومت برشی افزایش خواهد یافت. در حالی‌که اضافه کردن ورق تقویتی به بال تأثیری در مقاومت برشی نخواهد داشت.
بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ سؤال است.

تمرین ۲۲: در تیر زیر، تنش مجاز خمشی برابر $1200\ kg/cm^2$ است. مساحت لازم برای هر یک از ورق‌های تقویتی که باید به بال‌های بالایی و پایینی تیر متصل شود، چند سانتی‌متر مربع است؟

مشخصات پروفیل: $(S_x = 430\ cm^3\ ,\ d = 27\ cm)$



۱) $8\ cm^2$
۲) $10\ cm^2$
۳) $12\ cm^2$
۴) $14\ cm^2$

حل: حداکثر لنگر وارد بر تیر و میزان اساس مقطع لازم برای این لنگر عبارت است از:

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2\times 6^2}{8} = 9\,t.m = 9\times 10^5\ kg.cm$$

$$\frac{M_{max}}{S} \le F_b \ \Rightarrow\ S_x = \frac{9\times 10^5}{1200} = 750\,cm^3$$

از طرفی اساس مقطع پروفیل در حالت جدید عبارت است از:

$$S_x = \frac{I_x}{\frac{d}{2}} = \frac{I_{x_{beam}} + 2A_p\left(\frac{d}{2}\right)^2}{\frac{d}{2}} = \frac{I_{x_{beam}}}{\frac{d}{2}} + A_p\,d = S_{x_{beam}} + A_p\,d$$

$$S_x = S_{x_{beam}} + A_p d \ \Rightarrow\ 750 = 430 + A_p \times 27 \ \Rightarrow\ A_p = \frac{320}{27}\,cm^2 \simeq 12\,cm^2$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۳: شاهتیر نگهدارنده جراثقال دارای دهانه ۱۵ متر تحت اثر بار مرده و زنده قرار دارد. پیش‌خیز مناسب در این تیر ناشی از بار زنده برحسب میلی‌متر در حدود چه مقدار باید پیش‌بینی شود؟

۱) ۱۰ ۲) ۲۰ ۳) ۳۰ ۴) ۴۰

حل: بر اساس مطالب درسنامه داریم:

$$\Delta \le \frac{۱}{۳۶۰} L = \frac{۱۵۰۰۰}{۳۶۰} = ۴۱/۶\ mm$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۵: طراحی ستون‌های فولادی

ستون‌ها از اعضای اصلی تشکیل‌دهندهٔ اسکلت فولادی هستند و وظیفهٔ آنها عمدتاً تحمل و انتقال نیروهای محوری به فونداسیون می‌باشد. هرچند در بیشتر ستون‌ها علاوه‌بر نیروی محوری لنگر خمشی نیز وجود دارد. به‌طور کلی در طراحی اعضای فشاری علاوه بر در نظر گرفتن معیار تسلیم (انهدام یا گسیختگی مصالح ستون)، معیار پایداری و یا کمانش هم باید به عنوان یک عامل خرابی بررسی شود. با این مقدمه بحث طراحی ستون‌ها را می‌توانیم شامل موارد زیر دانسته و آنها را بررسی نماییم.

۵-۱- بار کمانشی ستون‌ها و ضریب طول مؤثر

بار کمانشی در ستون‌ها به مقدار بار محوری گفته می‌شود که به ازای اندکی افزایش در آن، ستون قبل از جاری شدن (گسیخته شدن) دچار ناپایداری شده و کمانش می‌کند. بار کمانشی ستون از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{cr} = \frac{\pi^۲ EI}{(KL)^۲}$$

در مورد رابطهٔ فوق می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) در رابطهٔ بالا، به پارامتر K **ضریب طول مؤثر** ستون گفته می‌شود که برحسب شرایط مختلف تکیه‌گاهی مقدار متفاوتی دارد که در ادامه با نحوهٔ تعیین مقادیر آن آشنا خواهید شد.

۲) با توجه به رابطهٔ بیان شده می‌توان گفت، بار کمانشی ستون‌ها به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- صلبیت خمشی ستون (EI) شامل مقطع و جنس ستون

۲- شرایط مرزی و تکیه‌گاهی (مؤثر در ضریب K)

۳- طول ستون (L)

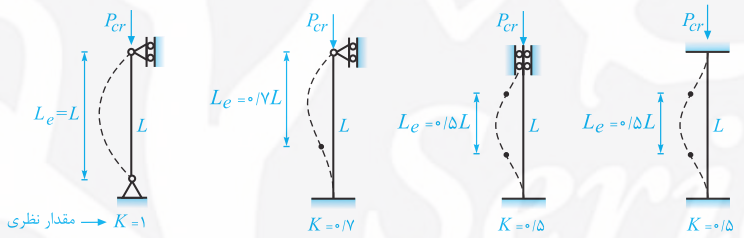
بنابراین می‌توان گفت با افزایش صلبیت خمشی و یا کاهش ضریب طول مؤثر و طول ستون، بار کمانشی آن افزایش خواهد یافت.

۳) به حاصل‌ضرب ضریب طول مؤثر در ارتفاع ستون، **طول مؤثر ستون** گفته می‌شود که آن را با L_e نشان می‌دهند. بر این اساس رابطهٔ بار کمانشی ستون را می‌توان به‌صورت زیر نیز بیان کرد.

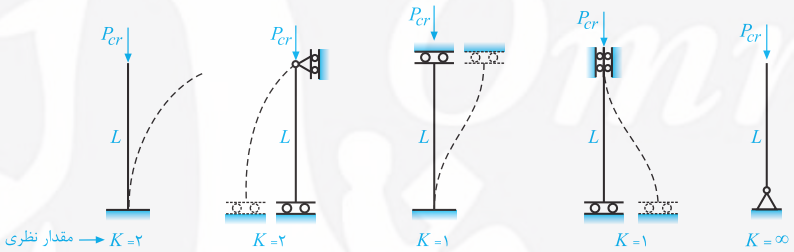
$$P_{cr} = \frac{\pi^۲ EI}{L_e^۲} \quad , \quad L_e = KL$$

۴ ضریب طول مؤثر ستون‌ها (K) با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل در دو حالت مهار شده و مهار نشده به‌صورت زیر است:

الف) اگر ستون مهار شده باشد، یعنی دو سر ستون نسبت به یکدیگر امکان جابه‌جایی افقی نداشته باشد، ضریب طول مؤثر در بازهٔ $0/5 \le K \le 1$ قرار می‌گیرد که برای ستون‌های معروف زیر مقادیر آن نوشته شده است.



ب) اگر ستون مهار نشده باشد، یعنی دو سر ستون نسبت به یکدیگر امکان جابه‌جایی افقی داشته باشند، ضریب طول مؤثر در بازهٔ $1 \le K < \infty$ قرار می‌گیرد.



دقت: ستون آخر (سمت راست) ناپایدار بوده و با کوچک‌ترین نیرو کمانش می‌کند. با توجه به این موضوع ضریب طول مؤثر آن بی‌نهایت بوده و P_{cr} برای آن برابر صفر می‌باشد.

۵ برای تعیین ضریب طول مؤثر ستون در یک قاب می‌توان از رابطهٔ زیر استفاده کرد:

$$G = \frac{\Sigma(\frac{EI}{L})_{\text{ستون}}}{\Sigma(\frac{EI}{L})_{\text{تیر}}}$$

با استفاده از این رابطه پارامتر G برای ابتدا و انتهای ستون محاسبه شده و سپس با استفاده از نمودار یا روابط خاص، مقدار K به‌دست می‌آید. به عبارتی در این رابطه تأثیر سختی تیر و ستون‌های کناری در جلوگیری از دوران ستون و کمانش کردن آن لحاظ شده است. در رابطهٔ فوق EI صلبیت خمشی و L طول تیر یا ستون می‌باشد. در خصوص رابطهٔ فوق می‌توان به نکات زیر اشاره کرد.

- هرچه پارامتر G برای ستون بیشتر باشد، ضریب طول مؤثر (K) برای آن بزرگتر است.
- باتوجه به قرارگیری تیر در مخرج رابطه هرچه سختی یا تعداد تیرهای متصل به بالا و پایین ستون بیشتر باشد، مقدار G کمتر و مقدار K نیز کمتر خواهد شد.

- باتوجه به قرارگیری ستون در صورت رابطه هرچه سختی یا تعداد ستون‌های متصل به بالا و پایین ستون بیشتر باشد، مقدار G بیشتر و مقدار K نیز بیشتر خواهد شد.
- اگر اتصال تیر به ستون به‌صورت مفصلی باشد، سختی خمشی آن در رابطهٔ فوق تأثیری ندارد و ضریب طول مؤثر ستون را تغییر نخواهد داد.

۶ تنش بحرانی کمانش ستون‌ها از تقسیم نیروی کمانشی به سطح مقطع ستون حاصل می‌گردد و داریم:

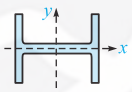
$$\begin{cases} f_{cr} = \dfrac{P_{cr}}{A} \\ r = \sqrt{\dfrac{I}{A}} \end{cases} \Rightarrow f_{cr} = \dfrac{\pi^2 E}{(\dfrac{KL}{r})^2}$$

۷ نسبت $\dfrac{KL}{r}$ در یک ستون را با λ نمایش داده و به آن نسبت لاغری ستون (یا نسبت رعنایی) می‌گویند. در این نسبت، r شعاع ژیراسیون مقطع می‌باشد. بنابراین رابطهٔ تنش بحرانی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\lambda = \frac{kL}{r} \Rightarrow f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

تذکر: نسبت لاغری حداکثر $(\dfrac{kL}{r})_{max}$ در اعضای فشاری نباید از ۲۰۰ تجاوز کند.

۸ برای یک ستون در فضای سه‌بعدی، باید امکان کمانش ستون در صفحات مختلف را بررسی کرد و آنگاه بیشترین مقدار را برای نسبت لاغری λ برای طراحی ستون انتخاب کرد. در این حالت ستون می‌تواند حول محور x یا y کمانش کند.



نکته ۱: از بین مقادیر λ_x و λ_y برای λ، باید بیشترین آنها به عنوان $\lambda_{\text{طراحی}}$ درنظر گرفته شود.

$$\lambda_{\text{طراحی}} = max\ \{\lambda_x\ ,\ \lambda_y\} \le ۲۰۰$$

نکته ۲: بهینه‌ترین حالت برای طراحی ستون زمانی است که $\lambda_x = \lambda_y$ گردد. در این حالت کمانش حول محورهای اصلی مقطع به‌طور همزمان اتفاق می‌افتد و از مصالح به‌طور بهینه و اقتصادی استفاده می‌شود. بدیهی است در مقاطعی مانند دایره یا مربع جدار نازک که مقدار λ در تمام جهت‌ها یکسان است، بهترین مقطع خواهند بود اما به دلیل مسائل اجرایی و دشواری جزئیات اتصالات، استفاده از آنها چندان توصیه نمی‌شود.

تذکر: در اکثر ساختمان‌های فولادی از پروفیل ناودانی به‌صورت دوبل برای تولید مقاطع بادبندی به‌صورت مقابل استفاده می‌شود. می‌توان نشان داد که ترکیب دو ناودانی به حالت روبه‌رو شعاع ژیراسیون بیشتری نسبت به حالت پشت به پشت داشته و در نتیجه ضریب لاغری آن کمتر و ظرفیت فشاری بیشتری می‌باشد.

روبه‌رو　　پشت به پشت

۵-۲- اصول طراحی ستون‌ها

برای طراحی اعضای فشاری باید معیار کمانش عضو به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. یک عضو تحت فشار می‌تواند در یکی از حالت‌های صفحه بعد کمانش کند:

۱) کمانش خمشی ۲) کمانش پیچشی ۳) کمانش خمشی - پیچشی

در حالت کمانش خمشی، ستون تحت بارهای وارده حول یکی از محورهای مقطع خود خم شده و اصطلاحاً کمانش می‌کند. همچنین در حالت کمانش پیچشی مقطع ستون تحت بارهای وارده تمایل به دوران دارد و تنش‌های خاصی در آن ایجاد خواهد شد. چنانچه هر دو کمانش خمشی و پیچشی در ستون وجود داشته باشد ستون دچار کمانش خمشی ـ پیچشی خواهد شد. به‌طور کلی طبق اصل حاکم بر طراحی سازه‌ها، در طراحی ستون‌ها باید مقاومت طراحی ($\phi_c P_n$) بزرگتر یا مساوی مقاومت مورد نیاز (P_u) باشد:

$$P_u \le \phi_c P_n \quad , \quad P_n = F_{cr} A_g$$

ϕ_c: ضریب تقلیل مقاومت فشاری برابر ۰/۹ P_n: مقاومت فشاری اسمی ستون

F_{cr}: تنش فشاری ناشی از کمانش A_g: کل سطح مقطع عضو فشاری

نکته: در حالت کمانش خمشی، پارامتر F_{cr} بیانگر تنش فشاری ناشی از کمانش خمشی است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

کمانش غیرالاستیک: $\lambda \le ۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ یا $F_e \ge ۰/۴۴ F_y \Rightarrow F_{cr} = \left[۰/۶۵۸^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y$

کمانش الاستیک: $\lambda > ۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ یا $F_e < ۰/۴۴ F_y \Rightarrow F_{cr} = ۰/۸۷۷ F_e$, $F_e = \frac{\pi^۲ E}{\lambda^۲}$

λ: نسبت لاغری حداکثر عضو فشاری (KL/r) F_e: تنش کمانش بحرانی اولر در حالت الاستیک

در خصوص روابط فوق می‌توان به نکات زیر توجه کرد:

۱) مقدار $۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ با پارامتر C_c نشان داده شده و برای فولادهای ST ۳۷ و ST ۵۲ برابر است با:

$$C_c = ۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}} \Rightarrow \begin{cases} C_c = ۱۳۶ & ST\ ۳۷\ (F_y = ۲۴۰۰\ kg/cm^۲) \\ C_c = ۱۱۱ & ST\ ۵۲\ (F_y = ۳۶۰۰\ kg/cm^۲) \end{cases}$$

۲) طبق رابطه، در حالت کمانش الاستیک مقدار F_e و در نتیجه F_{cr} و در نهایت مقاومت فشاری ستون به جنس مصالح آن وابسته نیست و با تغییر نوع فولاد تغییری نخواهد کرد.

۳) همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، تنش‌های پسماند باعث کاهش ظرفیت ستون (عضو فشاری) شده و کمانش ستون زودتر انجام خواهد شد. حداکثر مقدار تنش پسماند فشاری را برابر ۰/۵ F_y در نظر می‌گیرند.

۵-۳- ستون‌های مرکب

در بسیاری از طراحی‌ها احتیاج به ستون‌هایی با سطح مقطع و ممان اینرسی بزرگتر و ظرفیت بیشتر داریم. در حالی که پروفیل‌های رایج در بازار سطح مقطع و ممان اینرسی لازم را نداشته و مجبور به ترکیب مقاطع هستیم. در گذشته با کنار هم قرار دادن مقاطع I شکل به‌صورت پاباز و پابسته، مقطع ستون‌های مرکب را تشکیل

می‌دادند و از جوش سرتاسری برای حالت پابسته و بست‌های موازی یا مورب برای حالت پاباز استفاده می‌کردند. امروزه بیشتر ستون‌ها به‌صورت Box و با استفاده از ورق در کارخانه ساخته و به محل کارگاه انتقال می‌یابند.

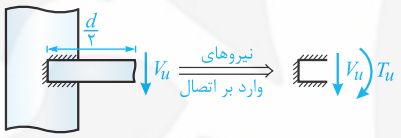
در خصوص ستون‌های مرکب می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) علت ایجاد فاصلهٔ بین مقاطع و استفاده از بست، افزایش ممان اینرسی حول محور y ، افزایش شعاع ژیراسیون r_y و در نتیجه افزایش ظرفیت محوری ستون می‌باشد.

۲) بست‌های افقی تحت برش و خمش و بست‌های مورب تحت فشار باید طراحی شوند.

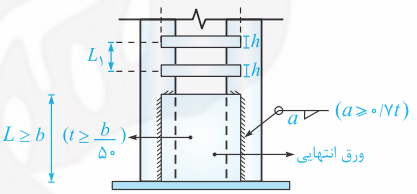
۳) بست‌های موازی و اتصالات آنها باید برای تحمل لنگر خمشی و نیروی برشی وارد بر آنها طراحی شوند. مقدار نیروی برشی جانبی ستون که بست‌ها براساس آن طراحی می‌شوند عبارت است از ۲ درصد مقاومت فشاری موجود عضو فشاری مرکب به‌علاوهٔ برش در ستون ناشی از اثرات بارگذاری خارجی.

۴) اتصال بست به ستون عمدتاً توسط جوش دورتادور انجام می‌گیرد. دقت شود که اتصال مورد استفاده در این حالت تحت نیروی برشی و لنگر پیچشی قرار دارد.



۵) در انتهای عضو فشاری و محل اتصال آن به کف ستون، به‌منظور یکپارچه عمل نمودن مقطع دوبل می‌بایست از ورق‌های انتهایی استفاده شود. ورق‌های انتهایی که در دو سر عضو فشاری قرار می‌گیرند، باید دارای حداقل طولی (در امتداد محور طولی عضو) برابر با فاصلهٔ بین مراکز هندسی نیمرخ‌های تشکیل دهندهٔ عضو فشاری (b) باشند. ضخامت ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر باید طوری انتخاب شوند که مقاومت کافی در برابر نیروهای منتقل شده از طرف عضو فشاری به کف ستون و از طرف تیر و مهاربندی به ستون را دارا باشد.

در هر حال ضخامت ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر نباید از $\frac{b}{۵۰}$ کمتر باشد، که در آن b برابر پهنای ورق انتهایی و ورق اتصال در اتصالات جوشی و برابر فاصلهٔ عرضی وسایل اتصال در اتصالات پیچی است.



۶) براساس آیین‌نامه استفاده از ستون‌های با مقطع متشکل از چند نیمرخ بستدار در قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری زیاد ممنوع است.

۷) اعضای ساخته شده یا مقاطع ساخته شده به مقاطعی گفته می‌شوند که تماماً از ورق یا از دو یا چند نیمرخ با قطعات لقمه بین آنها یا از دو یا چند نیمرخ به همراه ورق سراسری یا بست و یا از دو نیمرخ به هم متصل شده ساخته می‌شوند. در این اعضا اتصالات متصل‌کننده‌های میانی می‌توانند از نوع جوشی یا پیچی با عملکرد اتکائی، پیش‌تنیده یا لغزش بحرانی باشند، لیکن اتصالات متصل‌کننده‌های انتهایی باید از نوع جوشی یا پیچی پیش‌تنیده یا لغزش بحرانی با وضعیت سطحی کلاس A یا B باشند.

۸) اگر وسایل اتصال ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر از نوع پیچی باشد، فاصلهٔ این وسایل از یکدیگر در امتداد طولی عضو فشاری (امتداد تنش) نباید از ۶ برابر قطر آنها بیشتر شود. در هر ورق انتهایی و ورق اتصال به تیر باید حداقل ۳ عدد پیچ تعبیه شود.

۹) ضریب لاغری بست‌های مورب تک نباید از ۱۴۰ و ضریب لاغری بست‌های مورب ضربدری نباید از ۲۰۰ تجاوز نماید.

۱۰) زاویهٔ محور طولی بست‌ها نسبت به محور طولی عضو فشاری (α)، نباید کمتر از ۴۵ درجه برای بست‌های مورب ضربدری و ۶۰ درجه برای بست‌های مورب تکی باشد.

نمونه سؤالات بحث (۵)

تمرین ۲۴: در اسکلت‌های فلزی بهترین مقطع برای ستون‌ها: (دادگستری - ۸۴)

۱) آهن گرد توپر
۲) آهن گرد توخالی
۳) قوطی فلزی با مقطع مربع
۴) قوطی فلزی با مقطع مستطیل

حل: این سؤال را می‌توان از ۲ جهت بررسی کرد و به آن پاسخ داد:

الف) یکی از مهمترین محدودیت‌ها در انتخاب مقطع نحوهٔ اتصال تیرها به ستون‌ها می‌باشد که در مقاطع دایروی این کار با دشواری‌های خاصی روبه‌رو خواهد بود.

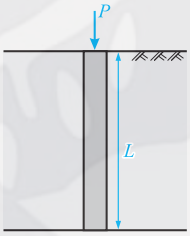
ب) در بین مقطع مربع و مستطیل با توجه به اینکه برای مربع $\lambda_x = \lambda_y$ است در ظرفیت باربری ستون‌ها از تمام مقطع می‌توان به بهترین شکل استفاده کرد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۵: کدام شکل مقطع برای اعضاء بادبندی قاب‌هایی که روی آنها به علت شرایط معماری یا فرآیند بهره‌برداری با دیوار پوشش داده می‌شود مناسب‌ترین می‌باشد؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۱)

۱) مقطع لوله توخالی
۲) مقطع لوله توپر
۳) مقطع جفت ناودانی
۴) مقطع قوطی بسته

حل: با توجه به مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است. سایر مقاطع اگرچه شرط $\lambda_x = \lambda_y$ در آنها برقرار است اما به دلیل محدودیت‌های اجرایی توصیه نمی‌شوند و عموماً از ناودانی برای ساخت بادبند استفاده می‌شود.

تمرین ۲۶: ستون زیر از لولهٔ فلزی با سطح مقطع S سانتی‌متر مربع و طول مؤثر L و شعاع چرخش (ژیراسیون) R سانتی‌متر مفروض است. اگر نسبت L/R افزایش یابد: (دادگستری - ۷۹)



۱) خستگی مجاز ستون در مقابل کمانش به فاکتور L/R مربوط نمی‌باشد.
۲) خستگی مجاز ستون در مقابل کمانش کاهش می‌یابد.
۳) خستگی مجاز ستون در مقابل کمانش افزایش می‌یابد.
۴) خستگی مجاز ستون در مقابل کمانش تغییر نمی‌کند.

حل: با توجه به رابطهٔ تنش بحرانی ستون در کمانش و قرارگیری عبارت $\lambda = \frac{KL}{r}$ در مخرج کسر می‌توان گفت هرچه نسبت $\frac{L}{r}$ بیشتر شود، مقدار λ بیشتر و f_{cr} کاهش می‌یابد. بنابراین ستون ضعیف‌تر خواهد شد. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۲۷: چرا در بیشتر حالات از ستون گرد نمی‌توان استفاده کرد؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) تیرها به راحتی به ستون گرد متصل نمی‌شوند.
۲) غیراقتصادی است.
۳) بار محوری را تحمل نمی‌کند.
۴) همهٔ موارد مذکور صحیح است.

حل: با توجه به مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۸: کدام عبارت در مورد کمانش پیچشی ستون‌ها صحیح‌تر است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۷)

۱) منظور از کمانش پیچشی، تابیدگی (*Warping*) است.

۲) عبارت کمانش پیچشی اصلاً معنی‌دار نیست.

۳) اگر مقطع ستون از نوع پروفیل جدار نازک باز باشد احتمال کمانش پیچشی بیشتر است.

۴) اگر گشتاور پیچشی به ستون وارد نشود خطر کمانش پیچشی وجود ندارد.

● حل: براساس مفاهیم درسنامه کمانش پیچشی یکی از معیارهای طراحی ستون‌ها می‌باشد که رفتار ستون در پیچش را بررسی می‌کند. با توجه به مفاهیم مقاومت مصالح در مقاطع جدار نازک باز مانند مقاطع I شکل تنش‌های حاصل از پیچش بیشتر بوده و احتمال کمانش پیچشی بیشتر است. به بیان دیگر می‌توان گفت مقاطع باز نسبت به بسته رفتار ضعیف‌تری در برابر پیچش دارند.

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۹: در دو ستون مشابه و با ضریب لاغری یکسان که یکی با فولاد ۳۷ ST و دیگری با فولاد ۵۲ ST ساخته شده‌اند: (دادگستری - ۷۱)

۱) درصد کاهش تنش مجاز برای فولاد ۳۷ ST بیشتر است.

۲) درصد کاهش تنش مجاز برای فولاد ۵۲ ST بیشتر است.

۳) درصد کاهش تنش مجاز برای هر دو فولاد یکسان است.

۴) درصد کاهش تنش مجاز تا ضریب لاغری ۵۰ یکسان و از آن به بعد برای ۵۲ ST کمتر است.

● حل: با توجه به مفاهیم بیان شده در درسنامه و با توجه به اینکه ضریب لاغری مشخص نیست، نمی‌توان تعیین کرد که کمانش ستون‌ها الاستیک است یا غیرالاستیک. در حالت الاستیک تنش مجاز فشاری وابسته به F_y نیست، در حالی‌که در حالت غیرالاستیک وابسته به F_y است. بنابراین در مورد این سؤال نمی‌توان قضاوت صحیحی داشت.

تمرین ۳۰: در طراحی ستون‌های مشبک که از ترکیب چند مقطع با اتصالات بست ساخته می‌شوند، در مقایسه با ستون‌های با مقطع توپر گزینهٔ مناسب زیر را داریم؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۱)

۱) فرض می‌شود مقطع ستون‌های مشبک نمی‌تواند به‌صورت یکجا کار کند و لذا کشش و فشار قطری برای ستون‌های مشبک که در آنها فقط بست افقی بکار می‌رود نمی‌تواند با خمشی روی گره‌های اتصال مقابله شود.

۲) ستون‌های مشبک در مقابل کمانش ضعیف می‌باشند و به غیر از کمانش کلی در ستون به علت اعمال برش قابل توجه هر یک از نیمرخ‌ها در بین نقاط اتصال مایل به کمانش می‌باشند.

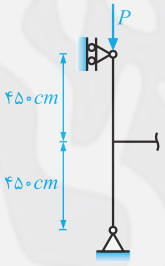
۳) اثر نیروی برشی در ستون‌های با مقاطع توپر در ظرفیت باربری مقطع قابل چشم‌پوشی نیست.

۴) به علت پذیرش برش قابل توجه در بین بست‌های افقی ستون‌های مشبک، بیشتر آیین‌نامه‌ها ستون‌های مشبک با بست افقی را برای سازه‌های مهم توصیه نمی‌کنند.

● حل: با توجه به مفاهیم بیان شده در درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۱: ستونی دو سر مفصل به طول ۹ متر مطابق شکل تحت اثر نیروی فشاری P قرار دارد. ستون در وسط ارتفاع توسط مهاربند جانبی مقید شده و از کمانش حول محور Y ممانعت شده است. ضریب لاغری $\frac{KL}{r}$ مؤثر جهت محاسبه بار کمانش چقدر است؟

$(I_X = ۸۰۹۰ cm^۴ ، A = ۹۱ cm^۲ ، I_y = ۲۸۴۰ cm^۴ \text{ و } F_y = ۲۴۰۰ kg/cm^۲)$



(قوه قضائیه - ۸۷)

۱) ۸۰/۶۴ ۲) ۹۵/۴۶
۳) ۱۶۱/۲۹ ۴) ۱۹۰/۹۲

حل: در کمانش حول محور y که در وسط ستون یک قید وجود دارد، طول محاسباتی ستون برابر ۴۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین ضریب لاغری در این حالت برابر است با:

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \Rightarrow \lambda_y = \frac{kL}{r} = \frac{۱ \times ۴۵۰}{\sqrt{\frac{۲۸۴۰}{۹۱}}} = ۸۰/۶۴$$

در کمانش حول محور x قیدی برای مقابله با کمانش وجود نداشته و داریم:

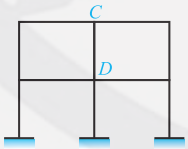
$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \Rightarrow \lambda_x = \frac{kL}{r} = \frac{۱ \times ۹۰۰}{\sqrt{\frac{۸۰۹۰}{۹۱}}} = ۹۵/۴۶$$

در نهایت ضریب لاغری برای طراحی برابر است با:

$$\lambda = max\ (\lambda_x\ ,\lambda_y) = ۹۵/۴۶$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۳۲: در قاب زیر در طرح اولیه پروفیل ۲۰۰ *IPE* برای تیرها انتخاب شده است. در صورتی‌که در طرح اصلاحی از پروفیل ۱۸۰ *IPE* استفاده شود و ابعاد ستون‌ها تغییر نیابند، بار بحرانی و ضریب طول موثر ستون *CD* نسبت به مقدار به‌دست آمده در طرح اولیه به‌ترتیب چگونه تغییر می‌کنند؟



۱) افزایش - افزایش ۲) کاهش - افزایش
۳) کاهش - کاهش ۴) افزایش - کاهش

حل: براساس رابطه محاسبهٔ ضرایب G با کاهش مقطع تیرها از ۲۰۰ *IPE* به ۱۸۰ *IPE* مقدار ممان اینرسی (I) برای تیرها کاهش یافته و در نتیجه پارامتر G برای هر گره افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب طول مؤثر ستون نیز افزایش می‌یابد.

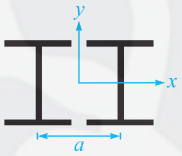
همچنین می‌دانیم که رابطه محاسبهٔ بار بحرانی ستون به‌صورت زیر می‌باشد:

$$P_{cr} = \frac{\pi^۲ EI}{(KL)^۲}$$

در این رابطه با افزایش ضریب طول مؤثر، نیروی بحرانی کاهش پیدا خواهد کرد.
بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تذکر: توجه داشته باشید پارامتر I در صورت رابطه مربوط به ستون است نه تیر. بنابراین تغییر مقطع تیرها تنها در رابطهٔ G مؤثر است.

تمرین ۳۳: ستونی از ۲IPE با فاصله مرکز تا مرکز a تشکیل شده است. اگر ستون دارای تکیه‌گاه‌ها جانبی کافی بوده و تحت تأثیر نیروی محوری P و لنگر خمشی M_x قرار گیرد، (خمش حول محور x)، مناسب‌ترین فاصله a چگونه محاسبه می‌شود؟ (فرض نمایید که در عضو فشاری تنها کمانش فشاری حاکم است)



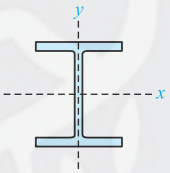
۱) طول مؤثر (KL) ستون نسبت به دو محور یکسان باشد.
۲) شعاع ژیراسیون مقطع ستون حول دو محور یکسان باشد.
۳) ممان اینرسی مقطع ستون حول دو محور یکسان باشد.
۴) ضریب لاغری مؤثر ستون حول دو محور یکسان باشد.

● **حل:** براساس مفاهیم درسنامه، در ستون با امکان کمانش حول هر دو محور حالت بهینه این است که ضریب لاغری در دو جهت یکسان باشد. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۴: در یک ستون با مقطع H شکل چنانچه $K_x = ۲K_y$ باشد، به ازای چه نسبتی از $\frac{I_x}{I_y}$ مقاومت ستون حول هر دو محور یکسان خواهد بود؟ (K و I به ترتیب ضریب طول مؤثر ستون و ممان اینرسی ستون می‌باشند)

۱) ۲ ۲) ۰/۵ ۳) ۴ ۴) ۰/۲۵

● **حل:** برای اینکه مقاومت یک ستون حول هر دو محور قوی و ضعیف یکسان باشد، باید نسبت لاغری حول دو محور یکسان گردد و لذا داریم:



$$\lambda_x = \lambda_y \Rightarrow \frac{K_x L'}{r_x} = \frac{K_y L'}{r_y} \Rightarrow \frac{۲K_y}{\sqrt{\frac{I_x}{A'}}} = \frac{K_y}{\sqrt{\frac{I_y}{A'}}} \Rightarrow \frac{I_x}{I_y} = ۴$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۳۵: چنانچه ستونی با مقطع H شکل با دو ورق نازک به صورت متقارن در طرفین بال تقویت شود، تنش محوری مجاز مقطع تقویت شده نسبت به مقطع بدون تقویت:

۱) همواره افزایش می‌یابد. ۲) همواره ثابت می‌ماند.
۳) همواره کاهش می‌یابد. ۴) می‌تواند کاهش یا افزایش یابد.

● **حل:** ابتدا باید توجه شود که با اضافه شدن ورق‌های نازک به ستون با ضخامت t و عرض h ممان اینرسی حول محور x افزایش یافته و ممان اینرسی حول محور y تغییر چندانی نمی‌کند و بدون دانستن K_x و K_y، نمی‌توان در مورد تنش مجاز اظهارنظر کرد و ممکن است تنش مجاز افزایش یا کاهش یابد (چرا؟). بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۶:معمولاً در تیرها، برخلاف ستون‌ها از بست های موازی یا مورب استفاده نمی‌شود. علت این موضوع کدام است؟

۱) چون بست‌ها نمی‌توانند مقاومت خمشی تیر را تحمل کنند.

۲) چون اتصال تیرهای بست دار به ستون از نظر اجرایی مشکل است.

۳) چون مقاومت برشی تیرهای بست‌دار، کمتر از تیرهای معمولی است.

۴) چون در تیرها معمولاً نیروی محوری ناچیز است.

حل: با توجه به مفاهیم درسنامه، علت اصلی استفاده از بست در ستون به دلیل فاصله دادن دو مقطع از یکدیگر برای نزدیک کردن مقادیر λ_x و λ_y و در نتیجه یکسان کردن امکان کمانش ستون در دو راستا و بهینه کردن طراحی می‌باشد. در حالی‌که در تیرها مقدار نیروی محوری ناچیز بوده و موضوع کمانش کلی مطرح نمی‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۶: بررسی اعضای کششی

پس از بررسی اعضای خمشی و فشاری، اعضای کششی نیز کاربردهای زیادی در یک سازهٔ فولادی خواهند داشت. مهم‌ترین اعضای کششی را می‌توان بادبندهای یک سازهٔ فولادی دانست. همچنین میل مهارهای صفحه ستون نیز در شرایط خاص باید برای کشش طراحی شوند. در سازه‌های صنعتی نظیر خرپاها و پل‌ها نیز با المان‌های کششی مواجه خواهیم بود. در خصوص اعضای کششی می‌توان در حالت کلی به نکات زیر اشاره کرد:

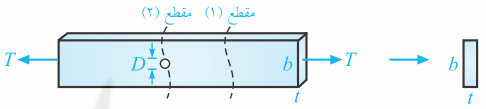
۱) با توجه به اینکه نیروی این اعضاء به‌صورت کششی است این اعضاء به کمانش حساس نیستند و طراحی آنها صرفاً بر مبنای معیار مقاومت (تسلیم) انجام خواهد شد. بنابراین محاسبات ساده‌ای خواهند داشت.

۲) برای اعضای کششی با نیروی محوری کم می‌توان از مقاطع میلگرد، تسمه، کابل و پروفیل سبک نبشی و برای اعضای کششی با نیروی محوری زیاد، از پروفیل‌های دوبل نبشی یا ناودانی و کابل‌های رشته‌ای با مقاومت بالا استفاده کرد.

۳) در طراحی این اعضاء باید سعی کرد تا نیروی محوری تا حد امکان خروج از مرکزیت نداشته باشد تا در عضو ایجاد خمش نکند تا اعضاء صرفاً برای نیروهای محوری طراحی شوند.

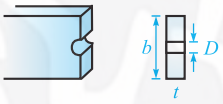
۶-۱- تعاریف اولیه

۱) **سطح مقطع کل یا سطح مقطع ناخالص *(gross section)*:** سطح مقطع عضو کششی بدون درنظر گرفتن اثر سوراخ‌های قرار گرفته در طول عضو کششی است. به‌طور مثال در تسمهٔ زیر، سطح مقطع کل عبارت است از:



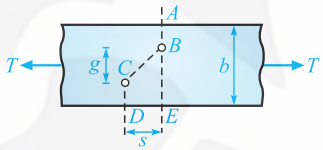
در مقطع (۱) : $A_g = bt$

۲ **سطح مقطع خالص *(net section)***: از تفاضل سطح سوراخ‌های مقطع از سطح مقطع کل به‌دست می‌آید. به طور مثال در شکل فوق، حداقل سطح مقطع خالص در مقطع (۲) رخ داده و مقدار آن عبارت است از:



در مقطع (۲) : $A_n = (b - D)t$

نکته: زمانی که سوراخ‌ها در یک امتداد در راستای قائم نباشند احتمال گسیختگی مقطع در مسیر مورب نیز وجود دارد. مثلاً در شکل زیر باید احتمال گسیختگی ورق علاوه بر مسیر ABE، در مسیر $ABCD$ نیز بررسی شود. در این حالت آیین‌نامه علاوه بر کم کردن مساحت سوراخ، یک بخش اضافه را برای A_n در نظر می‌گیرد. به عبارتی دیگر مساحت خالص دو سوراخ با مسیر مورب بیشتر از دو سوراخ با مسیر قائم است و باعث می‌شود احتمال گسیختگی آن کمتر شود.



مسیر ABE : $A_{n_1} = (b - D)\,t$

مسیر $ABCD$: $A_{n_2} = (b - 2D + \frac{s^2}{4g})t$

تذکر: برای طراحی عضو کششی، $A_{n_{min}}$ در محاسبات درنظر گرفته می‌شود که مقدار آن عبارت است از:

$$A_{n_{min}} = min\{A_{n_1}, A_{n_2}\}$$

نکته: برای محاسبهٔ سطح مقطع خالص، باید از پارامتر D استفاده شود که آن را **قطر محاسباتی سوراخ** می‌گوییم. در جدول زیر برای پیچ‌های مختلف، قطر اسمی پیچ (d_b)، قطر اسمی سوراخ (d) و قطر محاسباتی سوراخ (D) ارائه شده است.

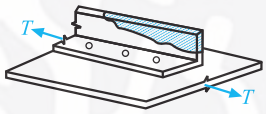
جدول ۵: مشخصات پیچ‌های با سایز متفاوت شامل قطر اسمی پیچ، قطر اسمی سوراخ و قطر محاسباتی سوراخ

نمرهٔ پیچ	M ۱۶	M ۲۰	M ۲۲	M ۲۴	M ۲۷	M ۳۰	$\geq M$ ۳۶
قطر اسمی پیچ (d_b)	۱۶ mm	۲۰ mm	۲۲ mm	۲۴ mm	۲۷ mm	۳۰ mm	$d_b \geq$ ۳۶ mm
قطر اسمی سوراخ (d)	۱۸ mm	۲۲ mm	۲۴ mm	۲۷ mm	۳۰ mm	۳۳ mm	$d_b +$ ۳ mm
قطر محاسباتی سوراخ (D)	۲۰ mm	۲۴ mm	۲۶ mm	۲۹ mm	۳۲ mm	۳۵ mm	$d +$ ۲ mm $= d_b +$ ۵ mm

از جدول فوق می‌توان دریافت که عدد بعد حرف M بیانگر قطر اسمی پیچ بوده و قطر اسمی سوراخ ۲ تا ۳ میلی‌متر بیشتر از قطر اسمی پیچ است. همچنین قطر محاسباتی سوراخ ۲ میلی‌متر بزرگتر از قطر اسمی سوراخ است. بنابراین نیازی به خاطر سپردن اعداد جدول نمی‌باشد.

۳ **سطح مقطع خالص مؤثر عضو کششی:** به دلیل توزیع تنش در مقطع و نحوهٔ اتصال عضو، تمام سطح مقطع در کشش مؤثر نیست. به عنوان مثال نبشی نشان داده شده در شکل صفحه بعد را در نظر بگیرید، این نبشی توسط سه پیچ به ورق زیرین متصل شده است. در این حالت توزیع تنش در نبشی یکنواخت نبوده و در منطقهٔ

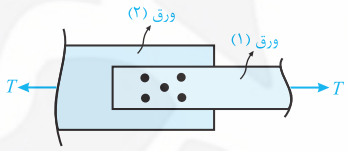
هاشورخورده، مقدار آن کمتر است (بال متصل شده نقش بیشتری در انتقال نیرو دارد). به سطح مقطعی که در کشش مؤثر است سطح مقطع خالص مؤثر عضو کششی گفته می‌شود که با استفاده از ضریب کاهندهٔ U در محاسبات، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:



نمایش توزیع تنش در نبشی اتصال داده شده به ورق

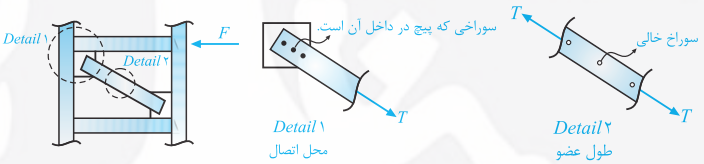
$A_e = UA_g$: اتصال جوشی ، $A_e = UA_n$: اتصال پیچی

۴ **ضریب تأخیر برش (U):** ضریب U در محاسبهٔ سطح مقطع خالص مؤثر، ضریبی کاهشی به نام ضریب تأخیر برشی بوده و مقدار این ضریب به تعداد و آرایش پیچ‌هایی که در اتصال شرکت دارند و همچنین طول خط جوش در اتصالات جوشی بستگی دارد. به عنوان مثال در ورق‌های روی هم مطابق شکل مقابل که با چند پیچ به هم وصل شده‌اند و یا در اعضای کششی که تمام اجزای آنها برای انتقال نیروی کششی متصل شده‌اند، ضریب U برابر ۱/۰ منظور می‌شود.

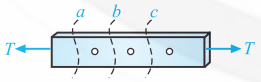


۶-۲- طراحی اعضاء کششی

طراحی اعضاء کششی را می‌توان در دو ناحیه بررسی کرد. این دو ناحیه در بادبند زیر نشان داده شده است:



الف) طراحی در طول یک عضو کششی: گاهی اوقات در طول یک عضو کششی، پیچی بر روی عضو قرار نداشته و تنها باید اثر سوراخ‌های روی عضو درنظر گرفته شود. این سوراخ‌ها می‌تواند به دلیل مسائل اجرایی و یا پیش‌بینی برای اتصالات اضافی در آینده، بر روی عضو ایجاد شده باشد. در این حالت که پیچی وجود ندارد این سوراخ‌ها، از مقدار نیروی محوری در طول عضو کم نمی‌کند ولی توزیع تنش در اطراف سوراخ در حالت الاستیک را غیریکنواخت می‌کند:



$$N_a = N_b = N_c = T$$

مشاهده می‌کنید که تمام مقاطع در طول عضو، برای نیروی محوری T طراحی می‌شوند.

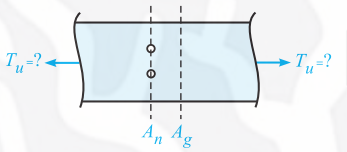
در این حالت دو عامل در نظر گرفته می‌شود:

۱ تسلیم کششی روی سطح مقطع کل

$$\left.\begin{array}{l}\phi_t = ۰/۹ \\ T_n = F_y\, A_g\end{array}\right\} \Rightarrow \quad T_{u_۱} = ۰/۹\, F_y\, A_g$$

۲) گسیختگی کششی روی سطح مقطع خالص

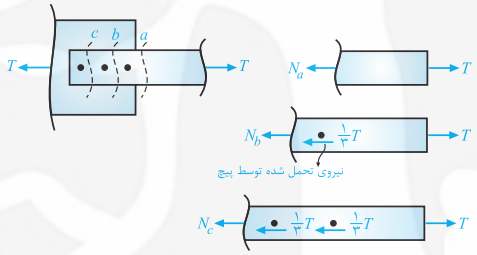
$$\left.\begin{matrix}\phi_t = ۰/۷۵ \\ T_n = F_u A_n\end{matrix}\right\} \Rightarrow \boxed{T_{u۲} = ۰/۷۵ F_u A_n}$$



$$\boxed{T_u = min\,(T_{u۱}, T_{u۲})}$$

ب) طراحی در محل اتصال یک عضو کششی: در محل اتصال یک عضو کششی به عضو دیگر که توسط پیچ یا جوش انجام می‌شود، وسیلهٔ اتصال قسمتی از نیروی کششی را جذب می‌کند. به عبارتی با عبور از وسیلهٔ اتصال، مقداری از نیروی کششی T کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در شکل زیر، با فرض صلب بودن ورق و یکسان بودن پیچ‌ها، نیروی آنها با یکدیگر برابر بوده و معادل $\frac{۱}{۳}T$ است (۳ پیچ وجود دارد و به هر کدام سهم برابر از نیروی T می‌رسد). در این حالت، نیروی محوری در مقاطع مختلف با بررسی تعادل در راستای افق برای نمودار جسم آزاد ورق و پیچ (به صورت جدا از ورق زیرین) عبارت است از:

$N_a = T$



$$N_b = T - \frac{۱}{۳}T = \frac{۲}{۳}T$$

$$N_c = T - \frac{۲}{۳}T = \frac{۱}{۳}T$$

تذکر: به بیان ساده‌تر می‌توان گفت برای بررسی وضعیت در هر نقطه کافی است بررسی کنیم با عبور از چند پیچ به آن نقطه رسیده‌ایم. مثلاً در اتصال فوق ۳ پیچ وجود دارد و هر کدام $\frac{۱}{۳}T$ نیرو خواهند داشت. بنابراین در محل پیچ سوم که از ۲ پیچ عبور کرده‌ایم نیروی طراحی برابر است با:

$$T_{\text{طراحی}} = T_{\text{کل}} - ۲ \times \frac{T}{۳} = T - \frac{۲T}{۳} = \frac{T}{۳}$$

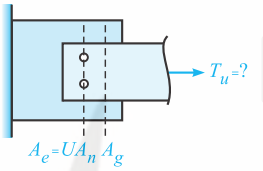
در نهایت با مشخص شدن نیروی طراحی در این حالت نیز دو عامل زیر را در نظر می‌گیریم:

۱) برای تسلیم کششی روی سطح مقطع کل

$$\left.\begin{matrix}\phi_t = ۰/۹ \\ T_n = F_y A_g\end{matrix}\right\} \Rightarrow \boxed{T_{u۱} = ۰/۹ F_y A_g}$$

۲) برای گسیختگی کششی در مقطع خالص موثر عضو در محل اتصال

$$\left.\begin{matrix}\phi_t = ۰/۷۵ \\ T_n = F_u A_e\end{matrix}\right\} \Rightarrow \boxed{T_{u۲} = ۰/۷۵ F_u A_e}$$



$$\boxed{T_u = min\,(T_{u۱}, T_{u۲})}$$

تذکر: مقطع خالص بحرانی، مقطعی است که سوراخ‌های مسیر زنجیره مربوط به آن کمترین مقاومت کششی اسمی را به‌دست می‌دهد.

۶-۳- کنترل لاغری

در اعضای تحت اثر نیروهای کششی به منظور کنترل لاغری اعضاء، مقدارضریب لاغری حداکثر اعضای کششی، $(\frac{L}{r})_{max}$ نباید از ۳۰۰ تجاوز کند. برای قلاب‌ها و میل‌مهارهای کششی که دارای پیش‌تنیدگی اولیه به مقدار کافی باشند، به‌طوری‌که پس از ایجاد کشش اولیه عضو به حالت مستقیم درآید، رعایت محدودیت لاغری ضروری نیست.

۶-۴- ضوابط اعضای مرکب کششی

برخی از نکات اعضای کششی ساخته شده از چند نیمرخ (اعضای مرکب) به شرح زیر می‌باشد:

۱) چنانچه در یک مقطع مرکب تحت کشش، ورق‌های متصل به یک نیمرخ فولادی یا به یک ورق دیگر توسط نوارهای جوش منقطع به یکدیگر متصل شوند، فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع در امتداد طولی عضو نباید از مقادیر زیر بیشتر شود:

- در قطعات رنگ شده و قطعاتی که رنگ نمی‌شوند ولی احتمال زنگ‌زدگی و خوردگی ندارند، ۲۴ برابر ضخامت نازک‌ترین ورق یا ۳۰۰ میلی‌متر
- در قطعات رنگ نشده‌ای که تحت اثر خوردگی ناشی از عوامل جوی قرار داشته باشند، ۱۴ برابر ضخامت نازک‌ترین ورق یا ۱۸۰ میلی‌متر

۲) در اعضای کششی که از دو یا تعداد بیشتری نیمرخ در تماس با یکدیگر تشکیل می‌شوند، فاصلهٔ مرکز تا مرکز پیچ‌ها یا فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع باید طوری انتخاب شود که نسبت لاغری هر یک از اجزای تشکیل‌دهندهٔ عضو در فاصلهٔ آزاد از ۳۰۰ بیشتر نباشد. بعلاوه، فاصلهٔ مرکز تا مرکز وسایل اتصال یا فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع نباید از ۶۰۰ میلی‌متر بیشتر باشد.

۳) در اعضای کششی مرکب، به کار بردن ورق‌های پوششی مشبک در وجوه باز نیمرخ مرکب مجاز است. ضخامت ورق‌های پوششی مشبک نباید کمتر از $\frac{۱}{۵۰}$ فاصلهٔ بین خطوط جوش یا قیدهایی باشد که آنها را به اجزای عضو متصل می‌کند. فاصلهٔ مرکز تا مرکز وسایل اتصال یا فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع در امتداد طولی ورق مشبک نباید از ۱۵۰ میلی‌متر بیشتر باشد.

۴) در اعضای کششی مرکب، به‌کار بردن بست‌های موازی در وجوه باز نیمرخ مرکب مجاز است. پهنای بست‌های موازی در امتداد طولی عضو باید حداقل به اندازهٔ $\frac{۲}{۳}$ فاصلهٔ بین خطوط جوش با قیدهایی باشد که آنها را به اجزای عضو متصل می‌کند. ضخامت بست‌های موازی نباید کمتر از $\frac{۱}{۵۰}$ فاصلهٔ مذکور باشد. فاصلهٔ مرکز تا مرکز بست‌های موازی باید طوری انتخاب شود که نسبت لاغری هر یک از اجزای تشکیل‌دهندهٔ عضو در این فاصله از ۳۰۰ بیشتر نباشد.

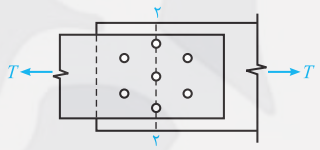
نمونه سؤالات بحث (۶)

تمرین ۳۷: محدودیت ضریب لاغری در اعضایی که برای تحمل کشش در سازه طرح شده‌اند ولی احتمالاً مقداری نیروی فشاری نیز بر آنها وارد خواهد شد کدام است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۵)

۱) ضریب لاغری نباید از ۲۰۰ تجاوز کند.
۲) ضریب لاغری نباید از ۳۰۰ تجاوز کند.
۳) ضریب لاغری عضو فشاری نباید از ۲۰۰ و ضریب لاغری عضو کششی نباید از ۳۰۰ تجاوز کند.
۴) لازم نیست محدودیت ضریب لاغری فشاری را تأمین کند.

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۳۸: برای کنترل تنش در ورق در مقطع ۲-۲ چه بخشی از نیروی T باید در نظر گرفته شود؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۶ و ۸۷)



۱) $\frac{۵}{۷}$ ۲) $\frac{۳}{۵}$ ۳) $\frac{۳}{۷}$ ۴) $\frac{۱}{۳}$

حل: براساس مفاهیم درسنامه به منظور کنترل تنش در مقطع ۲-۲ با توجه به اینکه تعداد کل پیچ‌ها ۷ عدد بوده و در محل مقطع ۲-۲ از ۲ پیچ عبور کرده‌ایم، بنابراین مقدار نیرو در محل مقطع ۲-۲ برابر است با:

$$T_{۲-۲} = T_{\text{کل}} - T_{\text{دو پیچ}} = T - \frac{۲}{۷}T = \frac{۵}{۷}T$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۹: مهم‌ترین دلیل اینکه در قطعات فولادی کششی سطح مقطع خالص مؤثر از سطح مقطع خالص کوچکتر است، کدام‌یک از موارد زیر است؟

۱) شکل‌پذیری محدود فولاد در زمان کاربرد
۲) وجود سوراخ در قطعه و تمرکز تنش حاصل از آن
۳) خروج از مرکزیت بار نسبت به مرکز سطح قطعه کششی
۴) آسیب به فولاد در جداره‌ها در اثر عملیات سوراخ‌کاری

حل: با توجه به مطالب درسنامه، منظور از سطح مقطع خالص مؤثر A_e و منظور از سطح مقطع خالص A_n می‌باشد که رابطهٔ زیر بین آنها برقرار است.

$$A_e = UA_n < A_n \quad , \quad U < ۱/۰$$

باتوجه به رابطهٔ فوق می‌توان گفت علت کوچک‌تر بودن A_e از A_n کوچکتر از یک بودن ضریب U می‌باشد. بنابراین پاسخ سؤال به این موضوع بر می‌گردد که چرا معمولاً ضریب تأخیر برشی U از یک کوچکتر است. دلیل کوچکتر از یک بودن U آن است که معمولاً بار به‌صورت محوری به عضو منتقل نمی‌شود و خروج از مرکزیت دارد. اگر خروج از مرکزیت نیرو نسبت به مرکز سطح قطعه کششی برابر $\bar{x}$ باشد، ضریب تأخیر برشی U از رابطه $U = ۱ - \frac{\bar{x}}{L}$ به‌دست می‌آید که L فاصلهٔ بین پیچ‌های اول و آخر اتصال در امتداد نیرو است. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۴۰: کدام‌یک از اقدامات زیر باعث کم شدن احتمال گسیختگی ورق در مسیر نشان داده شده خواهد شد؟

۱) کاهش فاصلهٔ قائم پیچ‌ها
۲) کاهش عرض ورق
۳) کاهش فاصلهٔ افقی پیچ‌ها
۴) کاهش ضخامت ورق

حل: براساس رابطهٔ ارائه شده داریم: $A_n = bt - nDt + \frac{S^2}{4g}t = (b - nD + \frac{S^2}{4g})t$

باتوجه به رابطهٔ فوق، کاهش فاصلهٔ قائم پیچ‌ها (g) مقدار A_n را افزایش داده و احتمال گسیختگی کمتر خواهد شد. سایر گزینه‌ها A_n را کاهش می‌دهند. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بحث ۷: مروری بر ضوابط لرزه‌ای

یکی از مهم‌ترین وظایف طراح سازه، طراحی مناسب سازه در شرایط لرزه‌ای و در برابر نیروی زلزله می‌باشد. هدف اساسی الزامات طراحی لرزه‌ای، تعیین تناسب‌بندی جزئیات اعضاء و اتصالات آنها به نحوی است که سازهٔ ساختمان ضمن حفظ ایستایی کلی خود در برابر زلزله‌های شدید، تلفات جانی را حداقل نماید. از سوی دیگر، با رعایت این الزامات، انتظار می‌رود که سازهٔ ساختمان در برابر زلزله‌های خفیف و متوسط از لحاظ پایداری، سختی و مقاومت عملکرد رضایت‌بخشی از خود نشان دهد.

نکته: مهمترین سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به شرح زیر می‌باشند:

۱) قاب‌های خمشی در سه ردهٔ ویژه، متوسط و معمولی
۲) قاب‌های ساختمانی ساده توام با مهاربندی همگرا در دو ردهٔ ویژه و معمولی
۳) قاب‌های ساختمانی ساده توأم با مهاربندی واگرا در دو ردهٔ ویژهٔ و معمولی
۴) سیستم‌های دوگانه یا ترکیبی (متشکل از قاب‌های خمشی ویژه یا متوسط با مهاربندهای همگرای ویژه)
۵) سیستم‌های دوگانه یا ترکیبی (متشکل از قاب‌های خمشی ویژه یا متوسط با مهاربندهای واگرای ویژه)

در ادامه و در قالب بخش‌های مختلف به بررسی مهمترین ضوابط این بحث می‌پردازیم:

۷-۱- حدود شکل‌پذیری سازه‌های فولادی

به‌طور کلی میزان شکل‌پذیری قاب‌های باربر جانبی به این موضوع بستگی دارد که این سازه‌ها چه اندازه بتوانند در مقاطع خاصی از خود، تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی (پلاستیک) را پذیرا باشند و این ویژگی را در بارگذاری‌های رفت و برگشتی زلزله حفظ کرده و با کاهش مقاومت و سختی قابل ملاحظه روبه‌رو نشوند. بر این اساس سه حد شکل‌پذیری زیاد، متوسط و کم تعریف می‌شود که در آن تغییرشکل‌های نظیر تغییر مکان نسبی طبقات به‌ترتیب زیاد، متوسط و کم می‌باشد.

۷-۲- ناحیهٔ حفاظت شدهٔ اعضا

ناحیهٔ حفاظت شده در یک عضو از سازه که شامل ناحیهٔ شکل‌پذیر و نواحی مجاور آن است، به ناحیه‌ای از عضو اطلاق می‌شود که انتظار می‌رود در این ناحیه تغییرشکل‌های فراارتجاعی ایجاد شود. نظر به اهمیت ناحیهٔ حفاظت شده و رفتار حساس آن در حرکات رفت و برگشتی سازه، این ناحیه باید عاری از هرگونه عملیاتی باشد که موجب مخدوش شدن عملکرد شکل‌پذیر عضو در این ناحیه می‌شود. در هر یک از سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای، موقعیت و طول ناحیهٔ حفاظت شده باید مطابق بخش‌های بعدی این فصل تعیین شود. همچنین به منظور جلوگیری از مخدوش شدن عملکرد شکل‌پذیر عضو، در ناحیهٔ حفاظت شدهٔ اعضا باید الزامات عمومی زیر نیز رعایت شود:

الف) در ناحیهٔ حفاظت شدهٔ اعضای سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای متوسط و ویژه، به کاربردن وصلهٔ مستقیم یا غیرمستقیم جوشی یا پیچی نیمرخ‌ها یا ورق‌های تشکیل‌دهندهٔ عضو ممنوع است.

ب) هرگونه ناپیوستگی ناشی از عملیات اجرائی اضافی در ساخت و نصب مانند سوراخ‌کاری جوش‌های موضعی، تخلیهٔ جوش، وسایل کمکی برای نصب، ناصافی‌های ناشی از برش‌های حرارتی در ناحیهٔ حفاظت شدهٔ اعضا ممنوع بوده و در صورت وجود باید به نحو مناسبی برطرف شده و تعمیر گردد.

پ) در ناحیهٔ حفاظت شده به کارگیری گل‌میخ‌های فولادی با هر نوع برشگیر فولادی در بال تیرها ممنوع است، مگر آنکه در اتصالات پیش تأیید شده مجاز دانسته شده باشد.

ت) خال‌جوش کردن عرشهٔ فولادی تیرهای مختلط در ناحیهٔ حفاظت شده در صورتی‌که در این ناحیه بال تیر را دچار آسیب ننماید، مجاز است.

ث) به کارگیری هرگونه اتصال جوشی یا پیچی برای اتصالات اجزای نما، دیوارهای داخلی و خارجی تیرهای نعل درگاهی، تیرهای فرعی سقف نگه‌دارنده‌های تأسیساتی در محدودهٔ شکل‌پذیر ناحیهٔ حفاظت شدهٔ اعضای سیستم باربر جانبی لرزه‌ای ممنوع است.

نکته: ناحیهٔ حفاظت شده در سیستم‌های باربر جانبی مختلف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

۱) در قاب‌های خمشی فولادی، معمولی ناحیه حفاظت شده تعریف نمی‌شود و در سایر قاب‌های خمشی براساس آزمایشات تأیید شده به‌دست می‌آید.

(قاب خمشی)

۲) ناحیهٔ حفاظت شده برای قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرای ویژه برای مهاربندها یک چهارم طول در قسمت میانی عضو، و در دو انتها فاصله‌ای به طول عمق مقطع عضو در صفحه کمانش از بر اتصال عضو مهاربندی به سمت داخل عضو و همچنین اجزای اتصال مهاربندها به تیرها و ستون‌ها می‌باشد.

۳) ناحیهٔ حفاظت شده در قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرا، تمام طول تیر پیوند می‌باشد.

۷-۳- تنش مورد انتظار مصالح و ضرایب R_t , R_y

در برخی از کنترل‌های طراحی لرزه‌ای، لازم است تا نیروهای وارد بر اعضای سازه افزایش یابد که نوعی ضریب اطمینان در طراحی محسوب می‌شود. افزایش مذکور با استفاده از یک ضریب بزرگتر از یک انجام می‌گیرد.

الف) تنش تسلیم مورد انتظار فولاد: تنش تسلیم مورد انتظار فولاد برابر $R_y F_y$ بوده که در آن F_y تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد و R_y برابر نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد است که برای انواع تولیدات فولاد متفاوت بوده و به عوامل متعددی نظیر شکل مقاطع، افزودنی‌های به‌کار رفته در طی روند تولید فولاد در کارخانه‌ها بستگی دارد و مقدار آن باید مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شود.

ب) تنش کششی نهایی مورد انتظار فولاد: تنش کششی نهایی مورد انتظار فولاد برابر $R_t F_u$ بوده که در آن F_u تنش کششی نهایی مشخصهٔ فولاد و R_t برابر نسبت تنش کششی نهایی مورد انتظار به تنش کششی نهایی مشخصهٔ فولاد است و مقدار آن باید مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شود.

پ) تنش فشاری مورد انتظار بتن: تنش فشاری مورد انتظار بتن برابر $R_c f'_c$ بوده که در آن f'_c تنش فشاری مشخصهٔ نمونهٔ استوانه‌ای بتن و R_c برابر نسبت تنش فشاری مورد انتظار به تنش فشاری مشخصهٔ بتن است و مقدار آن باید مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شود.

جدول ٦: مقادیر R_y و R_t فولاد و R_c بتن

مقادیر R_y و R_t فولاد		
نوع مصالح	R_y	R_t
مقاطع لوله‌ای و قوطی شکل نورد شده	۱/۲۵	۱/۱
سایر مقاطع نورد شده I شکل و H شکل و ناودانی و سپری و نبشی	۱/۲	۱/۱
مقاطع ساخته شده از ورق، ورق‌ها و تسمه‌ها	۱/۱۵	۱/۱
میلگردها	۱/۲	۱/۲
مقادیر R_c بتن		
تنش فشاری مشخصهٔ بتن		**R_c**
$f'_c \le ۵۰\ MPa$		۱/۴
$f'_c > ۵۰\ MPa$		۱/۲

۷-۴- ضریب C_{pr}

C_{pr} ضریبی است که در برگیرندهٔ آثار عواملی از قبیل سخت‌شدگی، قیدهای موضعی و ملحقات موجود در اتصال تیر به ستون است و برای محاسبهٔ حداکثر نیروی ایجاد شده در اعضاء و وسایل اتصال به‌کار گرفته می‌شود. به‌جز در مواردی‌که برای C_{pr} عدد خاصی پیش‌بینی شده است، مقدار آن باید از رابطهٔ زیر تعیین شود:

$$۱/۱ \le C_{pr} = \frac{(F_y + F_u)}{۲F_y} \le ۱/۲$$

در این رابطه: F_y تنش تسلیم فولاد و F_u تنش کششی نهایی فولاد است.

نکته: برای فولادهای ST ۳۷ و ST ۵۲، مقدار C_{pr} برابر ۱/۲ می‌باشد (چرا؟).

۷-۵- الزامات لرزه‌ای مشخصات مصالح فولادی

جهت تأمین شکل‌پذیری مناسب سازه لازم است تا علاوه بر کنترل ناپایداری موضعی و کلی مقاطع از قبیل کمانش جانبی - پیچشی در محدودهٔ رفتار پلاستیک، فولاد مصرفی باید دارای ویژگی‌هایی باشد که در ادامه به آن اشاره شده است:

۱) در فولاد مورد استفاده در سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای، علاوه بر رعایت ضوابط عادی، رعایت ضوابط لرزه‌ای نیز ضروری است. تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد در اعضایی که در آنها انتظار رفتار فراارتجاعی محدود یا قابل ملاحظه می‌رود و جزئی از سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای متوسط یا ویژه هستند، نباید از ۳۵۵ مگاپاسکال تجاوز نماید در این نوع سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای نسبت تنش تسلیم به تنش کششی نهایی فولاد نباید از ۰/۸ بزرگ‌تر باشد.

۲) تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد در اعضایی که در آنها انتظار رفتار فراارتجاعی حداقل می‌رود و جزئی از سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای معمولی هستند، نباید از ۴۶۰ مگاپاسکال بیشتر باشد. در این نوع سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای نسبت به تنش تسلیم به تنش کششی نهایی فولاد نباید از ۰/۸۵ بزرگ‌تر باشد.

۳) تنش تسلیم مشخصهٔ فولاد برای ستون‌ها سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی ویژه، قاب‌های خمشی خرپایی ویژه، قاب‌های خمشی مختلط ویژه قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرای مختلط ویژه و قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرای مختلط و نیز ستون‌های کلیهٔ قاب‌های مهاربندی شدهٔ فولادی و دیوارهای برشی فولادی می‌تواند از ۳۵۵ مگاپاسکال بزرگ‌تر باشد، اما در هر حال نباید از ۴۶۰ مگاپاسکال تجاوز نماید.

۴) **مقاطع سنگین:** در مورد مقاطع سنگین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) در اعضای سیستم باربر جانبی لرزه‌ای، در مقاطع گرم نورد شده، فولاد سازه‌ای به‌کار رفته در بال‌های با ضخامت مساوی یا بیشتر از ۴۰ میلی‌متر باید دارای حداقل طاقت نمونهٔ شیار داده شدهٔ شارپی ۲۷ ژول در دمای ۲۰ درجهٔ سلسیوس باشد.

ب) در اعضای سیستم باربر جانبی لرزه‌ای، در سایر مقاطع، فولاد سازه‌ای به‌کار رفته در ورق‌های با ضخامت ۵۰ میلی‌متر و بیشتر که در موارد زیر استفاده می‌شود. در هر موقعیتی که از سوی روش‌های استاندارد مجاز دانسته شده است، باید دارای حداقل طاقت نمونه شیار داده شدهٔ شارپی ۲۷ ژول در دمای ۲۰ درجه سلسیوس باشد:

- اعضای ساخته شده از ورق
- ورق‌های اتصالی که انتظار می‌رود در آنها در اثر بارهای لرزه‌ای، کرنش‌های غیرارتجاعی ایجاد گردد.
- هستهٔ فولادی مهاربندی‌های کمانش تاب

۵) **مصالح جوش:** در مورد مصالح جوش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) جوش به‌کار رفته در سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای

در کلیهٔ جوش‌های به‌کار رفته در اعضا و اتصالات سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای مشخصات فلز پرکننده باید مطابق با مشخصات جدول‌های ۷ و ۸ باشد.

جدول ۷: مشخصات فلز پرکنندهٔ جوش به کار رفته در سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای

مشخصات	ردهٔ الکترود (فلز پرکنندهٔ جوش)	
	E ۷۰	E ۸۰
تنش تسلیم	حداقل ۴۰۰ MPa	حداقل ۴۷۰ MPa
تنش کششی نهایی	حداقل ۴۹۰ MPa	حداقل ۵۵۰ MPa
تغییر طول نسبی	حداقل ۲۲ درصد	حداقل ۱۹ درصد
طاقت نمونهٔ شیار داده شدهٔ شارپی	حداقل ۲۷ ژول در دمای منفی ۱۸ درجهٔ سلسیوس	حداقل ۲۷ ژول در دمای منفی ۱۸ درجه سلسیوس

ب) جوش‌های بحرانی لرزه‌ای

در مواردی‌که در این فصل جوش‌ها به‌صورت جوش‌های بحرانی لرزه‌ای مشخص شده‌اند، فلز پرکنندهٔ جوش باید علاوه بر برآورده نمودن مشخصات جدول (۷)، باید مشخصات مطابق جدول (۸) را نیز برآورده نماید.

جدول ۸: مشخصات فلز پرکننده در جوش‌های بحرانی لرزه‌ای

مشخصات	ردهٔ الکترود (فلز پرکنندهٔ جوش)	
	E ۷۰	E ۸۰
تنش تسلیم	حداقل ۴۰۰ MPa	حداقل ۴۷۰ MPa
تنش کششی نهایی	حداقل ۴۹۰ MPa	حداقل ۵۵۰ MPa
تغییر طول نسبی	حداقل ۲۲ درصد	حداقل ۱۹ درصد
طاقت نمونهٔ شیار داده شدهٔ شارپی	حداقل ۵۴ ژول در دمای ۲۰ درجهٔ سلسیوس	حداقل ۵۴ ژول در دمای ۲۰درجه سلسیوس

۷-۶- ترکیبات بار زلزله تشدید یافته

در برخی از کنترل‌های طرح لرزه‌ای لازم است تا از ترکیبات بار زلزلهٔ تشدید یافته استفاده شود. ترکیبات بار زلزلهٔ تشدید یافته با جایگزینی نیروهای زلزلهٔ طرح (E) با زلزلهٔ تشدید یافته $(\Omega_0 E)$ در ترکیبات متعارف بارها به‌دست می‌آیند. پارامتر Ω_0 به **ضریب اضافه مقاومت** سیستم سازه‌ای موسوم است و مقدار آن به عوامل متعددی نظیر درجات نامعینی سازه، مقاومت‌های بالاتر از حد تعیین شدهٔ مصالح مصرفی، سخت‌شوندگی کرنش‌ها، جزئیات‌بندی اعضاء، اثرات اجزای غیرسازه‌ای و ... بستگی دارد.

جدول ۹: ضریب اضافه مقاومت (Ω_0) برای انواع سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای

نوع سیستم باربر جانبی لرزه‌ای	Ω_0
کلیهٔ قاب‌های خمشی فولادی	۳
کلیهٔ قاب‌های ساختمانی ساده توأم با مهاربندی هم‌محور و برون‌محور فولادی	۲
کلیهٔ سیستم‌های دوگانه یا ترکیبی	۲/۵

۷-۷- محدودیت تیرها و ستون‌ها در قاب‌های خمشی

در خصوص الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی معمولی (OMF)

قاب‌های خمشی معمولی (OMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که از آنها انتظار تغییرشکل‌های فراارتجاعی حداقلی در برابر نیروی جانبی زلزله می‌رود و به این علت برای طراحی اعضا و اتصالات آنها مقررات تکمیلی حداقلی در نظر گرفته شده است.

در قاب‌های خمشی معمولی تیرها و ستون‌ها باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) بال‌های تیرها و ستون‌ها باید، فشرده بوده و جان آنها غیر لاغر باشد.

ب) استفاده از ستون‌های با مقطع متشکل از چند نمیرخ بستدار مجاز است، مشروط بر آنکه خمش در ستون حول محور با مصالح (عمود بر جان‌های مقاطع) باشد.

پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخدار و با سوراخ‌های متوالی (لانه زنبوری) به‌عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم به ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید در یک سوم میانی طول دهانهٔ تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت برشی و خمشی تیر با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه به‌طور کامل فراهم گردد.

ت) در دو انتهای تیر در طولی برابر عمق تیر، ایجاد هرگونه تغییر در پهنای بال یا ضخامت بال مجاز نیست. در سایر نواحی تیر، تغییر تدریجی در پهنا یا ضخامت از ورق بزرگ‌تر به ورق کوچک‌تر، باید با شیب حداکثر ۱/۰ به ۲/۵ صورت گیرد.

ث) در تیرهای این نوع قاب، ناحیه‌ای به‌عنوان حفاظت شده در نظر گرفته نمی‌شود.

۲ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی متوسط (IMF)

قاب‌های خمشی متوسط (IMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که در برابر نیروی جانبی زلزله بتوانند، تغییرشکل‌های فراارتجاعی محدودی را تحمل کنند.

در طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها، چنانچه بخشی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه باشند، باید الزامات تکمیلی سخت‌گیرانه‌تری نسبت به قاب‌های خمشی معمولی منظور شود.

در قاب‌های خمشی متوسط، تیرها و ستون‌ها باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) اجزای مقاطع تیرها و ستون‌ها باید از نوع فشردهٔ لرزه‌ای با محدودیت حداکثر نسبت پهنا به ضخامت برابر λ_{md} مطابق مبحث دهم باشند.

ب) استفاده از ستون‌های با مقطع متشکل از چند نیمرخ بستدار مجاز نیست.

پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخدار با سوراخ‌های متوالی (لانه زنبوری) به‌عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم به ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیهٔ حفاظت شده دو انتهای تیر و در یک سوم میانی طول دهانهٔ تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت‌های موجود برشی و خمشی تیر، با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه، به طور کامل فراهم گردد.

ث) در نواحی غیر از ناحیهٔ حفاظت شدهٔ دو انتهای تیر، تغییر تدریجی در پهنا یا ضخامت تیر از ورق بزرگ‌تر به ورق کوچک‌تر، باید با شیب حداکثر ۱ به ۲/۵ صورت گیرد. در ناحیهٔ حفاظت شده، هرگونه تغییر در پهنا یا ضخامت بال و سوراخ‌کاری باید براساس آزمایش‌های تأیید شده و در خصوص اتصالات پیش تأیید شدهٔ براساس ضوابط آن بخش باشد.

۳ الزامات لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه (SMF)

قاب‌های خمشی ویژه (SMF) به قاب‌هایی اطلاق می‌شوند که در برابر نیروی جانبی زلزله بتوانند تغییرشکل‌های فراارتجاعی قابل ملاحظه‌ای را تحمل نمایند.

برای طراحی اعضا و اتصالات این نوع قاب‌ها، چنانچه بخشی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه باشند، الزامات لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌تری نسبت به قاب‌های خشمی متوسط در نظر گرفته شده است.

تیرها و ستون‌ها در قاب‌های خمشی ویژه باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) اجزا مقاطع تیرها و ستون‌ها باید از نوع فشردهٔ لرزه‌ای با محدودیت حداکثر نسبت پهنا به ضخامت برابر λ_{hd} مطابق مبحث دهم باشند.

ب) در ستون‌ها استفاده از مقطع متشکل از چند نیمرخ بست‌دار مجاز نیست. اجزای مقطع ستون باید در تمامی طول آن به‌صورت پیوسته به یکدیگر متصل شوند.

پ) استفاده از تیرهای با جان سوراخ‌دار و با سوراخ‌های متوالی (لانه زنبوری) به‌عنوان اعضای باربر جانبی مجاز نیست. در صورت لزوم ایجاد سوراخ در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیهٔ حفاظت شدهٔ دو انتهای تیر و در یک سوم میانی طول دهانهٔ تیر قرار گیرد. اطراف سوراخ باید به نحوی تقویت شود که مقاومت‌های موجود برشی و خمشی تیر، با احتساب آثار ناشی از خمش ثانویه به‌طول کامل فراهم گردد.

ث) در نواحی غیر از ناحیهٔ حفاظت شدهٔ دو انتهای تیر، تغییر تدریجی در پهنا یا ضخامت تیر از ورق بزرگ‌تر به ورق کوچک‌تر، باید با شیب حداکثر ۱ به ۲/۵ صورت گیرد. در ناحیهٔ حفاظت شدهٔ دو انتهای تیر، هر گونه تغییر در پهنا یا ضخامت بال و سوراخ‌کاری باید براساس آزمایش‌های تأیید شده و در خصوص اتصالات پیش تأیید شدهٔ براساس ضوابط آن بخش باشد.

۴ اتصال اعضای مهاربندی

در قاب‌های مهاربندی شده واگرا اتصالات اعضای مهاربندی باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) در صورتی‌که تیر پیوند به ستون پیوند نباشد، اتصالات اعضای مهاربندی می‌توانند به‌صورت مفصلی یا گیردار طراحی شوند.

ب) در صورتی‌که تیر پیوند به ستون متصل باشد، اتصالات اعضای مهاربندی باید به‌صورت صلب (گیردار کامل) طراحی شوند.

پ) اتصالات تیرهای پیوند به ستون باید به‌صورت صلب (گیردار کامل) طراحی شوند.

تذکر ۱: در سازه‌های با شکل‌پذیری زیاد و متوسط که از آنها انتظار تحمل تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی قابل ملاحظه می‌رود، برای مقاطع اعضا ضوابط سخت‌گیرانه‌تری در رابطه با کمانش موضعی بال‌ها و جان‌ها اعمال می‌شود. در نتیجه برای نسبت پهنا و یا ارتفاع به ضخامت اجزا در اعضای تحت فشار یا فشار و خمش رعایت اعداد کوچکتری مقرر می‌گردد. در این گونه سیستم‌های سازه‌ای تعریف جدیدی از مقطع فشرده با عنوان «مقطع فشردهٔ لرزه‌ای» معرفی می‌شود.

تذکر ۲: مقادیر λ_{md} و λ_{hd} برای مقاطع مختلف در جداول آیین‌نامه بیان شده است. به عنوان مثال برای مقاطع I شکل نورد شده در شکل‌پذیری زیاد داریم:

$$\frac{b}{t} \le ۰/۳ \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید محدودیت بیان شده با E رابطهٔ مستقیم و با F_y رابطهٔ عکس دارد. همچنین برای شرط فشردهٔ لرزه‌ای کوچکتر از محدودیت آیین‌نامه در حالت فشرده است.

در ادامه و به منظور تکمیل ضوابط مربوط به هر کدام از سطوح شکل‌پذیری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تذکر ۱: در طراحی اتصالات تیر به ستون و نیز وصله تیرهای قاب‌های خمشی معمولی می‌توان محل تشکیل مفصل پلاستیک را در محل اتصال تیر به ستون در نظر گرفت.

تذکر ۲: در قاب‌های خمشی متوسط اتصال تیر به ستون باید به گونه‌ای طراحی شود که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک را در داخل تیر فراهم نماید. انجام این امر می‌تواند از طریق ضعیف کردن مقطع تیر در فاصله‌ای محدود از بر ستون صورت گیرد.

۷-۸- الزامات لرزه‌ای اتصالات پیچی

اتصالات پیچی کلیهٔ اعضای باربر جانبی لرزه‌ای می‌تواند از نوع پیش‌تنیده یا لغزش بحرانی باشد، مگر آنکه در بخش‌های دیگر این فصل استفاده از اتصال لغزش بحرانی الزام شده باشد. در اینگونه اتصالات علاوه بر الزامات عمومی، الزامات زیر نیز باید رعایت شوند:

الف) تحت اثر برش ناشی از نیروهای زلزله، سوراخ پیچ‌ها می‌تواند از نوع استاندارد یا لوبیایی کوتاه با شیار عمود بر جهت نیرو باشد. در این نوع اتصالات استفاده از سوراخ‌های بزرگ شده به شرطی مجاز است که:

۱) اتصال مربوط به عضو مهاربندی باشد.

۲) سوراخ‌های بزرگ‌شده فقط در یکی از ورق‌های اتصال تعبیه شده باشد.

۳) اتصال به‌صورت لغزش بحرانی طراحی شود.

ب) تحت اثر کشش خالص ناشی از نیروهای زلزله، سوراخ پیچ‌ها می‌تواند از نوع استاندارد یا بزرگ‌شده و یا لوبیایی کوتاه باشد.

پ) سطوح تماس کلیهٔ اتصالات باید دارای شرایط سطحی حداقل کلاس A باشند.

استثناء: در حالت‌های زیر سطوح تماس می‌تواند دارای شرایط سطحی کمتر از کلاس A باشند:

۱) اتصالات گیردار فلنجی پیش تأیید شده در قاب‌های خمشی

۲) اتصالاتی که در آنها انتقال نیروهای ناشی از زلزله از طریق کشش یا فشار و نه از طریق برش در پیچ‌ها صورت گیرد.

۷-۹- الزامات لرزه‌ای ستون و وصلهٔ ستون‌ها

۱) به جز در موارد خاص در کلیهٔ ستون‌های باربر و غیرباربر جانبی لرزه‌ای محل درز وصله نباید از ۱۲۰۰ میلی‌متر به بال متصل به ستون نزدیک‌تر باشد. همچنین در جایی که ارتفاع آزاد ستون کمتر از ۲/۴ متر است، محل وصله باید در وسط ارتفاع آزاد ستون در نظرگرفته شود.

۲ اتصال وصلهٔ ستون به هر یک از دو قطعهٔ ستون وصله شونده باید با یک نوع وسیلهٔ اتصال جوش یا پیچ پرمقاومت، انجام شود و در مقطع عدم تقارن ایجاد نکند. اتصال وصله به یکی از قطعات ستون تماماً جوشی و به دیگری تماماً پیچی نیز مجاز است.

۳ در وصلهٔ ستون‌های با ابعاد و مقطع متفاوت، به‌جای استفاده از ورق‌های پرکننده با ضخامت‌های زیاد، ارجح است ابتدا مقطع بزرگتر با شیب حداکثر ۱ به ۶ به مقطع کوچکتر تبدیل شده و سپس اتصال وصله صورت گیرد.

۴ در ستون‌های باربر جانبی لرزه‌ای با مقطع مختلط محاط در بتن و با شکل‌پذیری متوسط، طول ناحیهٔ بحرانی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

طول بحرانی $\geq max$ ($\frac{۱}{۶}\times$ بزرگترین بُعد مقطع ستون و ارتفاع آزاد ستون ، $۴۵۰\ mm$)

۵ در مقاطع مختلط فاصله اولین خاموت از بر اتصال ستون به تیر نباید بیشتر از نصف فاصله خاموت‌ها در ناحیه بحرانی باشد.

۶ ساخت مفتول‌های جوش شده به عنوان آرماتورهای عرضی در ستون‌های باربر جانبی لرزه‌ای با مقطع محاط در بتن و با شکل‌پذیری متوسط و زیاد مجاز نیست.

۷ در محل وصله ستون‌های متشکل از چند نیمرخ لازم است هر یک از ستون‌های وصله شونده در ارتفاعی حداقل به اندازهٔ بعد بزرگتر مقطع ستون به‌صورت یکپارچه درآیند و سپس وصله شوند.

۸ جوش‌هایی که در کارخانه و به صورت لب به لب صورت می‌گیرند، باید به‌صورت نفوذی کامل انجام شوند. در صورتی که پس از انجام آزمایش مشخص شود که جوش مذکور با نفوذ نسبی صورت گرفته است این جوش در صورتی مورد تأیید خواهد بود که مقاومت طراحی اتصال مذکور حداقل دو برابر مقاومت مورد نیاز باشد.

۷-۱۰- الزامات لرزه‌ای تیرها و وصلهٔ تیرها

۱ وصلهٔ تیرها باید خارج از ناحیهٔ حفاظت شدهٔ دو انتهای تیر قرار گیرد.

۲ در صورت استفاده از وصلهٔ مستقیم، وصله باید با جوش نفوذی کامل صورت گیرد. در اینگونه موارد ارجح است محل وصله بال‌ها و محل وصله جان در یک مقطع صورت نگیرد.

۳ در وصلهٔ مستقیم بین ورق‌های با پهنا یا ضخامت متفاوت، که در بال یا جان تیرها به کار می‌روند، تغییر تدریجی در پهنا یا ضخامت، از ورق بزرگتر به ورق کوچکتر، باید با شیب حداکثر ۱ به ۲/۵ صورت گیرد.

۴ کلیه تیرهای باربر جانبی لرزه‌ای باید در فاصله L_b دارای مهاربندی جانبی کافی باشند به‌طوری که از هرگونه کمانش جانبی، پیچشی در خلال تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی جلوگیری شود. مهار جانبی تیرها باید به گونه‌ای تعبیه شوند که در محل اتصال آنها به تیر از تغییرمکان جانبی هر دو بال تیر یا از پیچش کل مقطع به نحو مؤثری جلوگیری به عمل آید.

۷-۱۱- الزامات لرزه‌ای مهاربندها و تیر پیوند

۱ استفاده از مهاربندهای به شکل K در قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرای ویژه مجاز نیست.

۲ مقاطع اعضای مهاربندها، ستون‌ها و تیرهای دهانه مهاربندی شده باید از نوع فشرده لرزه‌ای باشند.

۳ مقاطع سایر ستون‌ها باید فشرده باشد.

۴ ضریب لاغری ($\frac{kL}{r}$) مهاربندهای فشاری در قاب‌های مهاربندی با هر نوع مهاربند نباید از ۲۰۰ تجاوز نماید.

۵ مقطع تیر پیوند باید از نوع I شکل (نورد شده یا تیرورق) یا قوطی شکل ساخته شده از ورق باشد.

۶ جان تیر پیوند باید از یک ورق تک بدون هرگونه ورق مضاعف و بدون بازشو باشد.

۷ اتصال جان به بال تیر پیوند باید از نوع جوش گوشه دو طرفه یا شیاری با نفوذ کامل باشد.

۸ تیرهای پیوند باید دارای مقطع فشرده لرزه‌ای باشند.

۷-۱۲- اتصلات گیردار از پیش تأیید شده

اتصالات گیردار ارائه شده در جدول زیر در صورت تأمین الزامات و محدودیت‌های این بخش به‌عنوان اتصالات گیردار پیش تأیید شده محسوب می‌شوند و برای استفاده از آنها نیازی به انجام اقدامات و آزمایشات مقرر شده در بخش‌های دیگر نیست.

جدول ۱۰: انواع اتصالات گیردار پیش تأیید شده

ردیف	نوع اتصال	مخفف	سیستم سازه‌ای قابل کاربرد
۱	اتصال تیر با مقطع کاهش یافته	*RBS*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۲	اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی	*BUEEP*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۳	اتصال فلنجی چهار یا هشت پیچی با استفاده از ورق لچکی	*BSEEP*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۴	اتصال پیچی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری	*BFP*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۵	اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری	*WFP*	قاب‌های خمشی متوسط
۶	اتصال مستقیم تقویت نشدهٔ جوشی	*WUF-W*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۷	اتصال پیچی با جفت سپری	*DT*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۸	اتصال تیر با مقطع کاهش یافته و دیافراگم عبوری از ستون	*TD-RBS*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۹	اتصال تقویت نشدهٔ جوشی با دیافراگم عبوری از ستون	*TD-WUFW*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه
۱۰	اتصال تیر با بال پهن شده و دیافراگم عبوری از ستون	*TD-Widened*	قاب‌های خمشی متوسط و ویژه

در مورد اتصالات گیردار پیش تأیید شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) در دو انتهای تیرهای I و H شکل ساخته شده از ورق، به‌طول حداقل $S_h + d_b$، اتصال جان به بال باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل همراه با جوش گوشهٔ تقویتی در هر دو طرف جان باشد. بعد جوش‌های گوشهٔ تقویتی در هر طرف جان تیر نباید از کوچک‌ترین دو مقدار ضخامت جان و ۸ میلی‌متر، کمتر باشد. S_h فاصلهٔ بین مفصل پلاستیک در داخل تیر تا بر ستون است که برای انواع مختلف اتصالات پیش تأیید شده در بخش های مربوطه ارائه شده است و d_b عمق تیر است.

۲) در ستون‌های H شکل ساخته شده از ورق، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوهٔ ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال‌های تیر که به‌عنوان نواحی بحرانی ستون نامیده می‌شوند، اتصال جان به بال‌های مقطع ستون باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل با جوش گوشهٔ تقویتی در هر دو طرف جان باشد. بعد جوش‌های گوشهٔ تقویتی در هر طرف جان ستون نباید از کوچک‌ترین دو مقدار ضخامت جان و ۸ میلی‌متر، کمتر باشد.

۳) در ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده از ورق یا ساخته شده از مقاطع H شکل همراه با ورق‌های کناری (مقاطع H شکل جعبه‌ای شده)، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوهٔ ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال تیر که به عنوان نواحی بحرانی ستون نامیده می‌شوند، اتصال جان‌ها به بال‌های مقطع ستون باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل همراه با ورق پشت‌بند باشد. در خارج از نواحی بحرانی طول ستون، اتصال جان‌ها به بال‌های مقطع ستون می‌تواند با استفاده از جوش شیاری با نفوذ ناقص (بدون استفاده از ورق پشت‌بند) انجام پذیرد.

۴) در ستون‌های با مقطع صلیبی شکل ساخته شده از ورق یا ساخته شده از نیمرخ‌های نورد شده، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوهٔ ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال تیر، که به عنوان نواحی بحرانی ستون نامیده می‌شوند، اتصال جان‌ها به یکدیگر و به بال‌ها باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل با جوش گوشهٔ تقویتی در هر دو طرف جان باشد. بعد جوش‌های گوشهٔ تقویتی در هر طرف جان ستون نباید از کوچک‌ترین دو مقدار ضخامت جان و ۸ میلی‌متر، کمتر باشد.

۵) صد در صد جوش‌های شیاری به کار رفته در ناحیهٔ اتصال تیر به ستون باید از طریق آزمایش‌های غیر مخرب نظیر رادیوگرافی یا اولتراسونیک (فراصوتی) تأیید شوند.

۶) برداشتن پشت‌بندهای مورد استفاده در اتصال ورق‌های پیوستگی به بال‌ها و جان (یا جان‌های) مقطع ستون، پس از اتمام عملیات جوشکاری الزامی نیست. پشت‌بندهایی که در محل اتصال به بال ستون باقی می‌مانند باید با استفاده از یک جوش گوشهٔ پیوستهٔ ۸ میلی‌متری بر لبهٔ زیرین جوش شیاری به بال ستون متصل شود. هنگامی‌که پشت‌بند برداشته می‌شود، پاس ریشه باید تا رسیدن به فلز جوش سالم شیارزنی شود و با یک جوش گوشه تقویت شود. جوش گوشهٔ تقویتی باید سرتاسری بوده و بعد آن حداقل ۸ میلی‌متر باشد.

۷) در اتصالات گیردار مستقیم تیر به ستون، اتصال بال‌های تیر به بال ستون باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل باشد. برای این منظور در دو انتهای تیر، تعبیهٔ سوراخ‌های دسترسی برای انجام جوش شیاری با نفوذ کامل بال تیر به بال ستون همراه با ورق‌های پشت‌بند، مطابق الزامات مبحث دهم، حسب مورد الزامی است، اتصال ورق‌های پشت‌بند به بال‌های تیر مجاز نیست.

۸) در اتصالات گیردار مستقیم تیر به ستون، برای اتصال بال‌های تیر به بال ستون، استفاده از ورق‌های گوشواره (ناودان انتهای جوش شیاری) الزامی است. ورق‌های گوشواره باید حداقل به اندازهٔ ۲۵ میلی‌متر یا ضخامت قطعه (هر کدام بزرگ‌تر بود)، از لبهٔ درز امتداد داشته باشد، ولی نیازی نیست بلندتر از ۵۰ میلی‌متر باشد. پس از تکمیل جوشکاری، ورق‌های گوشواره‌ای باید برداشته شوند.

۹) در اتصالات گیردار مستقیم تیر به ستون، پشت‌بندهای مورد استفاده در بال تحتانی تیر (در صورت وجود) باید برداشته شوند و پس از برداشتن پشت‌بند، پاس ریشه باید تا رسیدن به فلز جوش سالم شیارزنی شود و با جوش گوشه به ضخامت حداقل ۸ میلی‌متر تقویت گردد. ضخامت جوش گوشهٔ تقویتی باید به‌گونه‌ای باشد که پنجهٔ جوش گوشه روی فلز پایه تیر قرار گیرد. چنانچه پس از حذف پشت‌بند، فلز پایه و ریشهٔ جوش به‌صورت یکنواخت سنگ‌زنی شوند، نیازی به ادامه دادن جوش گوشهٔ تقویتی روی فلز پایه نیست.

۱۰) در اتصالات گیردار مستقیم تیر به ستون، برداشتن پشت‌بندهای مورد استفاده در بال فوقانی تیر (در صورت وجود) الزامی نیست. در صورتی‌که پشت‌بندها برداشته نشوند، این پشت‌بندها باید با جوش گوشه به ضخامت حداقل ۸ میلی‌متر به بال ستون جوش داده شوند. جوشکاری این پشت‌بندها به بال های تیر مجاز نیست.

۱۱) در صورت اجرای اتصالات گیردار به صورت درختی، محل وصلهٔ تیر، شامل نواحی که وصله با جوش یا پیچ به تیر متصل می‌شود، باید خارج از ناحیهٔ حفاظت شده باشد.

نمونه سؤالات بحث (۷)

تمرین ۴۱: در قاب‌های خمشی ویژهٔ فولادی با فولاد نرمه، نسبت $\frac{b_f}{2t_f}$ برای مقاطع نورد شده چه محدودیتی دارد؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۳)

۱) ۷/۹
۲) ۸/۷
۳) ۹/۶
۴) ۱۱

حل: براساس مطالب درسنامه، برای مقاطع I شکل در حالت شکل‌پذیری زیاد (ویژه) و برای فولاد نرمه (ST ۳۷) داریم:

$$\begin{cases} E = 2\times10^6\ kg/cm^2 \\ F_y = 2400\ kg/cm^2 \end{cases} \Rightarrow \frac{b}{t} \le 0/3\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} = 0/3\sqrt{\frac{2\times10^6}{1/2\times2400}} = 7/9$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۲: در طراحی سیستم مهاربندی واگرا (*Eccentric*) آیا استفاده از تیرهای لانه زنبوری به عنوان تیر واسطه یا تیر پیوند (*Link beam*) مناسب است؟ (قوهٔ قضائیه – ۸۰)

۱) بله

۲) خیر

۳) در صورتی‌که دو انتهای تیر لانه زنبوری را با ورق سخت‌کننده جان در مقابل سیلان برشی تقویت نماییم، می‌توان رفتار مناسب را به عنوان تیر واسط از اعضاء لانه زنبوری انتظار داشت.

۴) در صورتی‌که در گوشه سوراخ‌ها قوس یا شعاع مناسب مطابق مبحث دهم مقررات ملّی ایران ایجاد نماییم می‌توان رفتار مناسبی از تیر لانه زنبوری به عنوان تیر واسط انتظار داشت.

● حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۳: کدام‌یک از فولادهای زیر از نظر الزامات لرزه‌ای مصالح در اعضایی که در آن‌ها انتظار رفتار فرار ارتجاعی محدود یا قابل ملاحظه می‌رود، می‌تواند مورد قبول باشد؟

۱) $F_u \geq F_y$ ۲) $F_u \geq ۱/۲\, F_y$ ۳) $F_u \geq ۱/۵\, F_y$ ۴) $F_u \geq ۱/۲۵\, F_y$

● حل: براساس نکات درسنامه، می‌توان نوشت: $\frac{F_y}{F_u} \leq ۰/۸ \Rightarrow F_u \geq ۱/۲۵\, F_y$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۴: منظور از واژه تنش تسلیم مورد انتظار در مقاطع فولادی ساخته شده از ورق چیست؟

۱) حداقل تنش کششی نهایی فولاد ۲) کمی بیش از تنش تسلیم تعیین شده فولاد

۳) حداقل تنش تسلیم فولاد ۴) حداکثر تنش کششی نهایی فولاد

● حل: مقدار R_y برای مقاطع مختلف بیشتر از یک است (برای مقطع ساخته شده از ورق، برابر با ۱/۱۵ است). بنابراین تنش تسلیم مورد انتظار کمی بیشتر از تنش تسلیم تعیین شدهٔ فولاد بوده و در نتیجه گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۵: در قاب‌های خمشی معمولی:

۱) مقاطع تیرها و ستون‌ها باید فشرده باشند.

۲) مقاطع تیرها و ستون‌ها می‌توانند غیرفشرده باشند.

۳) مقاطع ستون‌ها باید فشرده باشد ولی مقاطع تیرها می‌تواند غیرفشرده باشد.

۴) مقاطع تیرها باید فشرده باشد ولی مقاطع ستون‌ها می‌توانند غیرفشرده باشند.

● حل: مقاطع تیرها و ستون‌ها در قاب‌های خمشی معمولی باید فشرده باشند. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۶: در قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه کدام نوع مهاربندی مجاز نمی‌باشد؟

۱) مهاربند K شکل ۲) مهاربند شکل ۷ ۳) مهاربند شکل ۸ ۴) مهاربند قطری

● حل: براساس درسنامه استفاده از مهاربندی‌های K در این نوع قاب‌ها مجاز نیست.

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۴۷: کدام‌یک از سیستم‌های سازه‌ای زیر از نظر مبحث دهم مقررات ملی ساختمان قابل قبول نیست؟

۱) قاب ساده با مهاربند همگرای متوسط
۲) قاب ساده با مهاربند واگرای متوسط
۳) سیستم دوگانه متشکل از قاب خمشی معمولی و مهاربند همگرای ویژه
۴) همهٔ موارد

● حل: با توجه به توضیحات درسنامه، اولاً قاب خمشی می‌تواند در سه ردهٔ شکل‌پذیری اعم از ویژه، متوسط و معمولی وجود داشته باشد. از طرفی مهاربند همگرا فقط می‌تواند در دو ردهٔ شکل‌پذیری ویژه یا معمولی و مهاربند واگرا در ردهٔ ویژه وجود داشته باشد و بنابراین مهاربند همگرا یا واگرای متوسط قابل قبول نیست. ثانیاً در سیستم دوگانه، حتماً مهاربند همگرا یا واگرا باید ویژه باشد و ضمناً استفاده از قاب خمشی معمولی در سیستم دوگانه ممنوع است. با توجه به دو نکتهٔ مذکور دیده می‌شود که هیچکدام از سازه‌های عنوان شده در گزینه‌های این تست، مورد پذیرش مبحث دهم مقررات ملی ساختمان نیست. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۸: کدام‌یک از مطالب بیان شده دربارهٔ ناحیهٔ حفاظت شده در اعضای یک سازهٔ فولادی نادرست است؟

۱) ناحیهٔ حفاظت شده در تیرهای پیوند قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرا، تمام طول آن می‌باشد.
۲) ناحیهٔ حفاظت شده در مهاربندهای همگرای ویژهٔ ضربدری را می‌توان فاصلهٔ یک چهارم میانی طول مهاربند ضربدری و انتهای عضو مهاربندی در نظر گرفت.
۳) به‌کار بردن وصلهٔ مستقیم یا غیرمستقیم جوشی یا پیچی نیمرخ‌ها در ناحیهٔ حفاظت شده ممنوع است.
۴) در ناحیهٔ حفاظت شده از تیرهای مختلط، جوش برشگیرهای از نوع گل‌میخ همواره ممنوع است.

● حل: براساس مطالب درسنامه ، جوش برشگیرها از نوع گل‌میخ در تیرهای مختلط در ناحیهٔ حفاظت شده، در صورت تأمین برخی از الزامات مجاز بوده و نمی‌توان گفت همواره ممنوع است. بنابراین تنها عبارت گزینهٔ (۴) نادرست بوده و پاسخ این تست می‌باشد.

تمرین ۴۹: در صورت تأمین الزامات مناسب، انجام کدام‌یک از موارد (الف) و (ب) زیر در ناحیهٔ حفاظت شدهٔ تیرهای مختلط مجاز است؟

الف) خال‌جوش کردن عرشه فولادی تیر مختلط **ب) جوش برشگیرهای از نوع گل‌میخ**

۱) مورد (الف) ۲) مورد (ب) ۳) هر دو مورد ۴) هیچکدام

● حل: براساس مطالب درسنامه، انجام هر دو مورد مذکور در این تست در صورت تأمین الزامات آن مجاز می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۵۰: استفاده از کدام نوع سوراخ پیچ در طرح لرزه‌ای سازه‌های فولادی بدون قید و شرط مجاز می‌باشد؟

۱) سوراخ استاندارد
۲) سوراخ استاندارد و سوراخ بزرگ شده
۳) سوراخ استاندارد و سوراخ لوبیایی کوتاه در امتداد عمود بر راستای نیرو
۴) سوراخ استاندارد و سوراخ‌های لوبیایی کوتاه و بلند در امتداد عمود بر راستای نیرو

● حل: براساس مطالب درسنامه ، سوراخ‌ها در اتصالات پیچی مورد استفاده در یک عضو لرزه‌ای باید استاندارد یا لوبیایی کوتاه در امتداد عمود بر راستای نیرو باشند. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۵۱: اگر ارتفاع آزاد یک ستون فولادی برابر ۲/۲ متر باشد، محل وصله ستون باید در کجا قرار گیرد؟

۱) در فاصلهٔ حداقل ۱۲۰۰ میلی‌متر تا بال متصل به ستون
۲) در فاصلهٔ حداقل برابر با بعد بزرگتر ستون کوچکتر تا بال متصل به ستون
۳) در فاصلهٔ حداقل برابر با ۱/۵ برابر بعد بزرگتر ستون کوچکتر تا بال متصل به ستون
۴) وسط ارتفاع آزاد ستون

● حل: براساس مطالب درسنامه در بخش الزامات طرح لرزه‌ای وصله ستون‌ها، از آنجاکه ارتفاع آزاد ستون کمتر از ۲/۴ متر است، محل وصله باید در وسط ارتفاع آزاد ستون در نظر گرفته شود. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۵۲: در وصلهٔ مستقیم تیرهای باربر جانبی، تغییر تدریجی در پهنا یا ضخامت از ورق بزرگتر به ورق کوچکتر باید با شیب حداکثر چقدر صورت بگیرد؟

۱) ۱ به ۲/۵ ۲) ۱ به ۴/۵ ۳) ۱ به ۶ ۴) ۱ به ۸

● حل: براساس مطالب درسنامه در الزامات لرزه‌ای وصلهٔ تیرها، شیب مورد نظر حداکثر ۱ به ۲/۵ می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵۳: در طراحی ستون‌های یک ساختمان چهار طبقه، مقطع ستون‌ها متشکل از دو نیمرخ I با بست‌های موازی بوده و خمش حول محور عمود بر صفحهٔ بست‌ها می‌باشد. برای ستون یا مقطع مذکور، کدام‌یک از عبارات زیر صحیح‌تر است؟

۱) استفاده از مقطع فوق فقط برای قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری معمولی مجاز است.
۲) استفاده از مقطع فوق در هر سه نوع از سطح شکل‌پذیری (معمولی - متوسط - زیاد) مجاز است.
۳) استفاده از مقطع فوق فقط برای قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری متوسط و معمولی مجاز است.
۴) استفاده از مقطع فوق برای هیچ‌کدام از قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری معمولی و متوسط و زیاد مجاز نیست.

● حل: محور عمود بر صفحهٔ بست‌ها، همان محور بدون مصالح مقطع است. در نتیجه با توجه به درسنامه، استفاده از چنین ستونی تنها در قاب خمشی با شکل‌پذیری معمولی مجاز می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵۴: کدام‌یک از انواع اتصالات گیردار از پیش تأیید شدهٔ زیر، برای سیستم دوگانهٔ فولادی به‌صورت قاب خمشی ویژه با مهاربند واگرای ویژه، قطعاً مناسب نمی‌باشد؟

۱) اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری
۲) اتصال فلنجی چهار پیچی با استفاده از ورق لچکی
۳) اتصال پیچی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری
۴) اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی

● حل: با توجه به جدول درسنامه که مربوط به انواع اتصالات گیردار از پیش تأیید شده است، دیده می‌شود که اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری صرفاً در قاب‌های خمشی متوسط قابل استفاده است ولی سایر اتصالات گیردار هم در قاب‌های خمشی متوسط و هم در قاب‌های ویژه قابل استفاده می‌باشند. با توجه به اینکه در سیستم دوگانهٔ مورد بررسی در این تست قاب خمشی به‌صورت ویژه است، اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری مناسب نیست، بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بحث ۸: ساخت و آماده کردن قطعات فولادی

در مورد ساخت و آماده کردن قطعات فولادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. موارد تکمیلی در بخش اصول و مبانی طراحی و اجرای جوش ارائه شده است.

۱) به کار بردن فولادهای مصرف شده باید با اجازهٔ ناظر و بعد از انجام آزمایش‌های لازم باشد.

۲) قطعات فولادی باید از معایبی که به مقاومت با شکل ظاهری آن لطمه می‌زنند، عاری باشند. همهٔ قطعات فولادی سازهٔ ساختمان باید حتی‌الامکان یکپارچه باشد و از وصله کردن قطعات کوتاه خودداری شود، مگر آنکه محل درز جوشی یا وصله در نقشه‌های اجرایی مشخص شده باشد یا موافقت مهندس طراح برای وصلهٔ موردنظر جلب شود.

۳) هرگاه مطابق آیین‌نامه نیاز به تعیین مشخصات و انطباق مصالح فولادی باشد، نمایندهٔ کارفرما باید از هر محموله مصالح فولادی (مطابق تعریف انتهای این بخش) وارد شده به کارخانه یا مشابه آن به تعداد ۲ نمونهٔ اتفاقی انتخاب و آزمایش‌های زیر را مطابق استانداردهای ملی یا بین‌المللی در مورد آنها انجام دهد:

- برای همهٔ نمونه‌ها آزمایش تعیین ترکیب آلیاژی فولاد
- برای همهٔ نمونه‌ها آزمایش تعیین مقاومت کششی یا اندازه‌گیری تغییرشکل نسبی
- برای همهٔ نمونه‌ها آزمایش ضربه

۴) محمولهٔ مصالح فولادی جهت نمونه‌گیری شامل مقاطع مشابه با ردهٔ مقاومتی مشابه و محدودهٔ ضخامت مشابه تهیه شده از یک منبع، به شرح زیر است:

- به ازای هر ۴۰ تن و کسر آن برای همهٔ مقاطع
- به ازای هر ۶۰ تن و کسر آن برای مقاطع سنگین با وزن واحد طول بیش از ۱۰۰ کیلوگرم بر متر
- به ازای هر ۸۰ تن و کسر آن برای همهٔ مقاطع با شمارهٔ ذوب یکسان براساس برچسب محصول یا گواهی کارخانه

۵) نقشه‌های اجرایی باید جوش‌های کارخانه‌ای را از جوش‌های کارگاهی متمایز کرده و نوع اتصال با پیچ‌ها (اتکایی یا اصطکاکی) و نیز حد سفت کردن آنها را به وضوح معین نموده باشد.

۶) کارفرما نقشه‌های محاسباتی را در اختیار پیمانکار قرار می‌دهد. پیمانکار موظف است براساس نقشه‌های مذکور ابتدا نقشه‌های اجرایی را تهیه و به تصویب طراح سازه برساند. کنترل مهندس طراح در حد انطباق با نقشه‌های محاسباتی و مشخصات فنی بوده و مسئولیت هندسهٔ برش‌ها و قطعات بر عهدهٔ سازندهٔ اسکلت است.

۷) قبل از شروع به ساختن و نصب قطعات باید اندازه‌های مندرج در نقشه‌ها به منظور تطبیق کامل و جلوگیری از بروز هرگونه اشکال در موقع ساخت و نصب توسط پیمانکار به‌دقت کنترل گردد.

۸) برش، مونتاژ، جوشکاری و متصل کردن قطعات به یکدیگر باید در کارخانهٔ سرپوشیده و مجهز ساخت اسکلت‌های فولادی توسط استادکاران و کارگران ماهر و زیر نظر متخصص فن انجام گردد.

نمونه سؤال بحث (۸)

تمرین ۵۵: استفادهٔ مجدد از قطعات و اعضای استفاده شده در سازه چگونه است؟

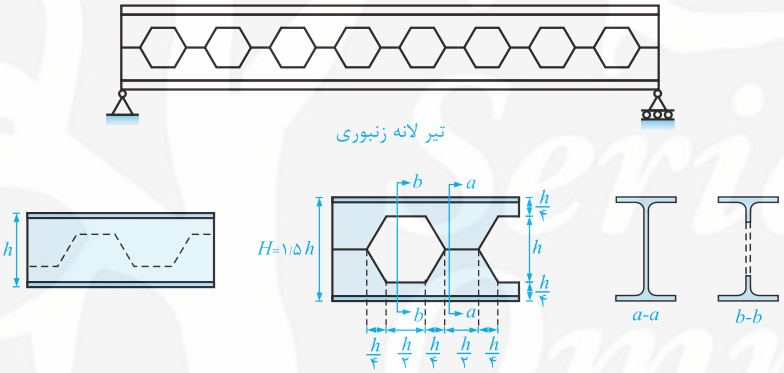
۱) به هیچ‌وجه مجاز نیست.
۲) بلامانع است.
۳) در صورت مصرف در اعضای فرعی مجاز است.
۴) با اجازهٔ ناظر و انجام آزمایش بلامانع است.

- حل: با توجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۹: آشنایی با تیرهای لانه زنبوری سوراخ‌های شش ضلعی

تیر لانه زنبوری مطابق شکل از برش زیگزاگ، جابه‌جایی و جوش دو قسمت بریده شده از یک تیر I شکل ساخته می‌شود. در گذشته عملیات برشکاری توسط شعله انجام می‌شد ولی در حال حاضر توسط تیغه‌های فولادی، تیر نورد شده قیچی می‌شود. در تیر لانه‌زنبوری حداکثر افزایش ارتفاع تیر ۲ برابر است، البته ۲ عدد بزرگی است و معمولاً افزایش ارتفاع کمتر از ۲ برابر (حدود ۱/۵ برابر) می‌باشد.

در این تیرها موارد زیر حائز اهمیت است:



۱) لانه زنبوری کردن یک تیر باعث افزایش ارتفاع تیر و در نتیجه افزایش ممان اینرسی و اساس مقطع تیر خواهد شد. این موضوع باعث کاهش خیز تیر و کاهش تنش‌های خمشی در تیر نیز می‌شود.

۲) در مواردی از سوراخ‌های ایجاد شده در تیر لانه زنبوری می‌توان برای هدایت لوله‌های تأسیسات استفاده کرد که این امر می‌تواند در کاهش ضخامت سقف مفید باشد.

۳) استفاده از تیرهای لانه زنبوری باعث صرفه‌جویی در مصرف مصالح شده و وزن مقطع و در نتیجه وزن فولاد مصرفی در ساختمان را کاهش می‌دهد.

۴) کاربرد این نوع تیرها محدود به تیرهای باربر ثقلی و عموماً دو سر مفصل بوده که در سرتاسر طول خود دارای مهار جانبی کافی باشد. این نوع تیرها هم می‌تواند به‌صورت فولادی تنها و هم به‌صورت مختلط مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این نوع تیرها در سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی (فولادی و مختلط)، در دهانه‌های مهاربندی شدهٔ همگرا و واگرا و در جزء افقی دیوارهای برشی فولادی مجاز نیست.

۵) در تحلیل و مدل‌سازی تیرهای لانه زنبوری، برای در نظر گرفتن آثار حضور سوراخ‌های متوالی در طول تیر و نیز آثار تغییرشکل‌های برشی، مشخصات هندسی مقطع تیر باید براساس ۹۰ درصد مشخصات مقطع سوراخ‌دار در نظر گرفته شود.

۹-۱- معایب تیرهای لانه زنبوری

۱) در تیرهای I شکل تقریباً همه برش مقطع، توسط جان آن تحمل می‌شود. با لانه زنبوری کردن تیر بخش عمده‌ای از مصالح جان تیر در قسمت‌هایی از طول تیر حذف می‌شود که در نتیجهٔ آن تنش‌های برشی افزایش چشمگیری پیدا می‌کنند. برای برطرف کردن این ضعف مقطع، جان تیر بایستی تقویت شود که معمولاً با جوش دادن صفحات تقویتی در دو طرف جان انجام می‌شود. این تقویت در محل اتصال تیر لانه زنبوری و ستون که برش مقطع ماکزیمم است انجام می‌شود و معمولاً دو یا سه سوراخ از دو طرف توسط صفحه جوش داده می‌شود.

۲) در تیرهای لانه‌زنبوری افزایش عمق تیر باعث ناپایداری جان تیر و بدتر شدن وضعیت کمانش جانبی و پیچشی می‌شود (در صورت مقید شدن بال فشاری مشکل حل خواهد شد).

۳) از نظر کمانش موضعی تیر لانه زنبوری راحت‌تر از تیر نورد شده چروک می‌خورد. چون بال درتیرهای نورد شده به خاطر اتصال به جان پیوسته، قیدی در برابر کمانش دارد اما در تیر لانه زنبوری که خود جان به راحتی کمانش می‌کند، جان نمی‌تواند هیچ قیدی را در مقابل کمانش بال ایجاد کند.

۴) در تیر لانه‌زنبوری مفصل پلاستیک نمی‌تواند تشکیل شود چون انسجام مقطع برای تحمل لنگر پلاستیک M_p از دست رفته است. قابل ذکر است که به علت عدم امکان فشردگی مقاطع سپری که از اجزاء تیر لانه زنبوری است، تیر لانه زنبوری هیچ‌گاه فشرده نمی‌شود.

۵) در تیر لانه زنبوری حذف مصالح جان در قسمت‌هایی از طول تیر باعث ایجاد شدن لنگر خمشی ثانویه می‌شود که به خاطر آن تنش مقطع افزایش می‌یابد.

۹-۲- محدودیت‌های تیرهای لانه زنبوری

۱) تیرهای لانه زنبوری در صورتی اقتصادی هستند که برش در آنها کم باشد تا اثر لنگر ثانویه زیاد نشود. بنابراین می‌توان گفت تیرهای لانه زنبوری برای دهانه‌های بلند با بار کم مناسب می‌باشد و در دهانه‌های کوتاه که برش حاکم بر طراحی تیر است استفاده از تیر لانه زنبوری توجیهی ندارد.

۲) تیر لانه زنبوری را هرگز نباید برای تیر طره یا قاب خمشی با اتصالات گیردار استفاده کرد چون لنگر اولیه و ثانویه در یک نقطه (تکیه‌گاه) ماکزیمم می‌شوند.

۳) در تیر دو سرساده تحت اثر بار متمرکز نباید تیر لانه زنبوری استفاده کرد.

۴) استفاده از تیرهای لانه زنبوری به‌عنوان اعضای باربر جانبی (در قاب‌های خمشی معمولی، متوسط و ویژه) مجاز نیست. در صورت لزوم ایجاد سوراخ دسترسی در جان تیر، این سوراخ باید خارج از ناحیه حفاظت شده دو انتهای تیر و در نیمه میانی طول دهانه تیر قرار گیرد.

۵) استفاده از تیرهای لانه زنبوری در دهانه‌های مهاربندی شده با هر نوع مهاربندی (قطری، ضربدری، ۷ و ۸) مجاز نیست.

نمونه سؤالات بحث (۹)

تمرین ۵۶: دلیل استفاده از تیرهای لانه زنبوری چیست؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۴)

۱) سبک‌سازی ساختمان
۲) افزایش لنگر اینرسی مقطع
۳) افزایش ظرفیت برشی مقطع
۴) کاهش ظرفیت برشی مقطع

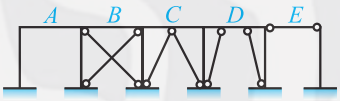
حل: باتوجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۵۷: برای ساخت تیرهای لانه زنبوری کدام روش باید به کار گرفته شود تا از اعوجاج آنها جلوگیری شود؟ (دادگستری - ۷۹)

۱) از الکترودهای مخصوص برای جوشکاری استفاده می‌نمائیم.
۲) یک در میان لانه زنبوری را با ورق پر نموده و آن را جوش می‌دهیم.
۳) به‌صورت متناوب دو طرف تیر لانه‌زنبوری را (یک در میان) جوش می‌دهیم.
۴) یک طرف تیر جوش داده شده سپس با پتک اعوجاج را اصلاح نموده و طرف دیگر را جوش می‌دهیم.

حل: یکی از مشکلاتی که عموماً هنگام جوشکاری قطعات بلند ایجاد می‌شود اعوجاج ناشی از حرارت در طول عضو است که می‌توان با متناوب و یک در میان جوش دادن عضو جلوی آن را گرفت.
بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۵۸: اگر قاب زیر در یک منطقه با خطر لرزه‌خیزی بالا بخواهد ساخته شود، برای کدام دهانه‌ها می‌توان از تیر لانه زنبوری شده استفاده کرد؟



۱) دهانه E
۲) دهانه‌های A و E
۳) دهانه‌های A، B و E
۴) دهانه‌های A، B، D و E

حل: براساس آیین‌نامه، استفاده از تیر لانه‌زنبوری به‌عنوان تیر اصلی قاب خمشی مجاز نیست. بنابراین نمی‌توان برای دهانه A از تیر لانه زنبوری استفاده کرد. همچنین استفاده از تیر لانه زنبوری در دهانه‌های مهاربندی شده هم مجاز نیست، بنابراین چه در دهانه‌های B و C که مهاربندی به‌صورت همگرا (X و شورون هشتی همگرا) و چه در دهانه D که مهاربندی به‌صورت شورون هشتی واگرا است، نمی‌توان از تیر لانه زنبوری استفاده کرد و استفاده از تیر لانه زنبوری فقط برای دهانه E که تیر آن به‌صورت دو سر مفصل است و مهاربندی هم ندارد مجاز می‌باشد. بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

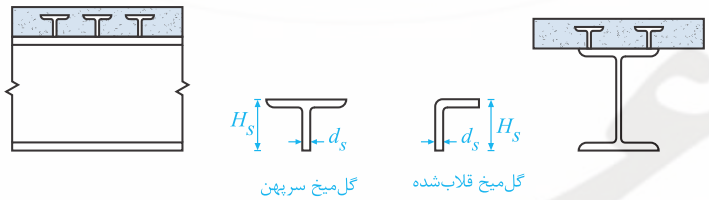
تمرین ۵۹: در یک تیر I شکل، ماکزیمم تنش خمشی σ، ماکزیمم تنش برشی τ و خیز ماکزیمم δ می‌باشد. در اثر لانه‌زنبوری کردن تیر، مقادیر فوق به‌ترتیب به σ_c، τ_c و δ_c تبدیل می‌شوند. کدام گزینه صحیح است؟

۱) $\delta_c = ۰/۷\delta\ ,\ \sigma_c = ۱/۴\sigma\ ,\ \tau_c = ۱/۴\tau$
۲) $\delta_c = ۰/۴\delta\ ,\ \sigma_c = ۰/۷\sigma\ ,\ \tau_c = ۱/۴\tau$
۳) $\delta_c = ۱/۴\delta\ ,\ \sigma_c = ۰/۷\sigma\ ,\ \tau_c = ۰/۷\tau$
۴) $\delta_c = ۰/۴\delta\ ,\ \sigma_c = ۱/۴\sigma\ ,\ \tau_c = ۰/۷\tau$

حل: با لانه‌زنبوری کردن تیر، اساس مقطع و همچنین ممان‌اینرسی مقطع افزایش می‌یابد که درنتیجهٔ آن تنش خمشی ماکزیمم و خیز ماکزیمم کاهش می‌یابند. از طرفی با حذف قسمت عمده‌ای از مصالح جان تیر، تنش برشی ماکزیمم که در جان اتفاق می‌افتد افزایش می‌یابد. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

بحث ۱۰: مقاطع مختلط

با استفاده از تیرهای مرکب دارای برش‌گیر که از ترکیب رفتار فولاد و بتن حاصل می‌شود می‌توان از مزایای فولاد نظیر مقاومت و شکل‌پذیری بالا استفاده کرد و به کمک پوشش بتنی، معایب فولاد نظیر ضعف آن در برابر خوردگی و آتش‌سوزی را تا حد زیادی مرتفع نمود. شکل زیر نمونه‌ای از یک سقف مرکب با برش‌گیر گل میخ را نشان می‌دهد. در مورد مقاطع مختلط می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:



۱) مقاطع مختلط فشاری مطابق شکل می‌توانند به‌صورت محاط در بتن یا پرشده با بتن باشند.

عضو محوری مختلط محاط در بتن

عضو محوری مختلط قوطی شکل پر شده با بتن

عضو محوری مختلط لوله‌ای پر شده با بتن

۲) در حالت عضو محوری مختلط محاط در بتن، مقطع فولادی به‌طور کامل در درون بتن مدفون شده و امکان کمانش موضعی برای اجزای آن وجود ندارد. در مقابل اگر درون مقطع فولادی با بتن پر شود، احتمال ایجاد کمانش موضعی برای اجزای آن وجود خواهد داشت.

۳) در تیرهای مرکب، دال بتنی می‌تواند به عنوان تکیه‌گاه جانبی سراسری برای بال فشاری تیر عمل کند و با جلوگیری از کمانش جانبی آن، عملکرد تیر را بهبود داده و ظرفیت آن را افزایش دهد.

۴) اگر بین مصالح بتنی و فولادی از قطعات واسطی به نام برشگیر به تعداد کافی استفاده شود، رفتار کل مقطع به‌صورت مرکب خواهد شد. در حالت رفتار مرکب، هیچ‌گونه لغزشی در محل اتصال دو ماده رخ نمی‌دهد، این موضوع باعث می‌شود تا:

- لنگر خمشی قابل تحمل مقطع افزایش یابد.
- اساس مقطع تیر در این حالت افزایش محسوسی خواهد داشت که موجب کاهش تنش‌های قائم ناشی از خمش می‌شود.
- با توجه به افزایش قابل توجه ممان اینرسی ،خیز تیر در مقایسه با حالت بدون برش‌گیر کمتر است.

تذکر: توجه شود که در صورت کافی نبودن تعداد برش‌گیرها عملکرد تیر، مرکب محسوب نشده ولی میزان لغزش بین بتن و فولاد از حالت اول کمتر است.

نکته: در محاسبهٔ مقاومت اسمی اعضای با مقطع مختلط، از مقاومت کششی بتن صرف‌نظر می‌شود. آثار کمانش موضعی اجزای بخش فولادی در محاسبهٔ مقاومت اسمی اعضای مختلط با مقطع فولادی پر شده با بتن باید مطابق ضوابط این بخش در نظر گرفته شود. در اعضای مختلط با مقطع مختلط محاط در بتن، لزومی به در نظر گرفتن آثار کمانش موضعی نیست.

۱۰-۱- بررسی تأثیر نحوهٔ اجرای تیر مرکب بر طراحی تیر

پس از نصب تیر فولادی و بتن‌ریزی دال، مدت زمانی طول می‌کشد تا بتن خود را بگیرد. در این مدت بارهای وارده باید توسط تیر فولادی و یا شمع‌بندی موقت تحمل شوند، به‌طوری‌که:

۱) اگر از شمع‌بندی استفاده نشود، تیر فولادی باید به تنهایی وزن خود و بتن خیس و وزن قالب‌ها را تحمل کند. پس از کسب ۷۵ درصد مقاومت نهایی ۲۸ روزه توسط بتن، عملکرد مرکب تیر فولادی و بتن شروع می‌شود و وزن دال بتنی، توسط تیر مرکب (تیر فولادی همراه با قسمتی از دال بتنی) تحمل می‌شود.

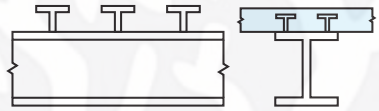
۲) اگر از شمع‌بندی استفاده شود، وزن تیر فولادی و دال بتنی خیس توسط شمع‌ها تحمل شده و می‌توان از تیر فولادی ضعیف‌تری استفاده کرد.

تذکر: هزینه‌های اضافی اجرای تیر مرکب با شمع و مشکلات اجرایی آن جزء معایب و امکان استفاده از تیر فولادی ضعیف‌تر جزء محاسن روش اجرا با شمع می‌باشد.

نکته: نحوهٔ اجرای تیر مرکب تأثیری در مقاومت نهایی آن ندارد و مقاومت نهایی تیر مرکب با سیستم شمع‌بندی و بدون سیستم شمع‌بندی، تقریباً مساوی است.

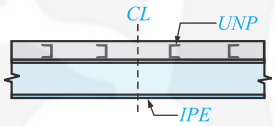
۱۰-۲- برشگیرها

گل‌میخ: از رایج ترین برش‌گیرهایی هستند که می‌توانند با سرعت زیادی توسط تفنگ‌های مخصوصی به وسیله جوش به بال تیر آهن متصل شوند. حداکثر قطر گل‌میخ در این سیستم ۲۰ میلی‌متر است.



اتصال گل‌میخ در تیرهای مرکب

ناودانی: این نوع از برش‌گیر می‌تواند به‌صورت حالت‌های روبه‌رو یا پشت به پشت مورد استفاده قرار گیرد. بین این دو حالت، حالت روبه‌رو مناسب نبوده و حالت پشت‌به‌پشت جهت ایجاد گیرایی مناسب و جلوگیری از لغزش بتن برروی بال تیر فولادی مناسب‌تر است و مورد استفاده قرار می‌گیرد.



تذکر: استفاده از نبشی به عنوان برشگیر به دلیل عدم درگیری کافی مناسب نمی‌باشد.

۱۰-۳- محدودیت‌های مصالح در اعضای با مقطع مختلط

۱) مقاومت فشاری مشخصهٔ نمونهٔ استوانه‌ای بتن (f_c) برای بتن‌های با وزن مخصوص معمولی، نباید از ۲۰ MPa کمتر و از ۷۰ MPa بیشتر و برای بتن‌های سبک نباید از ۲۰ MPa کمتر و از ۴۰ MPa بیشتر باشد.

۲) تنش تسلیم میلگردها و مقاطع فولادی اعضای با مقطع مختلط به ترتیب نباید از ۵۵۰ و ۴۶۰ مگاپاسکال تجاوز نماید.

۳) سطح مقطع هسته فولادی در حالت مقطع مختلط محاط در بتن و مساحت مقطع فولادی در حالت مقطع مختلط پر شده با بتن باید حداقل یک درصد مساحت کل مقطع مختلط باشد.

۴) نسبت آرماتور طولی (ρ_{sr}) در حالت مقطع مختلط محاط در بتن باید حداقل ۰/۰۰۴ باشد.

۵) مصالح بتن پر مقاومت را می‌توان برای محاسبات مربوط به سختی اعضاء مورد استفاده قرار داد، لیکن برای محاسبات مقاومت اسمی اعضای با مقطع مختلط نمی‌توان به آن تکیه کرد، مگر اینکه نتایج آزمایش یا تحلیل استفاده از آن را توجیه نماید.

۱۰-۴- جزئیات‌بندی اعضای محوری با مقطع مختلط محاط در بتن

۱) الزامات مربوط به پوشش بتن روی آرماتورها، وصلهٔ آرماتورها، فواصل آرماتورها و خم آرماتورها باید با توجه به الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان تعیین گردد.

۲) فاصلهٔ آزاد بین مقطع فولادی و آرماتورهای طولی باید از ۱/۵ برابر قطر آرماتور طولی و ۴۰ میلی‌متر بزرگتر باشد.

۳) به‌طور کلی در اینگونه اعضاء نیازی به در نظر گرفتن کمانش موضعی نمی‌باشد، لیکن در صورتی‌که بخش فولادی از دو یا تعداد بیشتری مقطع فولادی تشکیل شده باشد، مقاطع فولادی باید از طریق بست که می‌تواند از تسمه، نبشی، ناودانی یا مقاطع مناسب دیگر انتخاب شود، به یکدیگر متصل شوند تا از کمانش هر یک از مقاطع به تنهایی در اثر بارهای وارد بر آنها قبل از سفت شدن بتن جلوگیری به‌عمل آید.

۴) پوشش بتنی هستهٔ فولادی باید به کمک میلگردهای طولی و تنگ‌های عرضی یا مارپیچ مسلح شوند. حداقل قطر تنگ‌های عرضی ۱۰ میلی‌متر است. چنانچه از تنگ عرضی با قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شود، حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز تنگ‌ها در راستای طولی عضو محوری ۳۰۰ میلی‌متر و چنانچه از تنگ‌های عرضی با قطر ۱۲ میلی‌متر یا بیشتر استفاده شود، حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز تنگ‌ها ۴۰۰ میلی‌متر است. در هر حال حداکثر فاصلهٔ تنگ‌های عرضی در راستای طولی نباید از نصف بعد کوچکتر مقطع مختلط بیشتر باشد.

۱۰-۵- جزئیات‌بندی برشگیرها

۱) در اعضای با مقطع مختلط محاط در بتن، فاصلهٔ برشگیر تعبیه شده در بالا و پایین ناحیهٔ انتقال برش طولی، نباید از دو برابر کوچکترین بعد مقطع مختلط بیشتر باشد. برشگیرهای تعبیه شده جهت انتقال برش طولی، باید حداقل در دو وجه مقطع فولادی به‌صورت قرینه مورد استفاده قرار گیرد.

۲) در اعضای با مقطع مختلط پر شده با بتن، در صورت نیاز به تعبیهٔ برشگیر در داخل مقاطع فولادی، فاصلهٔ برشگیرها در محدودهٔ طول انتقال برش طولی، برای مقاطع مستطیلی توخالی نباید از دو برابر کوچکترین بعد مقطع مستطیلی و برای مقاطع لوله‌ای شکل نباید از دو برابر قطر بیرونی لوله بیشتر اختیار شود.

۳) قطر گل‌میخ نباید از ۲/۵ برابر ضخامت فلز پایه که به آن جوش می‌شود، تجاوز نماید، مگر اینکه گل‌میخ دقیقاً در امتداد جان مقطع فولادی قرار گرفته باشد.

۴) برشگیرها باید یا از نوع گل‌میخ‌های کلاهک‌دار که طول آنها بعد از نصب حداقل ۴ برابر قطرشان است باشند یا از نوع ناودانی گرم نورد شده باشند.

۵) برشگیرها باید در دال‌هایی مدفون شوند که سنگدانه‌های آنها برای بتن معمولی باشند.

۶) به استثنای برشگیرهای نصب شده در داخل کنگرهٔ ورق‌های فولادی شکل داده شده، برشگیرها باید حداقل ۲۵ میلی‌متر پوشش جانبی از بتن داشته باشند. حداقل فاصلهٔ گل‌میخ تا لبهٔ بتن در امتداد برش افقی برای بتن‌های با وزن مخصوص معمولی باید ۲۰ میلی‌متر و برای بتن‌های سبک ۲۵ میلی‌متر باشد.

۷) حداقل فاصلهٔ مرکز تا مرکز بین برشگیرهای از نوع گل‌میخ مساوی ۶ برابر قطر آنها در امتداد محور طولی تیر و ۴ برابر قطر آنها در امتداد عمود بر محور طولی تیر با مقطع مختلط می‌باشد، مگر در داخل کنگره‌های ورق‌های فولادی شکل داده شده که حداقل فاصلهٔ مرکز تا مرکز در هر امتداد را می‌توان ۴ برابر قطر گل‌میخ انتخاب کرد. حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز بین برشگیرها نباید از ۸ برابر ضخامت کل دال بتنی یا ۸۰۰ میلی‌متر تجاوز نماید.

۸) برشگیرها باید حداقل ۲۵ میلی‌متر پوشش جانبی از بتن داشته باشند.

۹) حداقل فاصلهٔ مرکز تا مرکز گل‌میخ در هر امتداد، ۴ برابر قطر گل‌میخ می‌باشد.

۱۰) حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز گل‌میخ‌ها ۳۰ برابر قطر گل‌میخ می‌باشد.

۱۱) حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز برشگیرهای از نوع ناودانی ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

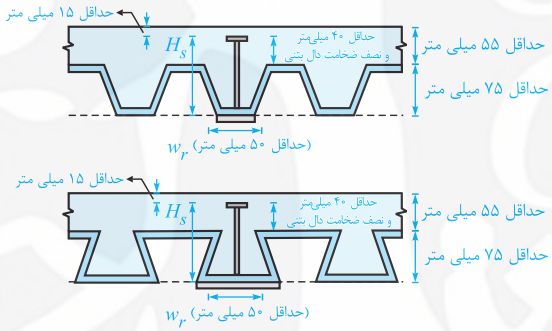
۱۰-۶- محدودیت‌های مقاطع مختلط به همراه ورق‌های فولادی شکل داده شده

۱ ارتفاع اسمی ورق‌های فولادی شکل داده شده (h_r) نباید از ۷۵ میلی‌متر بیشتر باشد. پهنای متوسط کنگره‌های پر شده با بتن نباید کمتر از ۵۰ میلی‌متر باشد، لیکن در محاسبات نباید بزرگتر از حداقل پهنای آزاد (خالص) در نزدیکی سطح فوقانی ورق فولادی شکل داده شده در نظر گرفته شود.

۲ دال بتنی باید به وسیله گل‌میخ‌های برشگیر با قطر حداکثر ۲۰ میلی‌متر به مقطع فولادی متصل شوند. گل‌میخ‌ها باید از طریق ورق فولادی شکل داده شده یا به‌طور مستقیم به مقطع فولادی جوش شوند. در هر حال گل‌میخ‌ها باید روی بال مقطع فولادی ذوب شوند. پس از نصب، ارتفاع گل‌میخ‌ها که از بالای ورق فولادی شکل داده شده اندازه‌گیری می‌شود، نباید از ۴۰ میلی‌متر کمتر باشد. پوشش بتن روی گل‌میخ‌ها نباید کمتر از ۱۵ میلی‌متر باشد.

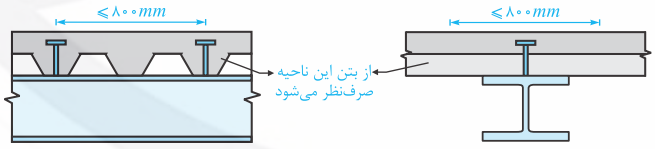
۳ ضخامت دال بتنی در قسمت فوقانی ورق فولادی شکل داده شده نباید کمتر از ۵۵ میلی‌متر باشد.

۴ ورق‌های فولادی شکل داده شده باید در فواصلی حداکثر ۴۵۰ میلی‌متر به مقطع فولادی و سایر اعضای تکیه‌گاهی مهار شوند. این مهارها می‌توانند گل‌میخ‌های برشگیر، ترکیبی از گل‌میخ‌ها و جوش‌های نقطه‌ای یا هر راهکار ارائه شده توسط مهندس طراح باشد.



شکل: ملاحظات و محدودیت‌های ورق‌های فولادی شکل داده شده

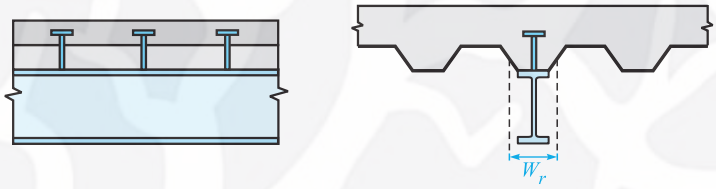
۵ در ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌های آنها عمود بر محور تیر می‌باشد، برای تعیین مشخصات هندسی مقطع مختلط و نیز در محاسبهٔ A_c باید از بتن موجود در زیر سطح فوقانی ورق فولادی شکل داده شده صرف‌نظر شود.



شکل: ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌های آنها عمود بر محور تیر می‌باشد

۶ در ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌های آنها موازی با محور تیر می‌باشد، برای تعیین مشخصات هندسی مقطع مختلط و نیز در محاسبهٔ A_c می‌توان از بتن موجود در زیر سطح فوقانی ورق فولادی شکل داده شده استفاده نمود. همچنین، ورق‌های فولادی شکل داده شده را می‌توان در روی تیر فولادی تکیه‌گاهی از هم جدا کرد تا در روی بال مقطع فولادی یک ماهیچهٔ بتنی تشکیل شود. چنانچه ارتفاع اسمی ورق‌های فولادی شکل داده شده (h_r) به مقدار ۴۰ میلی‌متر یا بزرگتر باشد، پهنای متوسط کنگره‌های پر شده

با بتن در روی تیر تکیه‌گاهی نباید کمتر از ۵۰ میلی‌متر برای حالت یک گل‌میخ در پهنا باشد. این پهنای حداقل برای هر گل‌میخ اضافی، به اندازهٔ ۴ برابر قطر گل‌میخ باید افزایش یابد.



شکل: ورق‌های فولادی شکل داده شده که کنگره‌های آنها موازی با محور تیر می‌باشد

۷ حداقل ضخامت دال بتنی در حالت بدون استفاده از ورق‌های عرشه که با مقطع فولادی به‌صورت مختلط عمل می‌نماید، برابر ۸۰ میلی‌متر است.

۸ عرشهٔ فولادی باید در فواصلی حداکثر ۴۵۰ میلی‌متر به مقطع فولادی و سایر اعضای تکیه‌گاهی مهار شوند. این مهارها می‌توانند برشگیرهای از نوع گل‌میخ، ترکیبی از گل‌میخ‌ها و جوش‌های نقطه‌ای یا هر راهکار فنی دیگر باشد.

۹ حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز برشگیرها نباید از ۸ برابر ضخامت کل دال بتنی یا ۹۰۰ میلی‌متر بیشتر باشد.

نمونه سؤالات بحث (۱۰)

تمرین ۶۰: گل‌میخ‌ها در چه قسمتی از ساختمان‌های فولادی به‌کار می‌روند؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۴)

۱) تقویت برشی جان تیرها

۲) تقویت چشمهٔ اتصال ستون‌ها

۳) پیوند دال به تیر در سقف‌های مرکب

۴) در ساختمان‌های فلزی به‌کار نمی‌رود و از اجزای اتصال در سازه‌های چوبی است.

حل: باتوجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۶۱: در ساختمان با اسکلت فلزی، ستون‌ها از دو تیرآهن با ورق سرتاسری (کاور پلیت) باید. (دادگستری - ۸۶)

۱) با خرده آجر پر شود.

۲) با هر چیز که وجود دارد پر شود.

۳) با مصالح سنگی درشت‌دانه پر شود.

۴) با بتن سیمان پر شود.

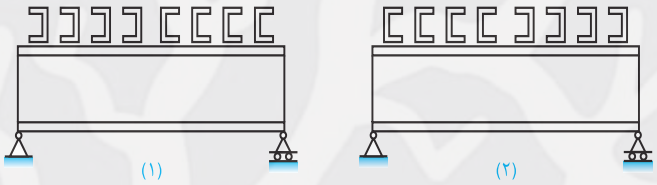
حل: اگر مقطع ستون به‌صورت مختلط طراحی شده باشد که باید با بتن پر شود وگرنه پرکردن آن مجاز نیست و باعث سنگین شدن سازه خواهد شد. بنابراین گزینهٔ صحیح وجود ندارد.

تمرین ۶۲: حداکثر تنش تسلیم میلگردها در اعضای با مقطع مختلط برحسب *MPa* چقدر می‌تواند باشد؟

۱) ۵۵۰ ۲) ۴۰۰ ۳) ۳۴۰ ۴) ۲۴۰

حل: براساس نکات درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۶۳:برای یک تیر مرکب کدام‌یک از آرایش‌های زیر برای برش‌گیرها مناسب است؟



۱) آرایش اول
۲) آرایش دوم
۳) هر دو آرایش
۴) هیچ‌یک از آرایش‌ها مناسب نیست.

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۶۴:در صورت استفاده از تیر مرکب، در کدام‌یک از حالات زیر از ظرفیت تیر مرکب استفاده بهتری می‌شود؟

۱) تیر بالکن
۲) تیر دو سر ساده
۳) تیر دو سرگیردار
۴) تیر چند دهانه (سراسری)

حل: در تیر بالکن (طره) لنگر خمشی در طول تیر منفی است که نشان می‌دهد کلاً بتن فوقانی تحت کشش قرار دارد و در نتیجه استفاده از مقطع مرکب برای تیرهای بالکن اشتباه است. در تیر دو سرگیردار و همچنین تیر سراسری، لنگر خمشی در مجاورت تکیه‌گاه‌ها منفی بوده که به ترک خوردن بتن منجر می‌شود و برای تأمین لنگر خمشی مقطع باید از آرماتورهای کششی به‌جای بتنی که کار نمی‌کند، استفاده کرد. ولی در تیر دو سر ساده، لنگر خمشی در کل طول تیر مثبت است که نتیجه می‌شود بتن فوقانی تحت فشار بوده و ترک نمی‌خورد و در این حالت، از بیشترین ظرفیت تیر مرکب استفاده می‌شود. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۶۵:حداقل و حداکثر مقاومت مشخصه بتن‌های سبک به کار رفته در اعضای با مقطع مختلط چند مگاپاسکال بایستی باشد؟

۱) ۲۰ و ۷۰
۲) ۲۰ و ۴۰
۳) ۲۰ و ۳۰
۴) ۲۰ و ۲۵

حل: با توجه به توضیحات درسنامه گزینهٔ (۲) صحیح است.

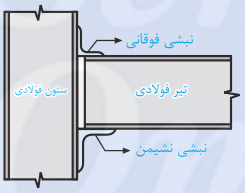
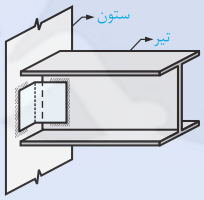
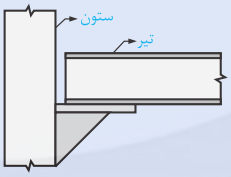
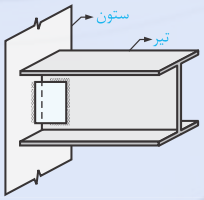
بحث ۱۱: آشنایی با اتصالات

پس از اینکه کف‌ها و سقف‌ها بارهای گسترده را به تیرها انتقال دادند، اتصالات نقش مهم انتقال بار به ستون را بر عهده دارند. در اتصالات علاوه بر حصول اطمینان از نحوهٔ صحیح انتقال نیرو، به اجرایی بودن و امکان ساخت آن نیز باید توجه شود. توجه دارید در تکیه‌گاه مفصلی تنها نیروی برشی ایجاد شده و در تکیه‌گاه گیردار نیروی برشی و لنگر خمشی، هر دو در تکیه‌گاه ایجاد می‌شود. در ادامه انواع اتصالات متداول را با هم بررسی خواهیم کرد.

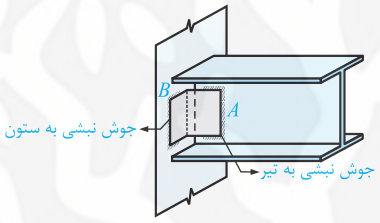
۱۱-۱- اتصال ساده (مفصلی)

به اتصالی گفته می‌شود که انعطاف‌پذیر بوده (بدون قید دورانی) و می‌توان آن را فقط در برابر برش ناشی از بارهای وارده (عکس‌العمل تکیه‌گاه) و اثرات ناشی از آن طراحی نمود. اتصال‌های ساده باید شرایط آزادی دوران در انتهای اعضا را تأمین این شرایط برخی تغییرشکل‌های غیرالاستیک با رعایت محدودیت‌های مربوطه در اتصال مجاز می‌باشد. به عبارت دیگر هیچ‌گونه لنگر خمشی در محل اتصال انتقال نمی‌یابد. انواع اتصالات مفصلی را در جدول زیر مشاهده می‌کنید.

جدول ۱۱: انواع اتصالات ساده (مفصلی)

ردیف	نام اتصال	شکل اتصال	توضیحات
۱	نبشی نشیمن		ضخامت نبشی پایین براساس نیروی برشی تکیه‌گاه و تنش خمشی در مقطع بحرانی تعیین می‌شود. عرض نبشی پایین براساس طول لازم برای جلوگیری از لهیدگی و تسلیم موضعی بین بال و جان تعیین می‌شود. نبشی فوقانی نقش نگهدارنده (اجرایی) را دارد و ضخامت آن حداقل ۶ میلی‌متر است. فاصلهٔ حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر بین تیر و ستون (GAP) به عنوان بادخور در نظر گرفته می‌شود. طول ساق نبشی (ضلع افقی) نباید جوش شود و تنها به اندازهٔ قلاب جوش باید ادامه پیدا کند.
۲	نبشی جان (دوبل نبشی)		اتصال با دو نبشی در دو طرف جان تیر به ستون انجام می‌شود. بالا و پایین نبشی نباید کاملاً به ستون جوش شود و تنها برگشت جوش به اندازهٔ ۴ برابر بُعد جوش کافی است. اتصال می‌تواند به‌صورت پیچی طرح و اجرا شود.
۳	نشیمن سخت شده با لچکی (براکت)		در واکنش تکیه‌گاهی زیاد، اتصال با لچکی تقویت می‌شود. در این حالت هم نبشی فوقانی می‌تواند استفاده شود. ورق سخت‌کننده مثلثی صلبیت بیشتری نسبت به مستطیلی دارد. عرض ورق نشیمن برای جلوگیری از جوش سربالا بزرگتر از عرض تیر انتخاب می‌شود. دو سمت قائم ورق کاملاً به ستون جوش می‌شود.
۴	ورق تک جان یا نبشی یکطرفه		زمانی که نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی ناچیز باشد (تیرهای فرعی) از این حالت استفاده می‌شود. این اتصال می‌تواند به‌صورت جوشی یا پیچی انجام شود.

۱۱-۲- بررسی جوش در اتصال ساده



هنگامی که از نبشی برای اتصال تیر به ستون استفاده می‌کنیم، دو سری جوش به‌صورت شکل مقابل خواهیم داشت که در ادامه هر یک از آنها را بررسی خواهیم کرد.

۱- جوش متصل‌کننده نبشی به تیر (جوش *A*): با توجه به اینکه این نیرو در صفحهٔ جوش قرار دارد، باعث ایجاد نیروی برشی و لنگر پیچشی می‌شود.

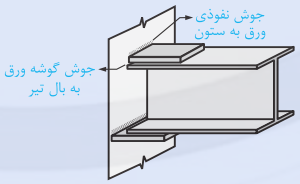
۲- جوش متصل‌کننده نبشی به ستون (جوش *B*): با توجه به اینکه این نیرو در خارج از صفحهٔ جوش قرار دارد، در این حالت لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد می‌شود.

تذکر: به علت وجود دو نبشی متقارن، در جوش متصل‌کنندهٔ نبشی به ستون لنگر پیچشی ایجاد نمی‌شود.

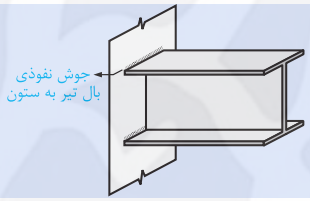
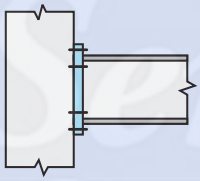
۱۱-۳- اتصالات گیردار

به اتصالی گفته می‌شود که در آن چرخش نسبی بین اعضای متصل شده به یکدیگر ناچیز است (با قید دورانی) و در آن نیروی برشی و لنگر خمشی هر دو منتقل می‌شوند. این نوع اتصالات به منظور حفظ زاویه بین اعضای متصل شده به یکدیگر باید در حالت‌های حدی از مقاومت و سختی کافی برخوردار باشند. اتصالات صلب یا ممان‌گیر در قاب‌های خمشی بکار می‌روند و وظیفهٔ تحمل و انتقال نیروهای جانبی ناشی از زلزله را برعهده دارند. انواع اتصالات صلب را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

جدول ۱۲: انواع اتصالات صلب

ردیف	نام اتصال	شکل اتصال	توضیحات
۱	اتصال با کمک ورق‌های روسری و زیرسری *(Top Plate & Bottom Plate)*		● اتصال ورق‌های روسری و زیرسری به بال ستون با جوش شیاری با نفوذ کامل (تمام قدرت) انجام می‌شود. ● اتصال ورق‌های روسری و زیرسری به بال تیر با جوش گوشه انجام می‌شود. ● تحت لنگر وارده به اتصال در ورق‌های زیرسری و روسری نیروی محوری ایجاد می‌شود و به دلیل جوش نفوذی زوج نیرو به ستون منتقل می‌شود. ● برای سهولت جوشکاری عرض ورق زیرسری بیشتر از عرض بال تحتانی و عرض ورق روسری کمتر از عرض بال فوقانی در نظر گرفته می‌شود. ● ورق زیرسری در کارخانه و ورق روسری در کارگاه به ستون جوش می‌شود. ● برای جلوگیری از جوش سربالای گوشه، ورق زیرسری به شکل مستطیل و ورق روسری به شکل ذوزنقه (کله گاوی) باید طراحی شود. ● انتقال نیروی برشی تکیه‌گاه با دو نبشی جان صورت می‌گیرد.

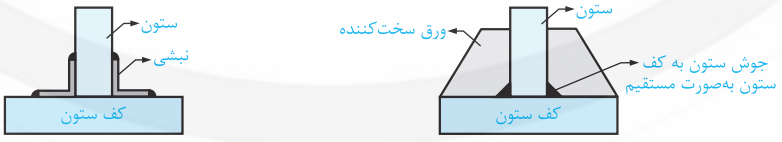
ادامهٔ جدول ۱۲: انواع اتصالات صلب

ردیف	نام اتصال	شکل اتصال	توضیحات
۲	اتصال مستقیم بال تیر به ستون		● انتهای تیر به‌صورت مستقیم و با جوش شیاری با نفوذ کامل به بال ستون جوش می‌شود. ● به دلیل نیاز به پخ‌زنی بال تیر و مشکلات اجرایی چندان متداول نیست.
۳	اتصال فلنجی		● اتصال تیر به ورق انتهایی در کارخانه با جوش نفوذی یا پیچ و اتصال ورق به ستون در کارگاه با پیچ انجام می‌شود. ● هر دو نیروی برشی و لنگر خمشی با یک مکانیزم منتقل می‌شوند و نیازی به نبشی جان تیر نیست. ● به دو صورت ۴ پیچ و ۸ پیچ انجام می‌شود. هرچه تعداد پیچ‌ها بیشتر باشد لنگر خمشی بیشتری را می‌توان انتقال داد. ● میزان لنگر قابل انتقال به قطر، تعداد و جانمایی پیچ‌ها و همچنین ضخامت ورق متصل‌شونده بستگی دارد.

تذکر: براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، اتصال خمشی نیمه گیردار به اتصالی گفته می‌شود که از طریق آن اگرچه لنگرها منتقل می‌شوند لیکن چرخش نسبی بین اعضای متصل شده به یکدیگر ناچیز نبوده و غیرقابل صرف‌نظر کردن است. در هنگام استفاده از این نوع اتصال ویژگی‌های پاسخ نیرو- تغییرشکل بایستی در تحلیل سازه در نظر گرفته شود.

۱۱-۴- اتصال ستون به کف ستون

به منظور اتصال ستون در سازهٔ فولادی به فونداسیون از کف ستون یا صفحه ستون (*Base Plate*) استفاده می‌شود. این اتصال ستون در دو حالت اتصال ساده یا گیردار (خمشی) به شکل زیر است، و باید برای انتقال نیروهای موجود در پای ستون طراحی گردد. در اتصال ساده، ستون تنها به وسیلهٔ نبشی‌های جانبی به کف ستون متصل می‌شود اما در اتصال گیردار، ستون توسط جوش دور تا دور به کف ستون متصل شده و همچنین ورق‌های سخت‌کننده نیز به صلبیت ستون کمک می‌کنند.



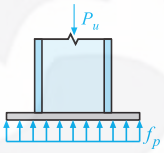
الف) اتصال ساده — ب) اتصال گیردار

۱ برای نیروی محوری فشاری، هنگامی‌که انتقال نیروی فشار کف ستون‌ها از طریق فشار مستقیم تماسی انجام می‌شود، باید انتهای ستون گونیا شده و سطح تماس آنها برای انتقال نیروی فشاری صاف و آماده شده باشد. به علاوه باید اتصال کافی بین ستون و کف ستون موجود باشد تا قادر به انتقال نیروهای حین ساخت و یا هر نیروی احتمالی دیگر باشد.

۲ برای تراز نمودن کف ستون معمولاً در زیر آن از گروت استفاده می‌شود. در این صورت مقاومت فشاری گروت باید حداقل دو برابر مقاومت فشاری بتن پی باشد و ضخامت آن از ۴۰ میلی‌متر کمتر و از ۸۰ میلی‌متر بیشتر نشود. برای کف ستون‌های با ابعاد بزرگ‌تر از ۵۰۰ میلی‌متر استفاده از سوراخی به قطر حداقل ۵۰ میلی‌متر در نواحی وسط ورق برای تخلیهٔ هوای گروت توصیه می‌گردد. استفاده از حداقل چهار میل مهار مناسب برای اتصال ورق کف ستون به پی توصیه می‌شود. این میل مهارها باید به نحو مناسب در بتن پی مهار شوند. مقاومت موجود میل مهار در بتن براساس الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان تعیین می‌گردد.

۳ کف ستون با انتقال بارهای ستون به فونداسیون، تنش‌های به‌وجود آمده در زیر ستون را در سطح بزرگتری پخش می‌کند تا از گسیختگی مصالح فونداسیون جلوگیری کند. کف ستون‌ها باید در برابر نیروهای وارده از طرف ستون شامل نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی طراحی شوند.

۴ هنگامی‌که ستون تحت اثر نیروی محوری خالص باشد، تنش‌های لهیدگی ایجاد شده بین کف ستون و فونداسیون به‌صورت یکنواخت می‌باشند و ابعاد کف‌ستون براساس مقاومت اتکایی بین کف ستون و فونداسیون تعیین می‌گردد. همچنین f_p مقاومت اتکایی است که براساس حالت حدی خردشدگی مصالح تکیه‌گاهی تعیین می‌شود.



۵ زمانی‌که کف‌ستون تحت اثر نیروی محوری و لنگر خمشی قرار دارد، با اعمال لنگر خمشی M_u تنش‌ها دیگر به صورت یکنواخت نبوده و به صورت غیریکنواخت می‌باشند. در این حالت ضخامت ورق کف‌ستون براساس گسیختگی خمشی ورق کف‌ستون و با استفاده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید. بنابراین داریم:

$$e = \frac{M_u}{P_u} \quad , \quad t = 2m\sqrt{\frac{f_p}{F_y}}$$

در این رابطه، m ضریبی است که با توجه به ابعاد ستون و صفحه ستون تعیین می‌شود.

۶ اگر در اتصال پای ستون تنها نیروی محوری فشاری P_u اثر کند، از نظر طراحی نیازی به میل‌مهار نیست و میل‌مهارهای به‌کار گرفته شده تنها از لحاظ اجرایی قرار داده می‌شوند. در این حالت در ساختمان‌های معمولی به‌طور مرسوم ۴ میل‌مهار با قطر mm ۲۰ در چهار طرف کف‌ستون استفاده می‌گردد. سر میل‌مهارها به اندازهٔ ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر دنده می‌شود و میل‌مهارها باید به اندازهٔ طول مهاری وارد بتن فونداسیون شوند.

۷ مقطع بحرانی لنگر خمشی پی برای ستون فلزی در وسط فاصلهٔ لبهٔ ستون از لبهٔ صفحهٔ زیر ستون خواهد بود.

نکته: درصورتی‌که در پای ستون علاوه بر نیروی محوری فشاری، نیروی برشی نیز وارد گردد، میل‌مهارها باید براساس برش طراحی گردند. در حالتی‌که میل‌مهارهای رزوه شده علاوه بر برش، نیروی کششی نیز ایجاد شود، باید براساس ضوابط طراحی پیچ‌ها عمل کنیم.

۸ برای محاسبه مقاومت اتکایی طراحی در محل کف ستون‌ها که براساس حالت حدی خردشدگی مصالح تکیه‌گاهی تعیین می‌شود سه حالت را می‌توان در نظر گرفت:

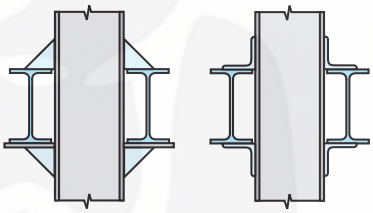
الف) تکیه‌گاه مصالح بنایی یا سنگ آهکی یا ماسه سنگ متراکم و ماسه سیمان، در این حالت تنش اتکایی اسمی (F_p) مساوی ۶ مگاپاسکال است.

ب) تکیه‌گاه مصالح بنایی با آجرفشاری و ملات ماسه سیمان، در این حالت تنش اتکایی اسمی (F_p) مساوی ۴ مگاپاسکال است.

پ) فشار مستقیم روی تکیه‌گاه بتنی، در این حالت براساس مقاومت فشاری بتن (f_u) مقدار تنش اتکایی اسمی (F_p) تعیین می‌شود.

۱۱-۵- اتصال خورجینی (قیچی)

یکی از روش‌های ایجاد اتصال تیر به ستون، اتصال خورجینی نامیده می‌شود که در آن تیرها مطابق شکل در حد فاصل ۲ ستون قطع نمی‌گردد، بلکه به صورت یک جفت تیرآهن از طرفین ستون به‌طور ممتد ادامه می‌یابد. اتصال تیر به ستون به کمک نبشی نشیمن پایین و بالا صورت می‌گیرد. در نتیجه عملکرد تیر برای حمل بار قائم به‌صورت سراسری است. در این حالت می‌توان گفت اتصال تیر به ستون ساده بوده و لنگر را انتقال نمی‌دهد، بنابراین قاب دارای این اتصال، ساده بوده و برای تحمل بارهای جانبی باید از مهاربند استفاده کرد. در مورد این اتصال موارد زیر حائز اهمیت است:



الف) نشیمن تقویت نشده (انعطاف‌پذیر) ب) نشیمن تقویت شده

۱ استفاده از اتصالات خورجینی با توجه به سهولت اجرا و نیاز کمتر به برشکاری و جوشکاری و کاهش مقاطع تیرها، در ساختمان‌های کوتاه معمولی در گذشته متداول بوده است.

۲ نصب آسان، دقت اندازه‌گیری کم و صرفه‌جویی در مصرف فولاد و میلگرد سبب کوتاه‌تر شدن دهانه تیرچه‌ها نیز از مزایای این نوع اتصال می‌باشد.

۳ هر دو اتصال نشان داده شده در شکل در طبقه‌بندی اتصال خورجینی ساده قرار دارند. اتصال خورجینی شکل (الف) قادر به تحمل واکنش‌های تکیه‌گاهی بزرگ نیست. در صورتی‌که اتصال خورجینی تقویت شده به وسیلهٔ ورق لچکی در شکل (ب) می‌تواند واکنش‌های بزرگ تکیه‌گاهی را تحمل نماید.

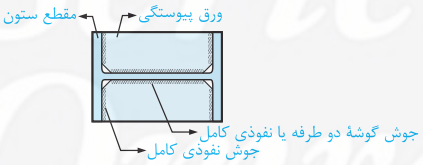
نکته: براساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، قاب‌های فولادی دارای اتصالات خورجینی ساده، همراه با دیوار برشی یا مهاربندی، در گروه سیستم قاب ساختمانی ساده قرار می‌گیرند. قاب‌های فولادی دارای اتصالات خورجینی گیردار قاب خمشی فولادی متوسط محسوب می‌شوند. حداکثر ارتفاع مجاز ساختمان‌هایی که در آنها تنها از قاب‌های خمشی با این نوع اتصالات استفاده می‌شود به ۳۰ متر تقلیل می‌یابد.

۱۱-۶- ورق پیوستگی

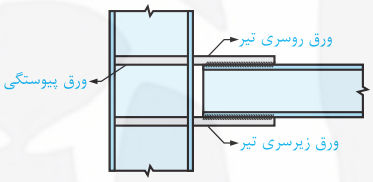
در اثر وجود بار متمرکز روی تیر یا ستون امکان ناپایداری در جان مقطع به دلیل ضخامت کم آن به‌صورت‌های مقابل وجود خواهد داشت:

۲) لهیدگی جان ۱) تسلیم موضعی جان

برای مقابله با این موضوع می‌توان از سخت‌کننده استفاده کرد. به همین دلیل در اتصالات گیردار عموماً لازم است در مقابل بال‌ها یا ورق‌های اتصال بال فوقانی و تحتانی تیرهای متصل شده به ستون، به‌صورت متقارن نسبت به محور ستون، ورق‌های تقویت داخل ستون قرار گیرد که به آن ورق پیوستگی گفته می‌شود. برای جلوگیری از وقوع پدیده‌هایی نظیر تسلیم موضعی بال و جان ستون در شکل (۱) و نیز چین‌خوردگی یا اعوجاج جان (لهیدگی جان) در شکل (۲) و اطمینان از سلامت انتقال نیروهای لرزه‌ای ایجاد شده از تیر به ستون از این نوع ورق استفاده می‌شود. در مورد ورق‌های پیوستگی رعایت نکات زیر ضروری است:



جزئیات ورق پیوستگی (نمایش مقطع ستون از بالا)



اتصال ورق پیوستگی به ستون

۱) طول ورق‌های پیوستگی باید برابر با فاصلهٔ خالص دو بال ستون باشد.

۲) پهنای ورق‌های پیوستگی در ستون‌های با مقطع قوطی شکل باید برابر فاصلهٔ خالص دو جان مقطع ستون بوده و در ستون‌های با مقطع H شکل مجموع پهنای ورق‌های پیوستگی در هر طرف جان مقطع ستون نباید از پهنای بال تیر یا پهنای ورق پوششی اتصال کمتر باشد.

۳) ضخامت ورق‌های پیوستگی نباید از ٪۵۰ ضخامت بال تیر یا ضخامت ورق‌های پوششی اتصال (ورق‌های روسری و زیرسری) در اتصالات گیرداری که در امتداد موردنظر فقط به یک وجه ستون متصل هستند و از ٪۷۵ ضخامت بال ضخیم‌تر تیرها یا ضخامت ور ضخیم‌تر پوششی اتصال (ورق‌های روسری و زیرسری) در اتصالات گیرداری که در امتداد موردنظر به هر دو وجه ستون متصل هستند، کمتر در نظر گرفته شود.

۴) جوش ورق‌های پیوستگی به بال ستون باید از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل باشد. در صورتی‌که ضخامت ورق پیوستگی کوچک‌تر یا مساوی ۲۰ میلی‌متر باشد، استفاده از جوش گوشهٔ دو طرفه نیز مجاز است. در صورت استفاده از جوش گوشهٔ دو طرفه، در هر طرف بعد آن نباید از ۰/۷۵ ضخامت ورق پیوستگی کوچک‌تر در نظر گرفته شود.

۵) جوش ورق‌های پیوستگی به جان ستون یا ورق‌های تقویتی جان (ورق مضاعف) باید از نوع جوش شیاری با جوش گوشهٔ دوطرفه باشد. در صورت استفاده از جوش گوشهٔ دو طرفه، مقاومت موردنیاز این جوش‌ها می‌تواند برابر مقاومت برشی موجود ورق پیوستگی در تماس با جان ستون یا ورق مضاعف در نظر گرفته شود.

۶) **ورق پیوستگی:** به ورق‌های تقویتی که در راستای بال‌ها یا ورق‌های اتصال بال تیر به وجه ستون در چشمهٔ اتصال تعبیه شده و به بال‌ها و جان (یا جان‌های) ستون متصل می‌شوند، اطلاق می‌شود.

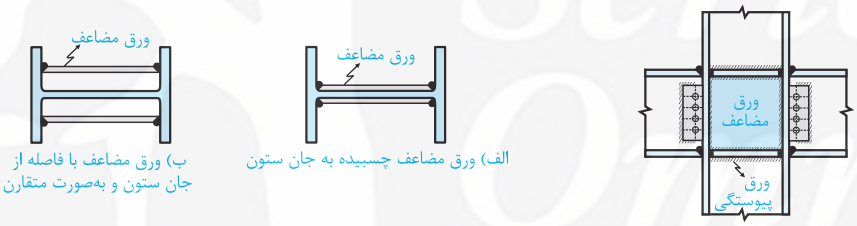
۷) **ورق مضاعف:** به ورق‌های اضافی گفته می‌شود که موازی جان تیرها یا ستون‌ها در ناحیهٔ چشمهٔ اتصال در مقابل نیروهای متمرکز تعبیه می‌شود و موجب افزایش مقاومت برشی چشمهٔ اتصال می‌شود.

۱۱-۷- ورق مضاعف

ورق مضاعف‌کننده یا ورق تقویتی جان به منظور کاهش تنش برشی موجود در چشمهٔ اتصال صلب و یا در صورتی‌که با پیچ یا جوش انگشتانه کافی به جان ستون متصل باشند برای جلوگیری از ناپایداری جان ستون به کار می‌رود. به عبارتی دیگر در صورتی که مقاومت برشی مورد نیاز چشمهٔ اتصال از مقاومت برشی طراحی بیشتر باشد، تعبیهٔ ورق تقویتی جان (ورق مضاعف) یا یک جفت سخت‌کنندهٔ قطری دارای مقاومتی حداقل برابر با اختلاف مقاومت مورد نیاز و مقاومت طراحی در محدودهٔ چشمهٔ اتصال ضروری است. در مورد ورق‌های مضاعف نکات زیر حائز اهمیت است:

۱) این ورق‌ها می‌توانند چسبیده به جان ستون و یا با فاصله از آن، به‌صورت متقارن نسبت به آن محور از مقطع ستون که موازی نیروی برشی وارده می‌باشد به کار روند.

۲) این ورق‌ها باید به بال‌های ستون و ورق‌های پیوستگی فوقانی و تحتانی متصل شوند.



الف) ورق مضاعف چسبیده به جان ستون — ب) ورق مضاعف با فاصله از جان ستون و به‌صورت متقارن

اتصال ورق مضاعف‌کننده به جان ستون

جزئیات ورق مضاعف (نمایش مقطع ستون از بالا)

۳) ورق‌های مضاعف در ستون‌های H شکل باید در دو طرف جان و در ستون‌های قوطی شکل در دو وجه ستون به‌کار روند.

۴) در صورت وجود ورق‌های پیوستگی، ورق‌های مضاعف می‌توانند در محل ورق‌های پیوستگی قطع شده و توسط جوش شیاری با نفوذ کامل یا جوش گوشه به ورق‌های پیوستگی متصل شوند.

۵) در ستون‌های قوطی شکل (HSS) و جعبه‌ای ساخته شده از ورق، استفاده از ورق‌های مضاعف مجاز نبوده و جان‌های مقطع ستون باید بتوانند مقاومت برشی موردنیاز چشمهٔ اتصال را تأمین نمایند.

۶) در ستون‌های H شکل، در مواردی‌که ورق‌های مضاعف در هر دو طرف جان ستون به‌کار می‌روند، این ورق‌هاباید به‌صورت متقارن و در محدودهٔ یک سوم میانی فاصلهٔ بین مرکز صفحهٔ جان ستون و نوک بال تیر یا ورق‌های اتصال بال فوقانی و تحتانی تیر تعبیه شود.

۷) اتصال ورق‌های مضاعف به بال ستون می‌تواند از نوع جوش شیاری با نفوذ کامل یا ناقص یا جوش گوشه باشد. مقاومت موردنیاز جوش شیاری با نفوذ ناقص یا جوش گوشه باید برابر مقاومت برشی موجود ورق مضاعف در نظر گرفته شود.

۸) در مواردی‌که نیاز به تعبیهٔ ورق‌های پیوستگی نباشد، ورق‌های مضاعف باید حداقل ۱۵۰ میلی‌متر از بالا و پایین بال‌های فوقانی و تحتانی تیر ادامه یافته و از طریق جوش گوشه به جان ستون جوش شوند.

در صورت وجود ورق‌های پیوستگی، ورق‌های مضاعف باید در محل ورق‌های پیوستگی قطع شده و از طریق جوش شیاری با نفوذ کامل یا ناقص یا جوش گوشه به ورق‌های پیوستگی جوش شوند. مقاومت موردنیاز جوش شیاری با نفوذ ناقص یا جوش گوشه باید حداقل برابر ۰/۷۵ مقاومت برشی موجود ورق مضاعف در نظر گرفته شود.

۱۱-۸- وصله‌ها در مقاطع سنگین

در مورد نیمرخ‌های حجیم و سنگین و نیمرخ‌های مرکبی که از ورق‌های ضخیم‌تر از ۴۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند (مقطع سنگین) ضوابطی وجود دارد که به مهمترین نکات آن می‌پردازیم:

۱) در وصله این گونه اعضا چنانچه از جوش نفوذی لب به لب استفاده شود باید برای جلوگیری از اثر انقباض ناشی از سردشدن و شکست ناشی از تردی در جوش و مصالح مجاور آن احتیاط‌های لازم به عمل آید. استفاده از پیش گرمایش و یا استفاده از الکترودهای کم هیدروژن در این خصوص الزامی است.

۲) اگر جوش وصله این گونه اعضا نقش انتقال تنش‌های کششی ناشی از نیروی کششی یا لنگر خمشی را داشته باشد لازم است محدودیت‌های مربوط به طاقت مصالح روی نمونه زخم‌دار با انجام آزمایش شارپی بررسی گردد.

۳) در اتصالات کششی مقاطع سنگین باید بعد از جوشکاری، تسمه پشت‌بند جوش را (در صورت موجود بودن) از جای خود برداشت و جوش‌ها را با سنگ زدن صاف و یکواخت کرد و در صورت لزوم از جوش پشت استفاده کرد.

۴) برای وصله مقاطع سنگین ارجح است از جزئیاتی استفاده شود که انقباض جوش در آن بزرگ نباشد.

۵) در صورت استفاده از وصله مستقیم، وصله باید با جوش نفوذی کامل صورت گیرد.

۱۱-۹- سوراخ دسترسی

کلیه سوراخ‌هایی که به منظور دسترسی و تسهیل جوشکاری تعبیه می‌شوند (مانند سوراخ دسترسی در جان به منظور جوش لب به لب بال) برای قراردادن مصالح جوش در موضع موردنظر باید دید کامل و فراخی کافی را داشته باشد. این سوراخ‌ها و نیز قسمت‌های برش دادهٔ بال در انتهای تیرها باید به صورتی کاملاً یکنواخت با انحنای ملایم و بدون گوشه‌های تیز تعبیه شود. در مورد سوراخ دسترسی می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) طول سوراخ دسترسی (l) برای جوشکاری که از محل ریشه جوش مربوطه اندازه‌گیری می‌شود نباید کمتر از ۴۰ میلی‌متر و از ۱/۵ برابر ضخامت ورقی گردد که سوراخ دسترسی در آن ایجاد می‌گردد.

۲) ارتفاع سوراخ دسترسی (h_1) نباید از ۲۰ میلی‌متر و از ضخامت ورقی که سوراخ دسترسی در آن ایجاد می‌شود کوچکتر و از ۵۰ میلی‌متر بزرگتر در نظر گرفته شود.

۳) شعاع قوس‌های سوراخ دسترسی جوش نباید کمتر از ۱۰ میلی‌متر اختیار شود.

۴) در نیمرخ‌های سنگین و مقاطع ساخته شده از ورق که از ورق‌های به ضخات بیش از ۴۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند، لبه‌های برش دادهٔ تیر یا سوراخ‌های دسترسی که توسط شعله بریده شده باشند را باید با سنگ زدن به‌صورت فلز صاف و براق درآورد. اگر قسمت‌های منحنی بریده شده در محل سوراخ دسترسی توسط عمل مته کردن یا برقو زدن صورت گرفته باشد، به سنگ زدن و صاف کردن احتیاجی ندارد.

۱۱-۱۰- آرایش جوش و پیچ در محل اتصال

ترتیب قرارگیری جوش‌ها و پیچ‌ها در انتهای هر عضوی که نیروی محوری را انتقال می‌دهند باید طوری باشد که مرکز هندسی گروه وسایل اتصال و مرکز ثقل عضو در یک راستا قرار گیرد مگر حالتی که به برون محوری موجود در طرح و اثر آن در محاسبه توجه شده باشد. انطباق مذبور در اتصال‌های انتهایی نبشی‌های تک، نبشی‌های زوج و اجزای مشابه تحت ابر استاتیکی ضرورتی ندارد.

۱۱-۱۰-۱- ترکیب پیچ و جوش

به‌طور کلی وقتی در یک اتصال از ترکیب جوش و پیچ استفاده می‌شود پیچ را نمی‌توان در تحمل بار با جوش سهیم دانست اما در صورت رعایت شرایط زیر، تعیین مقاومت موجود اتصال متشکل از پیچ‌های پرمقاومت و جوش‌های گوشهٔ طولی، مقاومت اسمی را می‌توان برابر مجموع مقاومت لغزشی اسمی پیچ‌ها و مقاومت اسمی جوشی‌های گوشهٔ طولی در نظر گرفت:

الف) پیچ‌ها از نوع پرمقاومت بوده و به‌صورت لغزش بحرانی طراحی شده باشند.

ب) در طراحی به روش $LRFD$ ضریب کاهش مقاومت برابر $\phi = ۰/۷۵$ و در طراحی به روش ASD ضریب اطمینان برابر $\Omega = ۲/۰۰$ در نظر گرفته شود.

پ) اگر پیچ‌های پرمقاومت با استفاده از روش چرخاندن اضافی مهره‌ها پیش تنیده شوند، مقاومت موجود جوش‌های گوشه طولی از ۵۰ درصد مقاومت مورد نیاز اتصال کمتر نباشد.

ت) اگر پیچ‌های پرمقاومت با استفاده از هر روشی به جز روش چرخاندن اضافی مهره‌ها پیش‌تنیده شوند، مقاومت موجود جوش‌های گوشه طولی از ۷۰ درصد مقاومت موردنیاز اتصال کمتر نباشد.

ث) مقاومت موجود پیچ‌های پرمقاومت از ۳۳ درصد مقاومت موردنیاز اتصال کمتر نباشد.

ج) در خصوص ساختمان‌های موجودی که اتصالات آن‌ها از نوع پیچی است، تقویت اتصال از طریق جوش، به شرطی مجاز است که پیچ‌های موجود از نوع پر مقاومت و با عملکرد لغزش بحرانی طراحی و اجرا شده باشند. در این گونه موارد جوش باید نیروهای مازاد بر آنچه پیچ تحمل می‌کند را انتقال دهد و درهر حال مقاومت موجود جوش نباید کمتر از ۲۵ درصد مقاومت مورد نیاز اتصال باشد.

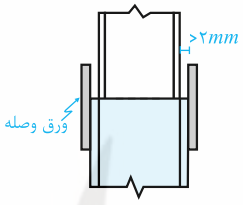
۱۱-۱۱- ورق‌های پرکننده (لقمه‌ها)

الزامات عمومی ورق‌های پرکننده در محل وصله اعضا به شرح زیر می‌باشد.

۱) در اتصالات جوشی، در صورتی که فاصلهٔ بین وجه داخلی ورق وصله و وجه خارجی قطعه با ابعاد کوچکتر، مساوی یا کمتر از ۲ میلی‌متر باشد، نیازی به تعبیه ورق‌های پرکننده نمی‌باشد.

۲) در اتصالات جوشی، ورق‌های پرکننده‌ای که ضخامت آن‌ها کمتر از ۶ میلی‌متر می‌باشد یا ورق‌های پرکننده‌ای با ضخامت مساوی یا بزرگ‌تر از ۶ میلی‌متر که توانایی انتقال نیروی ورق وصله را به ستون فوقانی ندارند، لبه‌هایشان باید همباد لبه‌های ورق وصله تمام شود و اندازه جوش باید مساوی مجموع اندازهٔ جوش لازم جهت انتقال نیروی وصله به اضافه ضخامت ورق پرکننده در نظر گرفته شود.

۳) در اتصالات جوشی، ورق‌های پرکننده‌ای که ضخامت آن بیش از ۶ میلی‌متر بوده و توانایی لازم جهت انتقال نیروی وصله را دارند، باید از لبه‌های ورق وصله به اندازهٔ کافی ادامه یابند و به قطعه‌ای که روی آن قرار می‌گیرند، جوش شوند. جوش ورق‌های پرکننده به قطعه‌ای که روی آن قرار می‌گیرند، باید برای انتقال نیروهای ورق وصله کافی باشد. همچنین، ضخامت جوش‌هایی که ورق وصله را به ورق پرکننده متصل می‌کنند، باید متناسب با ضخامت ورق پرکننده بوده و برای انتقال نیروهای ورق وصله کافی باشد.



۴) در اتصالات پیچی، ورق‌های پرکننده‌ای که ضخامت آنها مساوی یا کمتر از ۶ میلی‌متر می‌باشد، لبه‌هایشان باید همباد لبه‌های ورق وصله تمام شود. در اینگونه موارد هیچ‌گونه کاهشی بر روی مقاومت برشی طراحی پیچ‌ها اعمال نمی‌شود. ورق‌های پرکننده‌ای که ضخامت آنها بیشتر از ۶ میلی‌متر می‌باشد، باید یکی از الزامات زیر در مورد آن‌ها به کار گرفته شود.

- لبه‌های ورق‌های پرکننده همباد با لبه‌های ورق وصله تمام شود و مقاومت برشی طراحی پیچ‌ها در ضریب کاهش $[۱-۰/۰۱۵۴(t-۶)] \geq ۰/۸۵$ ضرب شود. که در آن t ضخامت کل ورق‌های پرکننده به میلی‌متر است.
- لبه‌های ورق‌های پرکننده از لبه‌های ورق وصله به اندازهٔ کافی ادامه یافته و به منظور توزیع یکنواخت نیروی کلی در محل وصله، با پیچ‌های کافی به قطعه‌ای که روی آن قرار می‌گیرند، پیچ شوند. در این حالت، اندازهٔ محل اتصال باید به منظور سازگاری با تعداد کل پیچ‌ها افزایش یابد.
- لبه‌های ورق‌های پرکننده همباد با لبه‌های ورق وصله تمام شود و طراحی وصله به‌صورت اصطکاکی صورت گیرد.

تبصره: توصیه می‌شود همانند شکل مورد (۳) ستون‌ها قبل از محل درز، هم اندازه شوند، به‌طوری که در هنگام نصب نیازی به تعبیهٔ ورق‌های پرکننده نباشد.

۱۱-۱۲- میل مهارها و اقلام مدفون

الف) میل مهارها

میل مهارها باید طوری طراحی و محاسبه شوند که در تمام ترکیبات بارگذاری وارد بر سازه، از نظر کشش، برش و اثرات توأم آنها، جوابگو باشند. الزامات میل مهارها باید بر طبق ضوابط قطعه‌های دندانه شده تعیین شود. در مواردی که میل مهارهای کف ستون‌ها از آرماتورهای آجدار ساخته می‌شوند، در تعیین مقاومت‌ها، سطح مقطع اسمی ناحیهٔ رزوه شده (که پس از برداشتن دندانه‌های برجسته اندازه‌گیری شده و کوچکتر از قطر اسمی آرماتور می‌باشد) ملاک محاسبه خواهد بود. در صورتی که از واشرهای مناسب در محل سوراخ، جهت ایجاد تکیه‌گاه کافی برای مهره استفاده شود، سوراخ‌های بزرگ‌شده و سوراخ‌های لوبیایی برای استفاده در کف ستون مجاز هستند.

ب) اقلام مدفون

سازهٔ بتنی باید طوری طراحی شود که به‌طور ایمن نیروهای حاصل از اقلام مدفون را با ضریب اطمینان کافی تحمل نماید؛ به نحوی که اطمینان حاصل گردد که مقاومت اقلام مدفون در اثر گسیختگی موضعی یا عمومی سازهٔ بتنی کاهش پیدا نکند. مقاومت طراحی عناصر فولادی اقلام مدفون باید مطابق ضوابط مبحث دهم تعیین شود. ارجح است انتقال نیروهای برشی توسط اقلام مدفون به بتن از طریق مفهوم برش - اصطکاک صورت پذیرد، که در این خصوص الزامات مبحث نهم مقررات ملّی ساختمان تعیین‌کننده خواهد بود.

نمونه سؤالات بحث (۱۱)

تمرین ۶۶: صفحات زیر ستون بیشتر به چه منظوری محاسبه می‌شود؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) برش ۲) فشار و کشش ۳) فشار و خمش ۴) کشش

حل: براساس مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۶۷: اگر به هنگام اجرای اسکلت فلزی قسمتی از ستون خارج از صفحه زیر ستون قرار گیرد، جهت اصلاح وضعیت باید: (دادگستری - ۷۹)

۱) صفحهٔ زیر ستون برداشته و صفحه‌ای با همان ضخامت و ابعاد بزرگتر به گونه‌ای نصب نمود تا محورها برهم منطبق گردند.

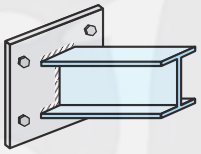
۲) صفحه‌ای هم قطر صفحهٔ زیر ستون به نحوی به ستون جوش داده شود که محورها برهم منطبق شوند. در این حالت نصب صفحات سخت‌کننده نیز ضروری است.

۳) صفحهٔ زیر ستون را برداشته و صفحه‌ای بزرگتر و با ضخامت بیشتر به گونه‌ای که محورها برهم منطبق گردند کار گذارده شود.

۴) هیچ‌کدام از روش‌های فوق ضرورت ندارد.

● حل: برداشتن صفحهٔ زیر ستون و قرار دادن صفحهٔ جدید کار چندان ساده‌ای نیست. بنابراین مناسب‌ترین راه‌حل، روش ارائه شده در گزینهٔ (۲) می‌باشد.

تمرین ۶۸: در انتهای تیر فلزی صفحه‌ای مطابق شکل جوش شده است. در صورتی‌که اتصال جوش صد در صد پاسخ‌گویی انتقال ممان تیر به صفحه باشد، آنگاه: (قوهٔ قضائیه - ۸۱)



۱) در صورت استفاده از پیچ‌های اصطکاکی برای اتصال تیر به ستون باید انتظار داشت که اتصال به صورت نیمه‌گیردار عمل نخواهد کرد.

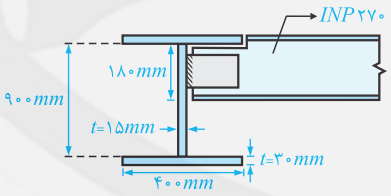
۲) در صورت استفاده از پیچ اصطکاکی فاصلهٔ پیچ‌ها (d) تأثیری بر درصد انتقال ممان تیر به ستون ندارد.

۳) ضخامت صفحهٔ انتهایی تأثیری شدید بر درصد انتقال ممان ندارد.

۴) میزان درصد ممان‌گیری اتصال نه تنها به قطر، تعداد، موقعیت پیچ‌های اصطکاکی ارتباط دارد بلکه ضخامت صفحهٔ انتهایی نیز سهم بسزایی به درصد انتقال ممان خواهد داشت.

● حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۶۹: برای اتصال تیر نورد شده *INP*۲۷۰ به تیر ورق مرکب در شکل مقابل کدام گزینه صحیح است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۱)



۱) اتصال به‌صورت اتصال لولایی عمل می‌کند.

۲) به علت عرض بال تیر ورق امکان جوش نبشی جان نیست و لازم است از نبشی نشیمن برای اتصال لولایی استفاده شود.

۳) در صورت استفاده از نبشی نشیمن بال فشاری تیر ورق از جانب مهار نمی‌شود و کمانش جانبی در تیر ورق رخ می‌دهد.

۴) برش بال تیر نورد شده با توجه به عرض بال تیر ورق سبب ضعف اتصال شده است و عملاً اتصال طرح مناسبی نیست.

● حل: با توجه به مفاهیم بیان شده در درسنامه، اتصال تیر فرعی به تیر اصلی با ورق جان انجام شده و به‌صورت مفصلی (لولایی) رفتار می‌کند.

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۷۰: کدام‌یک از عبارات زیر، در خصوص ترکیب پیچ و جوش در یک اتصال اتکایی صحیح می‌باشد؟

۱) کل تنش را باید پیچ به تنهایی تحمل کند.

۲) کل تنش را باید جوش به تنهایی تحمل کند.

۳) فقط در صورتی‌که از پیچ‌های پرمقاومت استفاده شود، کل تنش را باید پیچ به تنهایی تحمل کند.

۴) در صورت استفاده از پیچ‌های پرمقاومت می‌توان جوش و پیچ را در تحمل تنش‌ها سهیم فرض کرد.

حل: براساس مطالب درسنامه ، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۷۱: در میل مهارها در صورتی‌که از واشرهای مناسب در محل سوراخ، جهت ایجاد تکیه‌گاه کافی برای مهره استفاده شود، سوراخ‌های ..... برای استفاده در کف ستون مجاز هستند.

۱) بزرگ شده و لوبیایی
۲) استاندارد و لوبیایی
۳) بزرگ شده و لوبیایی بلند
۴) استاندارد و لوبیایی بلند

حل: با توجه به نکات مطرح شده در قسمت میل مهارها، گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۷۲: کدام‌یک از مقادیر زیر برای ارتفاع سوراخ دسترسی در جان یک تیر ورق، جهت جوش لب به لب بال، مجاز نمی‌باشد؟ ضخامت جان mm ۱۰ و ضخامت بال mm ۱۵ فرض شود.

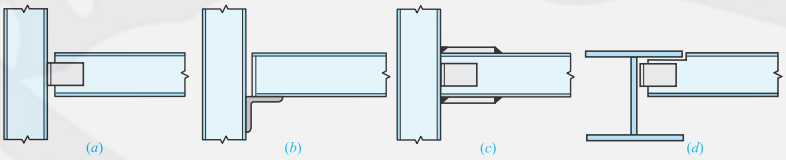
۱) ۴۵ میلی‌متر
۲) ۲۰ میلی‌متر
۳) ۲۵ میلی‌متر
۴) ۱۵ میلی‌متر

حل: با توجه به مطالب درسنامه در خصوص سوراخ دسترسی داریم:

$max\{۲۰, t\} < h_۱ < ۵۰ \Rightarrow ۲۰ < h_۱ < ۵۰$

بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

تمرین ۷۳: در کدام‌یک از اتصالات نمایش داده شده در شکل، کنترل لزوم ورق‌های مضاعف در چشمه اتصال ضروری است؟

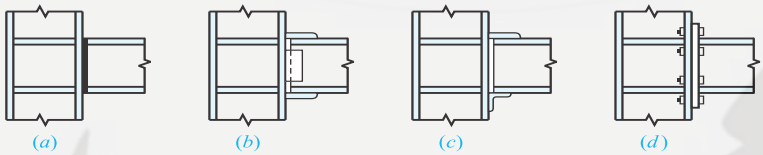


۱) a
۲) b
۳) c
۴) d

حل: ورق‌های مضاعف تنها ممکن است در اتصالات گیردار تیر به ستون مورد نیاز باشند.

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

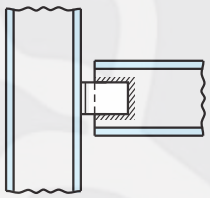
تمرین ۷۴: کدام‌یک از اتصالات خمشی شکل زیر برای تحمل بارهای جانبی نظیر زلزله مجاز نمی‌باشد؟



۱) (c)
۲) (b)
۳) (a)
۴) (d)

● حل: می‌دانیم وظیفهٔ تحمل و انتقال بارهای جانبی در سیستم قاب خمشی برعهده اتصال گیردار است. بنابراین اتصال (c) که به‌صورت مفصلی (با نبشی نشیمن) ارائه شده برای تحمل بارهای جانبی مناسب نیست. اتصال (a) اتصال مستقیم تیر به ستون با جوش نفوذی، اتصال (b) اتصال گیردار با ورق‌های روسری و زیرسری و اتصال (d) یک اتصال گیردار فلنجی است. بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ سؤال است.

تمرین ۷۵: چنانچه برای اتصال مفصلی تیر به ستون نشان داده شده در شکل، فقط از دوبل نبشی جان استفاده شده باشد، جوش نبشی‌ها به تیر بایستی براساس چه عواملی طراحی شود؟



۱) نیروی برشی و لنگر پیچشی
۲) نیروی برشی و لنگر خمشی
۳) نیروی برشی
۴) نیروی برشی، لنگر خمشی و لنگر پیچشی

● حل: جوش نبشی‌ها به تیر براساس نیروی برشی و لنگر پیچشی طراحی می‌شود. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۷۶: در رابطه با اتصال ستون فولادی به کف ستون، کدام گزینه نمی‌تواند صحیح باشد؟

۱) برای تحمل نیروهای حین ساخت توسط ستون‌ها، اتصال آنها به کف ستون‌ها باید از نوع خمشی باشد.
۲) اتصال ستون به کف ستون برای نیروهای ایجاد شده در پای ستون طراحی می‌شود.
۳) انتقال نیروی محوری فشاری ستون، عمدتاً توسط فشار مستقیم ستون که به‌صورت تماسی است به کف ستون منتقل می‌شود.
۴) گونیا بودن انتهای ستون و صاف بودن آن، از شروط اصلی در انتقال نیروی محوری ستون به کف ستون می‌باشد.

● حل: با توجه به نکات درسنامه عبارت گزینهٔ (۱) نادرست بوده و پاسخ سؤال است.

تمرین ۷۷: منظور از واژه ورق پیوستگی در طراحی یک سازه فولادی چیست؟

۱) ورقی است که پیوستگی بین اجزاء ستون‌های با مقطع مرکب (ساخته شده) را تأمین می‌نماید.
۲) ورقی است که پیوستگی بین دال بتنی و تیر فولادی را در تیرهای مختلط تأمین می‌نماید.
۳) ورقی است که در محل چشمه اتصال یک اتصال خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
۴) ورقی است که پیوستگی بین بال و جان یک تیر فولادی را تأمین می‌نماید.

● حل: مطابق توضیحات درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

بحث ۱۲: بررسی ضوابط پیچ‌ها و عملکرد آن‌ها

یکی دیگر از مهمترین وسایل اتصال در سازه‌های فولادی پیچ‌ها هستند که در ساختمان‌های با اسکلت پیچ و مهره کاربرد دارند. در این گونه ساختمان‌ها رعایت محدودیت قطر، فواصل و نحوه سفت کردن پیچ‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بحث به بررسی مهمترین نکات پیچ‌ها خواهیم پرداخت.

۱۲-۱- انواع پیچ‌ها و عملکرد آنها

انواع متداول پیچ‌های مورد استفاده در اسکلت‌های فولادی عبارتند از پیچ‌های معمولی و پیچ‌های پرمقاومت که در جدول زیر مشخصات پیچ‌های موجود یا تولید شده در ایران طبق استانداردهای *ASTM* و *ISO* آورده شده است. دقت شود که برای هر پیچ باید واشر و مهرهٔ سازگار مورد استفاده قرار گیرد. در مورد پیچ‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ مشخصات مکانیکی انواع مختلف پیچ‌ها در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۳: مشخصات مکانیکی پیچ‌ها

نوع پیچ	*ISIRI* ۲۸۷۴ *EN – ISO* ۸۹۸	*ASTM*	تنش تسلیم مشخصهٔ (F_y) (*MPa*)	تنش کششی نهایی (F_u) (*MPa*)	کرنش نهایی (٪) (ε_u)
پیچ‌های معمولی	۴.۶	*A* ۳۰۷	۲۴۰	۴۰۰	۲۲
	۴.۸	-	۳۲۰	۴۲۰	۱۴
	۵.۶	-	۳۰۰	۵۰۰	۲۰
	۵.۸	-	۴۰۰	۵۲۰	۱۰
	۶.۸	-	۴۸۰	۶۰۰	۸
پیچ‌های پرمقاومت	۸.۸	*A* ۳۲۵ *F* ۱۸۵۲	کاربرد ندارد	۸۰۰	۱۲
	۱۰.۹	*A* ۴۹۰ *F* ۲۲۸۰	کاربرد ندارد	۱۰۰۰	۹
	۱۲.۹	-	کاربرد ندارد	۱۲۰۰	۸

۲ اتصالات پیچی از لحاظ نحوهٔ اجرای پیچ‌ها (سفت کردن آنها) و مقاومت موجود آنها به شرح زیر به سه دستهٔ «اتکایی»، «پیش‌تنیده» و «لغزش بحرانی» تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) اتصالات پیچی اتکایی: اتصالات پیچی اتکایی اتصالاتی هستند که سفت کردن آنها در حد «سفتی کامل» بوده و به لحاظ مقاومت برشی، پیچ‌ها نیروی برشی را از طریق اتکای تنهٔ پیچ (قلم پیچ) به جدارهٔ سوراخ انتقال می‌دهند و از مقاومت لغزشی موجود بین سطوح تماس اتصال صرف‌نظر می‌شود.

ب) اتصالات پیش‌تنیده: اتصالات پیش‌تنیده اتصالاتی هستند که اولاً پیچ‌های آن از جنس فولاد پرمقاومت باشد و ثانیاً به لحاظ مشخصات هندسی قابلیت پیش‌تنیدگی داشته باشند و ثالثاً پیچ‌ها در هنگام سفت کردن پس از حصول حالت سفتی کامل، به روش مناسبی پیش تنیده شوند. روش‌های مناسب پیش‌تنیده کردن یک پیچ شامل روش «سفت کردن اضافی مهره»، استفاده از «واشر نیروسنج»، «آچار مدرج کالیبره شده»، «پیچ‌های کشش کنترل» و استفاده از دیگر ابزارهای ویژه هستند.

نکته: استفاده از این نوع اتصالات علاوه بر مواردی که در این مبحث ذکر شده در شرایط زیر الزامی است:

- در اتصالات اعضای فشاری ساخته شده
- در اتصالاتی که تحت اثر ارتعاش احتمال شُل‌شدگی پیچ‌ها وجود داشته باشد.
- در مواقعی که اتصال تحت اثر نیروهای رفت و برگشتی قابل ملاحظه قرار دارد.
- در مواقعی که اتصال تحت اثر بارهای خستگی‌آور بدون برگشت جهت بار قرار دارد.

- کلیهٔ پیچ‌ها در ردهٔ مقاومتی ۴۹۰ A مطابق استاندارد $ASTM$ و ۱۰.۹ مطابق استانداردهای EN و $ISIRI$ و بالاتر که تحت اثر نیروی کششی همراه با نیروی برشی یا بدون آن و با یا بدون اثر خستگی قرار دارند.

پ) اتصالات لغزش بحرانی: اتصالات لغزش بحرانی اتصالاتی هستندکه در آنها پیچ‌ها مانند پیچ‌های پیش‌تنیده به یکی از روش‌های مجاز سفت می‌شوند؛ لیکن انتقال نیروی برشی در اتصال توسط مقاومت در برابر لغزش بین سطوح در تماس اتصال انجام می‌پذیرد. در اتصالات لغزش بحرانی،سطوح تماس باید دارای وضعیت سطحی کلاس A یا B باشند. در سطوح در تماس این نوع اتصالات نباید لغزش رخ دهد و پیچ به جدارهٔ سوراخ اتکاء نمی‌یابد.

نکته: استفاده از اتصالات لغزش بحرانی علاوه بر مواردی که در سایر بخش‌های این مبحث ذکر شده در شرایط زیر الزامی است:

- در کلیهٔ مواردی که لغزش در اتصال موجب ناپایداری یا کاهش مقاومت موجود سازه می‌شود.
- در مواقعی که اتصال تحت اثر نیروهای دینامیکی با تکرار زیاد توأم با اثر خستگی قرار دارد. مطابق این مبحث، بارهای باد و زلزله در ردیف بارهای دینامیکی با تکرار زیاد قرار نمی‌گیرد.
- در مواردی که در اتصال از سوراخ بزرگ شده یا لوبیایی در امتداد نیرو استفاده شده باشد و استفاده از آنها در این مبحث مجاز شمرده شده باشد.
- در اتصال انتهای ورق‌های پوششی بال‌های تیر

۳ محدودیت‌های اتصالات پیچی به شرح زیر است:

- سوراخ‌های بزرگ شده فقط در اتصالات لغزش بحرانی مجاز است.
- سوراخ لوبیایی کوتاه در تمام امتدادها در اتصالات لغزش بحرانی مجاز است اما در اتصالات اتکایی و پیش تنیده استفاده از آنها زمانی مجاز است که امتداد طولی سوراخ عمود بر امتداد نیرو باشد.
- سوراخ لوبیایی بلند در تمام امتدادها در اتصالات لغزش بحرانی مجاز است اما در اتصالات اتکایی و پیش تنیده استفاده از آنها زمانی مجاز است که امتداد طولی سوراخ عمود بر امتداد نیرو باشد. لیکن در هر سه نوع اتصال، سوراخ لوبیایی بلند باید فقط در یکی از ورق‌های اتصال تعبیه شود.

۴ **حداقل فاصلهٔ سوراخ‌ها تا لبه**

فاصلهٔ مرکز سوراخ‌های استاندارد تا لبهٔ قطعهٔ متصل شونده نباید از مقادیر داده شده در جدول زیر کوچک‌تر باشد. برای سوراخ‌های بزرگ شده و لوبیایی فاصلهٔ مرکز سوراخ تا لبه نباید از آنچه برای سوراخ استاندارد تعیین شده به اضافه مقدار C مطابق جدول (۱۵)، کوچک‌تر باشد.

جدول ۱۴: حداقل فاصلهٔ مرکز سوراخ استاندارد تا لبه در هر راستا

لبهٔ بریده شده با قیچی (گیوتن) (d_b = قطر اسمی پیچ)	لبهٔ نورد شدهٔ ورق نیمرخ، تسمه و نیز لبه بریده شده با شعله اتوماتیک یا اره
$۲\,d_b$	$۱/۵\,d_b$

جدول ۱۵: مقادیر افزایش حداقل فاصله سوراخ تا لبه (C)

سوراخ بزرگ شده (mm)	سوراخ لوبیایی (mm)		
	عمود بر امتداد لبه		موازی با لبه
	لوبیایی کوتاه	لوبیایی بلند	
۳ mm	۵ mm	$۰/۷۵\,d_b$	۰

۵ حداکثر فاصلهٔ مرکز سوراخ تا لبه

حداکثر فاصله مرکز سوراخ تا نزدیک‌ترین لبهٔ قطعه در هر راستا به شرح زیر است:

الف) برای قطعات رنگ شده و قطعاتی که رنگ نمی‌شوند ولی احتمال زنگ‌زدگی و خوردگی ندارد، فاصله از مرکز هر سوراخ تا نزدیک‌ترین لبهٔ قطعه در هر راستا نباید از ۱۲ برابر ضخامت نازک‌ترین قطعه و ۱۵۰ میلی‌متر بیشتر شود.

ب) برای قطعات رنگ نشده‌ای که تحت اثر خوردگی ناشی از عوامل جوی قرار داشته باشند، فاصله از مرکز هر سوراخ تا نزدیک‌ترین لبه قطعهٔ در هر راستا نباید از هشت برابر ضخامت نازک‌ترین قطعه و ۱۲۵ میلی‌متر بیشتر شود.

۶ حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز سوراخ‌ها در اتصالات پیچی

حداکثر فاصلهٔ مرکز تا مرکز سوراخ‌ها در اتصالات پیچی در هر راستا به شرح زیر است:

الف) در قطعات رنگ شده و قطعاتی که رنگ نمی‌شوند ولی احتمال زنگ‌زدگی و خوردگی ندارند، فاصلهٔ بین مرکز سوراخ‌ها نباید از ۲۴ برابر ضخامت نازک‌ترین قطعه متصل شونده و ۳۰۰ میلی‌متر بیشتر شود.

ب) در قطعات رنگ نشده‌ای که تحت اثر خوردگی ناشی از عوامل جوی قرار داشته باشند، فاصلهٔ بین مرکز سوراخ‌ها نباید از ۱۴ برابر ضخامت نازک‌ترین قطعهٔ متصل شونده و ۱۸۰ میلی‌متر بیشتر شود.

۷ تنش اسمی پیچ و میله‌های دندانه شده در طراحی اتصالات پیچی مطابق جدول زیر است:

جدول ۱۶: تنش اسمی پیچ و میله‌های دندانه شده

نوع وسیلهٔ اتصال	تنش کششی اسمی (F_{nt})	تنش برشی اسمی (F_{nv}) در اتصالات اتکایی و پیش‌تنیده
پیچ‌های معمولی در حالتی که سطح برش در داخل یا خارج ناحیهٔ دندانه شده قرار دارد.	۰/۷۵ F_u	۰/۴۵ F_u
پیچ‌های پرمقاومت در حالتی‌که سطح برش در داخل ناحیهٔ دندانه شده قرار دارد	۰/۷۵ F_u	۰/۴۵ F_u
پیچ‌های پرمقاومت در حالتی که سطح برش خارج ناحیهٔ دندانه شده قرار دارد	۰/۷۵ F_u	۰/۵۵ F_u
میلهٔ دندانه شده در حالتی که سطح برش در داخل ناحیهٔ دندانه شده قرار دارد	۰/۷۵ F_u	۰/۴۵ F_u
میلهٔ دندانه شده در حالتی که سطح برش خارج ناحیه دندانه شده قرار دارد.	۰/۷۵ F_u	۰/۵۵ F_u

۸ در اتصالات پیش‌تنیده و لغزش بحرانی با استفاده از پیچ‌های با تنش تسلیم ۹۰۰ مگاپاسکال، در صورتی‌که مصالح فولادی اعضای متصل شونده دارای حد تسلیم کمتر از ۲۸۰ مگاپاسکال باشند، استفاده از واشر سخت تخت در زیر مهره و کلهٔ پیچ الزامی است.

۹ روش تعیین لنگر پیچشی متناظر با نیروی پیش‌تنیدگی

در عمل نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌های پیش‌تنیده، یا مقدار لنگر پیچشی اعمال شده توسط آچارهای مدرج که اصطلاحاً ترک‌متر نامیده می‌شوند، اندازه‌گیری و کنترل می‌شوند. لنگر پیچشی (M_t) متناظر با نیروی پیش‌تنیدگی (T_b) را می‌توان به‌طور تقریبی از رابطهٔ مقابل تعیین نمود:

$$M_t = KT_b d_b$$

که در آن:

T_b : نیروی پیش‌تنیدگی لازم

d_b : قطر اسمی پیچ

K : ضریب مهره (بی بعد). ضریب مهره باید توسط سازنده مطابق استاندارد اندازه‌گیری شده و در گواهینامهٔ پیچ و مهره ارائه شود.

۱۰ چرخش اضافی لازم برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها از جدول زیر به‌دست می‌آید:

جدول ۱۷: چرخش اضافی لازم برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌های کاملاً سفت (d_b قطر اسمی پیچ است)

طول پیچ (L)	دو سطح اتصال عمود بر محور پیچ	یک سطح اتصال عمود بر محور پیچ و سطح دیگر شیب‌دار با شیب کمتر از ۱ : ۲۰	دو سطح اتصال شیب‌دار با شیب کمتر از ۱ : ۲۰ نسبت به محور پیچ
$L \le ۴ d_b$	$\frac{۱}{۳}$ دور	$\frac{۱}{۲}$ دور	$\frac{۲}{۳}$ دور
$۴ d_b < L \le ۸ d_b$	$\frac{۱}{۲}$ دور	$\frac{۲}{۳}$ دور	$\frac{۵}{۶}$ دور
$۸ d_b < L \le ۱۲ d_b$	$\frac{۲}{۳}$ دور	$\frac{۵}{۶}$ دور	۱ دور

۱۱ اصلاح سوراخ‌ها

برای مونتاژ نهایی قطعات، بعد از آنکه قطعات علامت‌گذاری شده بر روی خرک چیده شدند و ورق‌های اتصال بر روی سوراخ‌ها قرار گرفتند، قطعات به وسیلهٔ سنبه‌هایی که از سوراخ‌های اتصال می‌گیرند، در جای خود ثابت می‌شوند. حداکثر عدم انطباق برابر ۱۵ درصد تعداد سوراخ‌های یک اتصال است. در چنین حالتی باید این سوراخ‌ها را با گذراندن یک پیچ امتحانی پیدا کرده، به وسیلهٔ برقوزنی آنها را اصلاح نمود. حداکثر قطر برقوی مصرفی ۳ میلی‌متر بزرگ‌تر از قطر پیچ است و برقوزنی نباید قطر سوراخ را بیش از ۵ میلی‌متر افزایش دهد. استفاده از برش شعله برای گشاد کردن سوراخ‌ها مجاز نیست.

۱۲ اجرای پیچ پر مقاومت

- در اتصال این پیچ، سطوحی که در تماس با سر پیچ و یا مهرهٔ آن قرار می‌گیرند نباید شیبی بیش از یک بیستم نسبت به صفحهٔ عمود بر محور پیچ داشته باشند.
- در صورت عدم تأمین شرط بالا باید با استفاده از واشر شیبدار، موازی نبودن سطوح را جبران کرد.
- قطعاتی که با پیچ پرمقاومت به یکدیگر متصل می‌شوند، باید کاملاً به هم جفت شده باشند و نباید ورق پرکننده یا هر نوع مصالح تغییرشکل‌پذیر دیگری بین آنها گذارده شود، بنابراین استفاده از ورق‌های پرکننده با مقاومت نظیر قطعات اتصال و ضخامت یکنواخت مجاز است.

- برای ایجاد پیش‌تنیدگی از سه روش « سفت کردن مجدد مهره »، « واشرهای کشش‌سنج » و یـا «آچـار مدرج» استفاده می‌شود.
- هنگامی‌که قطعات نصب می‌شوند، باید کلیهٔ سطوح اتصال (شامل سطوح مجاور کلهٔ پیچها و مهـره‌هـا) از قسمت‌های پوسته شده و دیگر مواد زائد عاری باشد، خصوصاً سطوح تماس اصطکاکی باید کاملاً تمیز باشد و اثری از پوستهٔ زنگ، رنگ، لاک، انواع روغن و مصالح دیگر در آنها وجود نداشته باشد.

۱۲-۲- پیش نصب، بستن و محکم کردن پیچهای اتصال لغز ش بحرانی

در صورتی‌که در اسناد پیمان مشخص شده باشد، پیمانکار موظف است تیرها و ستون‌هـای فـولادی را در محـل کارخانه یا پای کار پیش‌نصب نماید. هدف از پیش‌نصب قطعات فولادی حصول اطمینان از دقت ساخت و کیفیت جفت و جور شدن قطعات در هنگام نصب است.

تذکر: به هنگام پیش‌نصب باید حداقل ۲۵ درصد از پیچهای هر اتصال که کمتر از دو پیچ نباشد، بـسته شـوند. پیچهای پیش نصب می‌توانند از نوع پیچهای معمولی انتخاب شوند.

محکم کردن پیچها

- مرحلهٔ اول: تعدادی از پیچها تا حد سفتی کامل محکم می‌شوند، تا اطمینان حاصل شود که سطوح تماس، کامل به هم چسبیده‌اند. سپس تمام پیچها در سوراخ قرار گرفته کاملاً سفت می‌شوند.
- مرحلهٔ دوم: سپس با چرخاندن اضافی مهره‌ها، پیچها پیش‌تنیده می‌شوند.

نکته ۱: توجه داشته باشید که در هر دو مرحلهٔ بالا محکم کردن پیچها باید از قسمتی که اتصال صلب‌تر است و صفحات تغییرشکل کمتری می‌دهند شروع به بستن پیچها کرد.

نکته ۲: در وصله‌ها، قسمت صلب اتصال، وسط ورق اتصال می‌باشد.

نکته ۳: باز کردن و استفاده مجدد از پیچهایی که به حد پیش‌تنیدگی رسیده‌اند، مجاز نیست.

ترتیب بستن پیچها

- محکم کردن پیچهای وسط با حفظ تقارن و ترتیب صورت می‌گیرد.
- پیچهای کناری تا لبهٔ آزاد ورق اتصال محکم می‌شوند.
- سپس می‌توان به پیچهای وسط پرداخت، باید اطمینان حاصل کرد که سفت کردن پیچهای کناری، پیچهای وسط را از حالت کاملاً سفت خارج نکرده باشد.

نکته ٤: در تمام مراحل محکم کردن پیچها باید دقت کرد که از چرخیدن پیچ و مهره با هم جلوگیری کرد.

سفتی کامل پیچ

- به حالتی گفته می‌شود که کارگر ماهر با آچار معمولی بدون آنکه با وزن خود به دسته آچار نیرو وارد کند، با به کارگیری آخرین توان خود نتواند پیچ را از آن محکم‌تر کند.
- برای پیش‌تنیده کردن باید مهرهٔ پیچ را به اندازهٔ مقادیر جدول زیر اضافه چرخاند.
- چرخش اضافه را می‌توان به کمک آچار دسته بلند، یا با آچار معمولی با استفاده از دو کارگر یا به وسیلهٔ آچار بادی تأمین نمود.
- حصول پیش‌تنیدگی باید توسط آچار مدرج (تورک متر) تأیید شود.

در هنگام استفاده از آچار بادی باید نکات زیر را در نظر گرفت:

۱) باید فشار باد را طوری تنظیم کرد که در یک مرحله، مهره‌ها را بدون چرخیدن پیچ تا مرحلهٔ سفتی کامل برساند.

۲) در مرحلهٔ بعد با ازدیاد فشار باد یا با دست (چرخاندن اضافهٔ پیچ‌ها) پیچ‌ها را پیش‌تنیده کرد.

۳) تنظیم باد کمپرسور متضمن استفاده از آچار مدرج (تورک متر) یا آزمون و خطای متوالی است و باید در آن دقت کامل به عمل آید.

۱۲-۳- نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها

مقدار نیروی پیش‌تنیدگی اولیه برای پیچ‌های پرمقاومت ۸.۸، ۱۰.۹، $A325$ و $A490$ را در جدول زیر مشاهده می‌کنید. توجه کنید که برای سایر رده پیچ‌ها می‌توان از تناسب بین تنش کششی نهایی آنها بهره برد.

جدول ۱۸: نیروی پیش‌تنیدگی برای پیچ‌ها

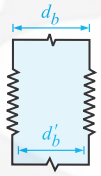
قطر اسمی (mm)	نیروی پیش‌تنیدگی (kN) پیچ $A325$, ۸.۸	نیروی پیش‌تنیدگی (kN) پیچ $A490$, ۱۰.۹
M ۱۶	۹۱	۱۱۴
M ۲۰	۱۴۲	۱۷۹
M ۲۲	۱۷۶	۲۲۱
M ۲۴	۲۰۵	۲۵۷
M ۲۷	۲۶۷	۳۳۴
M ۳۰	۳۲۶	۴۰۸
M ۳۶	۴۷۵	۵۹۵

در مواردی‌که قطر اسمی پیچ غیر از اعداد ذکر شده در جداول بالا باشد، حداقل نیروی پیش‌تنیدگی را می‌توان برابر ۰/۵۵ $A_{nb}F_u$ (که معادل ۰/۷ $A_{eb}F_u$ است) در نظر گرفت که پارامترهای آن عبارتند از:

A_{nb}: سطح مقطع اسمی پیچ $\left(A_{nb}=\frac{\pi d_b^2}{4}\right)$

A_{eb}: سطح مقطع خالص یا سطح مقطع زیر دندانه‌ها $\left(A_{eb}=\frac{\pi d_b'^2}{4}\right)$

F_u: تنش کششی نهایی مصالح پیچ



شکل : سطح مقطع خالص و اسمی پیچ

۱۲-۴- کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌ها

در رابطه با کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌ها نکات زیر حائز اهمیت است:

۱) پیمانکار موظف است کنترل کیفیت دقیقی بر عملیات بستن پیچ و مهره‌ها در کارگاه نصب اعمال داشته، گزارش‌های مربوط به این کنترل‌ها را جهت بررسی و تأیید مهندس ناظر اعلام نماید.

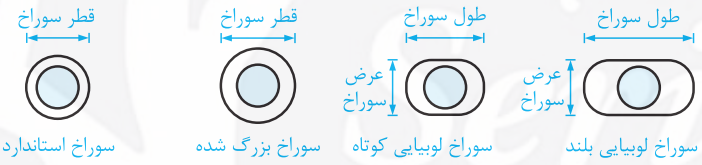
۲) مهندس ناظر می‌تواند رأساً یا از طریق آزمایشگاه با صلاحیت، مستقلاً پیش‌تنیدگی پیچ‌ها را کنترل نماید. در هر صورت تصمیم مهندس ناظر در مورد کفایت پیش‌تنیدگی پیچ‌ها قطعی خواهد بود.

۳ در پیچ‌هایی که به وسیلهٔ چرخاندن اضافی مهره پیش‌تنیده می‌شوند، پس از سفت کردن کامل پیچ‌ها به وسیلهٔ یک گچ رنگی نقطه‌ای از پیچ و مهره را که بر روی هم قرار دارند، علامت‌گذاری کرده و سپس کنترل می‌شود که چرخش اضافی مطابق جدول به میزان کافی انجام شده است.

۴ برای کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌ها باید از آچارمتر (تورک متر) مناسب که قبلاً در یک آزمایشگاه مورد قبول کالیبره شده است، استفاده به عمل آورد.

۱۲-۵- معرفی انواع سوراخ و کاربرد آنها در اتصالات پیچی

انواع سوراخ‌ها در اتصالات پیچی به شکل‌های زیر می‌باشند.



شکل: انواع سوراخ در اتصالات پیچی

توجه داشته باشید که ابعاد حداکثر سوراخ پیچ‌ها باید مطابق جدول زیر باشد.

جدول ۱۹: ابعاد اسمی سوراخ پیچ برحسب میلی‌متر

قطر پیچ (mm)	ابعاد اسمی سوراخ (mm)			
	سوراخ استاندارد	سوراخ بزرگ شده	سوراخ لوبیایی کوتاه (طول × عرض)	سوراخ لوبیایی بلند (طول × عرض)
M ۱۶	۱۸	۲۰	۱۸×۲۲	۱۸×۴۰
M ۲۰	۲۲	۲۴	۲۲×۲۶	۲۲×۵۰
M ۲۲	۲۴	۲۸	۲۴×۳۰	۲۴×۵۵
M ۲۴	۲۷	۳۰	۲۷×۳۲	۲۷×۶۰
M ۲۷	۳۰	۳۵	۳۰×۳۷	۳۰×۶۷
M ۳۰	۳۳	۳۸	۳۳×۴۰	۳۳×۷۵
$\geq M$ ۳۶	$d+3$	$d+8$	$(d+3)\times(d+10)$	$(d+3)\times 2/5d$

$d+2$ | $d+4$ | $d+6$ | $d+3$ | $d+7$

تذکر: در جدول بالا، پارامتر d قطر اسمی پیچ است که همان عدد پس از M می‌باشد.

نمونه سؤالات بحث (۱۲)

تمرین ۷۸: در اتصال با پیچ‌های پرمقاومت، سطوح در تماس با سر پیچ و یا مهره نباید شیبی بیش از ..... نسبت به صفحه عمود بر محور پیچ داشته باشند. در غیر اینصورت می‌توان با استفاده از ..... موازی نبودن سطوح را جبران کرد.

۱) یک بیستم، پیش‌تنیدگی بیشتر
۲) یک بیستم، واشر شیبدار
۳) یک دهم، قطعات فلزی نازک
۴) یک بیستم، جوشکاری دور تا دور صفحات

حل: با توجه به نکات درسنامه مرتبط با پیچ پرمقاومت، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۷۹: در کدام اتصالات، وجود رنگ با هر ترکیب شیمیایی در سطح مجاور سوراخ پیچ، مجاز است؟

۱) لغزش بحرانی با پیچ معمولی
۲) لغزش بحرانی با پیچ پرمقاومت
۳) اتکایی با پیچ پرمقاومت
۴) اتکایی با پیچ معمولی - لغزش بحرانی با پیچ پرمقاومت

● حل: با توجه به آنکه در اتصالات لغزش بحرانی سطح تماس باید کاملاً تمیز باشند و اثری از زنگ، رنگ، لاک و ... در آنها وجود نداشته باشد، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۸۰: تنش حد جاری شدن و تنش حد نهایی پیچ ۶.۸ برحسب مگاپاسکال، به ترتیب از راست به چپ کدام است؟

۱) ۴۸۰ و ۶۰۰ ۲) ۴۰۰ و ۵۲۰ ۳) ۶۰۰ و ۴۸۰ ۴) ۳۲۰ و ۴۲۰

● حل: با توجه به جدول درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۸۱: در کله یک پیچ، علامت ۸.۸ حک شده است. تنش جاری شدن و تنش نهایی مصالح این پیچ به کدام‌یک از مقادیر زیر برحسب مگاپاسکال نزدیک‌تر است؟

۱) ۱۰۰۰-۶۴۰۰ ۲) ۱۰۰۰-۸۰۰ ۳) ۸۰۰-۴۸۰ ۴) ۸۰۰-۶۴۰

● حل: با در نظر گرفتن جدول درسنامه، تنش نهایی این پیچ $800\ MPa$ و تنش جاری شدن آن برابر $640\ MPa$ می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۸۲: مطابق نقشه‌های اجرایی برای اتصال قطعات یک سازه فولادی، پیچ از نوع $A490$ (مطابق $ASTM$) در نظر گرفته شده است. در زمان اجراء پیچ از نوع $A490$ قابل تهیه نیست. کدام‌یک از انواع زیر را می‌توان با همان قطر جایگزین کرد؟

۱) پیچ $A307$ (مطابق $ASTM$) ۲) پیچ $A325$ (مطابق $ASTM$)
۳) پیچ ۸/۸ طبق استاندارد ISO ۴) پیچ ۱۰/۹ طبق استاندارد ISO

● حل: با توجه به جدول درسنامه پیچ $A490$ از پیچ‌های پرمقاومت با تنش کشش نهایی $1000\ MPa$ است. در استاندارد ISO پیچ ۱۰/۹ نیز پرمقاومت با کشش نهایی $1000\ MPa$ است که می‌تواند جایگزینی برای پیچ $A490$ شود، بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۸۳: در صورتی که برای اتصال قطعات فولادی به یکدیگر از پیچ‌های پرمقاومت استفاده شود:

۱) باید بین آن‌ها از واشر فولادی استفاده کرد.
۲) نباید بین آن‌ها از واشرهای پرکننده یا هر نوع مصالح فشارپذیر دیگر استفاده کرد.
۳) حداقل ضخامت قطعات باید ۱۵ میلی‌متر باشد.
۴) حداقل تعداد پیچ‌ها باید ۶ عدد باشد.

● حل: با توجه به مطالب درسنامه، قطعاتی که با پیچ پرمقاومت به یکدیگر متصل می‌شوند، باید کاملاً به هم جفت شده باشند، بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

تمرین ۸۴: کدام مطلب در خصوص بستن و محکم کردن پیچ‌های اتصال لغزش بحرانی درست نمی‌باشد؟

۱) در هر یک از مراحل محکم کردن پیچ‌ها باید از قسمتی که اتصال صلب‌تر است و صفحات تغییر شکل کم‌تری می‌دهند شروع به بستن پیچ‌ها کرد.

۲) استفاده از ورق‌های پرکننده در قطعاتی که با پیچ پرمقاومت به یکدیگر متصل می‌شوند با شرایطی می‌تواند مجاز باشد.

۳) اگر در چرخاندن پیچ‌ها از آچارهای بادی استفاده شود، باید فشار باد را طوری تنظیم کرد که در یک مرحله مهره‌ها را بدون چرخیدن پیچ سفت و پیچ‌ها را پیش تنیده کرد.

۴) در تمام مراحل محکم کردن پیچ باید دقت کرد از چرخیدن پیچ و مهره با هم جلوگیری به عمل آید.

● حل: با توجه به نکاتی که در رابطه با آچار بادی در درسنامه مطرح شد ، پیش‌تنیده کردن با استفاده از این آچار در دو مرحله انجام می‌شود، بنابراین گزینهٔ (۳) نادرست بوده و پاسخ این تمرین است.

تمرین ۸۵: حداقل چه تعداد از پیچ‌های هر اتصال در هنگام پیش‌نصب باید بسته شوند؟

۱) $\frac{۱}{۴}$ پیچ‌های هر اتصال که کمتر از دو پیچ نباشد. ۲) $\frac{۱}{۳}$ پیچ‌های هر اتصال که کمتر از دو پیچ نباشد.

۳) $\frac{۱}{۲}$ پیچ‌های هر اتصال که کمتر از دو پیچ نباشد. ۴) $\frac{۱}{۵}$ پیچ‌های هر اتصال که کمتر از دو پیچ نباشد.

● حل: با توجه به مباحث مطرح شده در قسمت پیش‌نصب، باید حداقل ۲۵ درصد از پیچ‌های هر اتصال که کمتر از ۲ پیچ نباشد بسته شود، بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۸۶: چرخش اضافی لازم مهره برای پیش‌تنیده کردن پیچ پرمقاومت با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر چند دور می‌باشد؟ (دو سطح اتصال برهم عمودند)

۱) $\frac{۲}{۳}$ ۲) $\frac{۱}{۳}$ ۳) $\frac{۱}{۲}$ ۴) $\frac{۱}{۴}$

● حل: با توجه به جدول درسنامه داریم:

$$\begin{cases} L = ۱۵۰\ mm \\ D = ۲۰\ mm \end{cases} \Rightarrow ۴D < L < ۸D \Rightarrow ۴\times ۲۰ < ۱۵۰ < ۸\times ۲۰ \Rightarrow ۸۰ < ۱۵۰ < ۱۶۰$$

بنابراین $\frac{۱}{۲}$ دور چرخش اضافی لازم بوده و گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۸۷: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در رابطه با پیش‌تنیده کردن پیچ‌های اتصال لغزش بحرانی نادرست است؟

۱) در وصله‌ها برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها باید از وسط ورق اتصال شروع به سفت کردن پیچ‌ها کرد.

۲) در صورتی‌که طول پیچ از ۴ برابر قطر پیچ کمتر باشد تعداد دور لازم برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها نصف دور می‌باشد.

۳) چرخش اضافه را می‌توان به کمک آچار دسته بلند، یا با آچار معمولی یا به وسیلهٔ آچار بادی تأمین نمود.

۴) تنظیم باد کمپرسور آچار بادی متضمن استفاده از تورک‌متر یا آزمون و خطای متوالی است و باید در آن دقت کامل به عمل آید.

● حل: با توجه به جدول درسنامه، در صورتی‌که $L \le ۴D$ باشد مقدار $\frac{۱}{۳}$ دور برای پیش‌تنیده کردن لازم می باشد . بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ این تست است. عبارت سایر گزینه‌ها صحیح است .

تمرین ۸۸: در اتصالات لغزش بحرانی، حداقل نیروی پیش‌تنیدگی برای پیچ‌های $M۲۰$ از نوع $A۳۲۵$ به کدام‌یک از مقادیر زیر نزدیک‌تر است؟

۱) $۲۱۰\ kN$ ۲) $۱۷۰\ kN$ ۳) $۱۴۰\ kN$ ۴) $۱۱۰\ kN$

● حل: با توجه به جدول درسنامه ، حداقل نیروی پیش‌تنیدگی پیچ $M۲۰$ از نوع $A۳۲۵$ برابر با $۱۴۲\ kN$ است. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۸۹: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در رابطه با پیچ‌ها صحیح نیست؟

۱) با افزایش قطر اسمی پیچ، مقدار نیروی پیش‌تنیدگی لازم نیز افزایش می‌یابد.
۲) با افزایش قطر اسمی پیچ، مقدار لنگر پیچشی لازم نیز افزایش می‌یابد.
۳) در صورتی‌که نیروی پیچ‌ها بیشتر از مقدار پیش‌تنیدگی شود استفاده مجدد از آنها مجاز است.
۴) محکم کردن پیچ‌ها باید از قسمتی که اتصال صلب‌تر است و صفحات تغییرشکل کمتری می‌دهند شروع شود.

● حل: براساس مطالب درسنامه ، باز کردن و استفاده مجدد از پیچ‌هایی که به حد پیش‌تنیدگی رسیده‌اند مجاز نیست، بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تذکر: با توجه به جدول و رابطه ارائه شده در درسنامه مشاهده می‌شود که با افزایش قطر اسمی پیچ، مقدار نیروی پیش‌تنیدگی و لنگر پیچشی افزایش می‌یابد.

تمرین ۹۰: در کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌های اجرا شده، کدام‌یک از گزینه‌های زیر نادرست است؟

۱) برای کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌ها باید از آچارمتر مناسب که قبلاً در یک آزمایشگاه مورد قبول کالیبره شده، استفاده به عمل آورد.
۲) تصمیم مهندس ناظر در مورد کفایت پیش‌تنیدگی پیچ‌ها قطعی خواهد بود.
۳) مهندس ناظر نمی‌تواند رأساً پیش‌تنیدگی پیچ‌ها را کنترل نماید و باید حتماً از طریق آزمایشگاه با صلاحیت، کار کنترل انجام شود.
۴) با پیچاندن اضافی مهره‌ها ممکن است کشش پیچ از مقادیر حداقل نیروی پیش‌تنیدگی مندرج در مبحث دهم بیشتر شوند که این موضوع مشکلی در کنترل پیش‌تنیدگی پیچ‌ها ایجاد نخواهد کرد.

● حل: با توجه به نکات بیان شده در درسنامه ، مهندس ناظر می‌تواند رأساً پیش‌تنیدگی پیچ‌ها را کنترل نماید، بنابراین گزینه (۳) نادرست بوده و پاسخ این تمرین می‌باشد.

تمرین ۹۱: برای اتصال یک قطعه فولادی از پیچ $M۲۷$ استفاده شده است، حداکثر ابعاد سوراخ استاندارد به کدام‌یک از مقادیر زیر نزدیکتر است؟

۱) ۲۹ میلی‌متر ۲) ۳۲ میلی‌متر ۳) ۳۰ میلی‌متر ۴) ۲۷ میلی‌متر

● حل: با توجه به جدول درسنامه ، ابعاد اسمی سوراخ استاندارد برای پیچ $M۲۷$ مقدار $۳۰\ mm$ است، بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

تمرین ۹۲: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در رابطه با اتصالات پیچی نادرست است؟

۱) دقت در سوراخ‌کاری نقش بسیار مهمی در مقاومت و باربری اتصالات پیچی دارد.

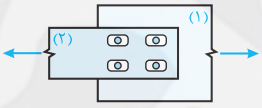
۲) سوراخ لوبیایی بلند در اتصالات لغزش بحرانی در تمام امتدادها مجاز بوده و استفاده از این سوراخ در هر دو ورق اتصال مجاز است.

۳) استفاده از سوراخ‌های بزرگ شده فقط در اتصالات لغزش بحرانی مجاز است.

۴) برای آسان پیچ شدن، حتماً باید قطر سوراخ کمی از قطر پیچ بیشتر باشد.

حل: براساس مطالب درسنامه ، استفاده از سوراخ لوبیایی بلند فقط در یکی از ورق‌های اتصال مجاز است، بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

تمرین ۹۳: کدام‌یک از جملات زیر در رابطه با اتصال نشان داده شده در شکل زیر نادرست است؟



۱) اتصال نشان داده شده برای پیچ‌های اتکایی به‌طور کامل غیرمجاز است.

۲) اگر در اتصال نشان داده شده به جای سوراخ لوبیایی از سوراخ‌های بزرگ شده استفاده شود، باز هم نمی‌توان از اتصال اتکایی استفاده کرد.

۳) اتصال نشان داده شده به شرطی برای اتصالات لغزش بحرانی مجاز است که سوراخ‌های ایجاد شده روی ورق (۱) و ورق (۲) به‌طور همزمان لوبیایی کوتاه یا لوبیایی بلند باشند.

۴) اگر سوراخ‌های ایجاد شده روی ورق (۱) لوبیایی بلند باشند سوراخ‌های روی ورق (۲) لزوماً نباید لوبیایی بلند باشد.

حل: **گزینهٔ ۱ و ۲:** با توجه به اینکه در اتصالات اتکایی، امتداد طولی سوراخ باید عمود بر امتداد نیرو باشد، در این اتصال با هر نوع سوراخی نمی‌توان از اتصال اتکایی استفاده کرد.

گزینهٔ ۳ و ۴: براساس نکات درسنامه، فقط در یکی از ورق‌ها می‌توانیم سوراخ لوبیایی بلند داشته باشیم و استفاده از سوراخ لوبیایی بلند به‌طور همزمان در هر دو ورق مجاز نیست.

بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ این تست است.

تمرین ۹۴: در یک ورق با ضخامت ۲۰ میلی‌متر که لبهٔ آن با اره بریده شده است، سوراخ استاندارد با قطر ۲۲ میلی‌متر ایجاد شده است. حداقل فاصله‌ای که لازم است از مرکز سوراخ تا لبه ورق بر حسب میلی‌متر و در راستای نیرو رعایت شود، چه مقدار می‌باشد؟

۱) ۴۴ ۲) ۳۸/۵ ۳) ۴۰ ۴) ۳۰

حل: با توجه به جدول درسنامه ، قطر اسمی برای سوراخ استاندارد با قطر $22\,mm$، برابر $20\,mm$ است.

قطر پیچ (mm)	ابعاد اسمی سوراخ (mm)	
	سوراخ استاندارد	سوراخ بزرگ شده
$M20$	۲۲	۲۴

بنابراین با توجه به دسته‌بندی انجام شده برای حداقل فاصلهٔ مرکز سوراخ تا لبه، سوراخ استانداردی که با اره بریده شده برابر $1/5d$ است و داریم:

$$1/5d = 1/5 \times 20 = 30\,mm$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۱۳: رنگ‌آمیزی و گالوانیزه کردن

مطابق ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ، برای آنکه قسمت‌های فولادی در مقابل خوردگی محافظت شوند باید سطوح آنها رنگ شوند. مگر در مواردی‌که از سوی دستگاه نظارت تصریح شوند.

تذکر: به جز حالت‌های ویژه‌ای که مشخص شده باشد، کارهای فولادی که در تماس با بتن باید قرار گیرند، لازم نیست رنگ شوند.

۱۳-۱- مواد مورد استفاده

در هنگام آماده کردن مواد باید دو نکتهٔ زیر را در نظر گرفت:

۱) رنگ‌های مورد استفاده برای قسمت‌های فولادی باید از نوع آماده و مناسب با شرایط آب و هوایی منطقه باشند و استفاده از رنگ‌ها پس از مشخص شدن کارخانهٔ تولیدکنندهٔ آنها منوط به تصویب مهندس ناظر می‌باشد.

۲) تمام موارد مورد استفاده جهت آماده‌سازی سطح و رنگ‌آمیزی آن باید مطابقت کامل با استانداردهای معتبر داشته و مورد تصویب مهندس ناظر قرار گیرند. در هر صورت حصول به کیفیت نهایی بر عهدهٔ پیمانکار خواهد بود.

حال برای رنگ‌آمیزی سطوح آماده شده فولادی پس از تمیز کردن باید به موارد زیر توجه کنیم .

۱۳-۲- نکات قبل از شروع عملیات رنگ‌آمیزی

۱) قبل از شروع رنگ‌آمیزی باید تمام سطوح را کاملاً تمیز، خشک و آماده نمود به قسمی‌که برای اعمال رنگ شرایط مناسبی داشته باشند. در هر مورد شروع کار منوط به تأیید مهندس ناظر خواهد بود. به عبارت دیگر قبل از شروع هر قشر رنگ‌آمیزی، نوع رنگ‌آمیزی، نوع رنگ، سیستم رنگ‌آمیزی و قشر قبلی باید توسط مهندس ناظر بازدید و تأیید گردد.

۲) رنگ مصرفی باید کاملاً سطح موردنظر را پوشش داده و برای جلوگیری از سوسماری شدن پوشش، باید رنگ‌های آستر و رویه از یک کارخانه تهیه شوند. رنگ‌آمیزی سطوح بزرگ باید با اسپری بی‌هوا صورت گیرد. تنها برای لکه‌گیری‌ها استفاده از قلم مو مجاز است.

۳) رنگ‌آمیزی باید در محیط مناسب و سر بسته انجام شود.

۴) رنگ‌آمیزی باید در شرایط آب و هوایی منطبق با کاتالوگ معتبر کارخانهٔ سازنده رنگ صورت گیرد.

۵) در شرایط محیطی خشک پیمانکار موظف است عملیات رنگ‌آمیزی را حداکثر تا ۲۴ ساعت پس از تمیز نمودن سطوح انجام دهد، مشروط بر آنکه دمای شرایط نگهداری سطوح با کاتالوگ کارخانهٔ سازنده تطابق داشته و به تصویب دستگاه نظارت رسیده باشد.

۶) نقاشی و رنگ‌کاری نباید در هوای سرد یا تاریک و یا زمانی‌که درصد رطوبت هوا بالا باشد انجام گیرد. در رطوبت بیش از ۸۰ درصد و در حالتی‌که اختلاف دمای محیط و نقطهٔ شبنم کمتر از ۵ درجهٔ سلسیوس باشد، رنگ‌آمیزی ممنوع می‌باشد.

۱۳-۳- نکات حین عملیات رنگ‌آمیزی

۱) در سطوح و لبه‌هایی از سازه فولادی که پس از رنگ‌آمیزی جوش خواهند شد، باید رنگ‌آمیزی در فاصلهٔ ۵۰ میلی‌متری از خط جوش متوقف شود.

۲ تمام نقاطی که رنگ قطع شده و سطح فلز بیرون است باید تمیز شده و مجدداً رنگ‌آمیزی شوند. به طوری‌که سطح کاملاً پوشیده شده و یکپارچگی رنگ با سطوح مجاور رنگ شده تأمین گردد.

۳ سطوح غیرقابل دسترس: به‌جز سطوح تماس بقیه سطوحی که بعد از ساخت، قابل دسترس نخواهند بود باید قبل از جمع کردن کار، تمیز و رنگ‌آمیزی شود (البته در صورتی‌که در مدارک طرح و محاسبه این عمل خواسته شده باشد).

۴ سطوح تماس: در اتصالات اتکایی، رنگ کردن سطوح تماس به‌طور کلی مجاز است. در اتصالات پیش‌تنیده و لغزش بحرانی در صورت نیاز شرایط لازم در سطوح تماس باید طبق مقررات مربوط به این اتصالات رعایت شود.

۵ سطوح صاف و آماده شده: سطوحی که با ماشین کردن آماده می‌شوند باید در مقابل خوردگی محافظت شوند. به این منظور از یک لایه مصالح ضدزنگ که بتوان آن را قبل از نصب به آسانی برطرف کرد یا مصالح مخصوصی که احتیاج به برطرف کردن نداشته باشد، می‌توان استفاده کرد.

۶ سطوح مجاور جوش کارگاهی: به جز حالت‌هایی که در مدارک طرح و محاسبه به‌عنوان شرط خاص قید شده باشد، کلیه سطوحی که در فاصلهٔ ۵۰ میلی‌متری از محل هر جوش کارگاهی قرار می‌گیرند، باید از موادی که به جوشکاری صدمه می‌زند و یا در حین جوشکاری گازهای سمی و مضر تولید می‌کند، کاملاً پاک شود. قبل از جوشکاری باید رنگ کارخانه‌ای از روی سطوحی که جوش انجام می‌گیرد، توسط برس سیمی کاملاً برطرف و پاک گردد.

۱۳-۴- نکات پس از عملیات رنگ‌آمیزی

۱ قطعاتی که تازه رنگ شده‌اند باید از گرد و خاک محافظت شده و سطح رنگ‌آمیزی تا زمان تحویل موقت حفاظت شوند.

۲ در تمام سطوحی که طبله کردن، وجود ترک‌ها و پوسته شدن رنگ و سایر علائم حاکی از این است که چسبندگی رنگ به سطح تأمین نشده است، باید عملیات ترمیم انجام گیرد. بدین ترتیب که رنگ سطوح فوق به‌طور کامل برداشته شود و مجدداً عملیات مربوط به آماده نمودن سطوح و رنگ‌آمیزی صورت گیرد.

۳ اگر در حین اجرای عملیات نصب، رنگِ قطعات صدمه ببیند (به واسطهٔ عملیات جوشکاری، محل، بستن و یا ...) پیمانکار باید سطوح مورد نظر را تمیز نموده، به‌طوری‌که سطوح فولادی ظاهر شوند و سپس براساس مشخصات فنی لایه‌های رنگ متناسب و سازگار با لایهٔ قبلی و مجاور را در فواصل زمانی مناسب جهت پوشش دادن کامل استفاده نماید.

۴ سطوح تمام شدهٔ رنگ‌آمیزی باید دارای مشخصات زیر باشد:

- یکنواختی ظاهری در رنگ
- یکنواخت بودن میزان ماتی و شفافیت رنگ
- عدم ایجاد موج و سایه
- نداشتن چروک و پخش نشدن پوسته رنگ
- انطباق لایه اجرا شده با مشخصات
- ایجاد پوشش کامل و بدون شُره
- عدم چسبندگی سطوح رنگ شده با دست و لباس و تمیز بودن سطوح از گرد و غبار

۱۳-۵- گالوانیزه کردن

در رابطه با گالوانیزه کردن باید نکات زیر را در نظر گرفت:

۱ عملیات گالوانیزه کردن باید با شیوه غوطه‌وری داغ در مخزن روی با خلوص ۹۸ درصد انجام شود.

۲ قبل از عملیات گالوانیزه کردن، سطح فلز باید کاملاً تمیز و عاری از هرگونه آلودگی‌های خارجی گردد.

۳ در مورد قطعات گالوانیزه شده و محل‌هایی که مورد عملیات جوشکاری قرار خواهند گرفت نباید نزدیک‌تر از ۵۰ میلی‌متر به محل جوش گالوانیزه شوند، چنین قسمت‌هایی که گالوانیزه نشده‌اند مطابق آنچه در بخش رنگ‌آمیزی آورده شده است، باید مورد عملیات ترمیم قرار گیرند.

۱۳-۶- انبارداری و ضخامت رنگ

در رابطه با انبارداری و ضخامت رنگ باید نکات زیر را در نظر گرفت:

۱ رنگ‌ها باید در مکانی انبار شوند که دمای محیط حداقل برابر ۱۸ و حداکثر ۳۵ درجه سلسیوس باشد. در این خصوص دستورالعمل‌های کارخانهٔ سازندهٔ رنگ می‌تواند ملاک عمل واقع گردد.

۲ هر لایه رنگ‌آمیزی باید با توجه به میزان تعیین شده توسط سازندهٔ رنگ انجام گیرد. اما ضخامت رنگ خشک شده نباید از حداقل ضخامت رنگ تعیین شده کمتر شود. چنانچه میزان تعیین شده در یک دست رنگ نتواند ضخامت لازم را تأمین کند، رنگ‌آمیزی باید مجدداً تکرار شود تا حداقل ضخامت مورد لزوم به‌دست آید.

۳ در رنگ‌آمیزی قطعات فولادی جدولی برای حداقل ضخامت رنگ در نظر گرفته شده است که در این مورد به بررسی آن می‌پردازیم.

- دقت کنید که یکی از موارد مهم در این جدول شرایط محیطی است، یعنی قبل از بررسی دیگر عوامل باید شرایط محیطی را در نظر بگیرید که عبارتند از:

الف) شرایط ملایم، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی متوسط مساوی یا کمتر از ٪۵۰

ب) شرایط سخت، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی بیش از ٪۵۰ و مساوی یا کمتر از ٪۸۰

پ) شرایط بسیار سخت، شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی متوسط بیش از ٪۸۰

توجه داشته باشید که منظور از رطوبت نسبی متوسط، بیشترین مقدار رطوبت نسبی متوسط ماهانه است.

۴ تمیزکاری با پاشش مواد ساینده شامل دسته‌بندی زیر است:

- Sa ۱ : تمیز کردن با ماسه‌پاشی خفیف
- Sa ۲ : تمیز کردن به‌صورت ماسه‌پاشی متوسط
- Sa ۲/۵ تمیز کردن با ماسه‌پاشی عمیق
- Sa ۳: تمیز کردن با ماسه‌پاشی با حصول سطح نقره‌ای

۵ **تمیزکاری با برس سیمی**

درجات آماده‌سازی سطوح در صورت استفاده از برس سیمی، با برس دستی یا برس‌های دوار برقی یا بادی، به شرح زیر است:

- St ۲ : تمیز کردن با برس سیمی متوسط

سطح فولاد پس از استفاده از برس سیمی، بدون استفاده از ذره‌بین، باید عاری از روغن، چربی، کثیفی، لایهٔ اکسید حاصل از نورد که چسبندگی آن کم است، زنگ پوشش‌های رنگی و مواد خارجی باشد.

- St ۳ : تمیز کردن با برس سیمی عمیق

همانند سطح St ۲ ولی سطح فولاد باید عمیق‌تر و به کمک برس‌های دوار برقی یا بادی، برس زده شود، به‌طوری‌که سطح فلز درخشان شود.

۶ سازنده موظف است عملیات رنگ‌آمیزی را حداکثر تا ۴۸ ساعت برای شرایط ملایم و ۲۴ ساعت برای سایر شرایط بعد از تمیزکاری سطوح انجام دهد.

- دومین مورد مهم در جدول شرایط سطح فولاد است که طبق جدول (۲۰) تعیین می‌شود.

جدول ۲۰: حداقل ضخامت رنگ‌آمیزی قطعات فولادی در شرایط محیطی مختلف

شرایط محیطی	آماده‌سازی سطح فولاد	نوع و ضخامت رنگ		
		قطعهٔ فولادی در داخل دیوار و نازک کاری	قطعهٔ فولادی به‌صورت روباز لیکن درون محیط بسته	قطعهٔ فولادی در معرض شرایط جوی
ملایم	$Sa2$	۴۰ میکرون ضد زنگ الکیدی	۴۰ میکرون ضد زنگ الکیدی ۴۰ میکرون رویه الکیدی	۴۰ میکرون ضد زنگ الکیدی ۴۰ میکرون لایه میانی الکیدی ۴۰ میکرون رویه الکیدی
سخت	$Sa2/5$	۴۰ میکرون آستر اپوکسی غنی از روی	۴۰ میکرون آستر اپوکسی غنی از روی ۴۰ میکرون لایه میانی اپوکسی MIO ۴۰ میکرون رویه اپوکسی	۶۰ میکرون آستر اپوکسی غنی از روی ۶۰ میکرون آستر میانی اپوکسی MIO ۶۰ میکرون رویه اپوکسی پلی‌یورتان
بسیار سخت و ساحلی	$Sa3$	۴۰ میکرون آستر اپوکسی غنی از روی ۴۰ میکرون رویه اپوکسی MIO	۶۰ میکرون آستر اپوکسی غنی از روی ۶۰ میکرون لایه میانی اپوکسی MIO ۶۰ میکرون رویه اپوکسی پلی‌یورتان	مانند ناحیه جزر و مدی که نیاز به مطالعه خاص دارد حداقل سه لایه اپوکسی با ضخامت کل ۴۰۰ میکرون

نکته ۱: فرض کنید در شرایط محیطی سخت هستیم و سطح فولاد $Sa2/5$ می‌باشد، برای قطعهٔ فولادی به‌صورت روباز و در یک محیط بسته با توجه به جدول بالا سه لایه برای این شرایط ذکر شده است. مهندسان عزیز توجه داشته باشید که باید هر سه لایهٔ رنگ بر روی سطح فولاد اعمال شود و ضخامت لایهٔ رنگ نهایی ۱۲۰ میکرون و یا ۰/۱۲ میلی‌متر می‌باشد.

نکته ۲: در صورتی‌که دستورالعمل رنگ‌آمیزی توسط کارشناس ذیصلاح تهیه شود، می‌توان از شرایط جدول فوق عدول نمود.

نمونه سؤالات بحث (۱۲)

تمرین ۹۵: در شرایط محیطی خشک، پس از حداکثر چه مدت زمانی بعد از تمیزکردن سطوح، می‌توان عملیات رنگ‌آمیزی را انجام داد؟

۱) ۴ روز ۲) ۳ روز ۳) ۲ روز ۴) ۱ روز

حل: براساس مطالب درسنامه ، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۹۶: در چه فاصله‌ای از محل هر جوش کارگاهی، باید از مواردی که به جوشکاری صدمه می‌زند و یا در حین جوشکاری گازهای سمی تولید می‌کند، کاملاً پاک شود؟

۱) $40\ mm$ ۲) $50\ mm$ ۳) $80\ mm$ ۴) $100\ mm$

حل: براساس مطالب درسنامه ، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۹۷: **در صورتی‌که دستورالعمل رنگ‌آمیزی توسط کارشناس ذیصلاح تهیه نشده باشد، کدام‌یک از وضعیت‌های سطحی زیر برای آماده‌سازی سطح فولاد قبل از رنگ‌آمیزی، برای قطعات فولادی یک ساختمان که در شرایط آب و هوایی با رطوبت نسبی حدودا ٪۷۵ اجرا خواهد شد، به‌عنوان حداقل وضعیت سطحی آماده‌سازی سطح فولاد به شمار می‌رود؟**

۱) $Sa۳$ ۲) $Sa۲/۵$ ۳) $Sa۲$ ۴) $Sa۱$

حل: با توجه به جدول درسنامه میزان رطوبت ٪۷۵ جزء شرایط سخت است، بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۹۸: **کدام‌یک از موارد زیر در مورد ضوابط رنگ‌آمیزی قطعات فولادی صحیح نیست؟**

۱) در صورتی‌که رطوبت نسبی متوسط در محیط ساخت ٪۹۰ باشد، حداقل سه لایهٔ اپوکسی با مجموع ضخامت ۴۰۰ میکرون برای قطعات در معرض شرایط جوی باید به‌کار رود.

۲) برای قطعه‌ای که در شرایط محیطی سخت است، در صورتی که دستورالعمل رنگ‌آمیزی توسط کارشناس ذیصلاح تهیه شود ممکن است بتوان آماده‌سازی سطح فولاد را با درجهٔ $Sa۲$ انجام داد.

۳) در تمام درجات مختلف آماده‌سازی سطوح فولادی لازم است لایه‌های ضخیم زنگ از روی سطح فولاد برداشته شده باشد.

۴) رنگ‌ها باید در مکانی انبار شوند که دمای محیط حداقل برابر ۱۸ و حداکثر ۳۲ درجه سلسیوس باشد.

حل: براساس مطالب درسنامه، رنگ‌ها باید در مکانی انبار شوند که دمای محیط حداقل برابر ۱۸ و حداکثر ۳۵ درجه سلسیوس باشد. بنابراین عبارت گزینهٔ (۴) نادرست بوده و پاسخ این تست است.

تمرین بیشتر

مهندس عزیز: پس از مطالعه این فصل، جهت بررسی سؤالات مرتبط با آن در آزمون‌های سال‌های ۸۸ به بعد به جدول انتهای کتاب مراجعه نمایید در این جدول شمارهٔ سؤالات مرتبط با این فصل در آزمون‌های مختلف مشخص شده است. جهت تمرین و تسلط بیشتر و آشنایی با سبک و سیاق طرح سؤالات در سال‌های اخیر به بررسی سؤالات بپردازید.

Serie
Omran
سری عمران

سری عمران

فصل ششم:

اصول و مبانی طراحی و اجرای جوش

این فصل را می‌توان مکمل فصل سازه‌های فولادی دانست. در این فصل مهمترین مفاهیم و مباحث مرتبط با جوش به‌صورت کاربردی بیان شده است. مطالب این فصل از مبحث دهم مقررات ملّی ساختمان، راهنمای جوش و اتصالات جوشی و سایر کتب مرجع جمع‌آوری و تدوین شده است. شما می‌توانید با مطالعه مباحث این فصل و حل سؤالات آن، به مفاهیم جوش مسلط شده و در آزمون، به سؤالات مرتبط با آن پاسخ دهید. در جدول زیر توزیع سؤالات از مباحث مختلف این فصل در آزمون‌های قوه قضائیه و دادگستری از سال ۸۸ تاکنون آورده شده است.

عنوان مجموعه مباحث	شمارهٔ بحث‌ها	تعداد سؤالات مطرح شده در آزمون‌های کارشناسی رسمی	
		قوهٔ قضائیه	دادگستری
مفاهیم و انواع جوش (گوشه، شیاری، کام و...)	۱-۴	۳	۴
الکترود، نام‌گذاری و وضعیت جوش	۵	۲	۲
عیوب و رواداری جوش	۶	۱	۳
ساخت و نصب، الزامات جوشکاری و آزمایشات جوش	۷	۴	۵
تحلیل، طراحی و تنش‌های وارد بر جوش	۸	۳	۳

موضوع جوش و جوشکاری در سازه‌های فولادی به عنوان یک رکن اساسی همواره مورد توجه بوده و با توجه به ثابت بودن جنس مصالح در ساختمان‌های فولادی، اهمیت اجرای صحیح جوش در عملکرد سازه‌های فولادی در برابر بارهای ثقلی و جانبی بسیار حائز اهمیت است. در این فصل در قالب بحث‌های مختلف به بررسی مهم‌ترین ضوابط و مفاهیم مرتبط با جوش و جوشکاری می‌پردازیم.

بحث ۱: مفاهیم اولیهٔ جوش

به اتصال و یکپارچه کردن قطعات فلزی و فولادی به کمک حرارت، فشار و یا ترکیبی از هر دو، جوشکاری گفته می‌شود، که در این بحث به نکات مهم آن خواهیم پرداخت.

۱-۱- انواع جوش

با توجه به کاربرد، نیروهای وارد بر جوش و شرایط مختلف از انواع مختلف جوش استفاده می‌شود.

الف) جوش شیاری — ب) جوش گوشه — پ) جوش کام — ت) جوش انگشتانه

تذکر: در رابطه با کاربرد جوش گوشه و شیاری به موارد زیر دقت کنید:

جوش گوشه

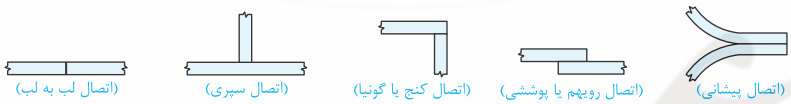
- باید طوری آرایش داده شود که تحت تنش برشی قرار گیرد و تا حد امکان نباید تحت تنش قائم قرار گیرد.
- بیشترین کاربرد را در ساختمان دارد. مانند اغلب اتصالات شامل اتصالات نبشی‌ها، مهاربندها و ورق‌های مهاربندی شده.

جوش شیاری

- برای یکسره کردن ورق‌ها و برای ساخت تیرورق‌ها و ستون‌های ورقی کاربرد دارد.
- در اتصال صلب تیر به ستون برای اتصال ورق‌های زیرسری و روسری به ستون استفاده می‌شود.
- در مواقعی که جوش تحت تنش قائم قرار دارد، بهترین نوع جوش می‌باشد (جوش تمام قدرت).

۱-۲- انواع اتصال

منظور از نوع اتصال، نحوهٔ قرار گرفتن قطعات و ورق‌ها در کنار یکدیگر برای جوشکاری است.



(اتصال پیشانی) (اتصال رویهم یا پوششی) (اتصال کنج یا گونیا) (اتصال سپری) (اتصال لب به لب)

انواع اتصال ورق‌ها جهت جوشکاری

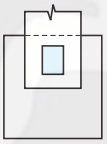
۱-۳- انواع درز

برای آنکه جوش شیاری در درز بین دو قطعه رسوب کند، برحسب ضخامت و سهولت کار، باید به لبهٔ ورق هندسه خاصی داده شود که این عمل را آماده‌سازی می‌گویند. برحسب نوع هندسه انواع درز به‌صورت زیر می‌باشد.

انواع درز

نمونه سؤالات بحث (۱)

تمرین ۱: جوش نشان داده شده چه نام دارد؟ (قوه قضائیه - ۸۶)



۱) جوش شیاری ۲) جوش گوشه ۳) جوش انگشتانه ۴) جوش کام

حل: براساس نکات درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲: در اتصال لب به لب، دو ورق با ضخامت یکسان از چه نوع جوشی استفاده نمی‌شود؟

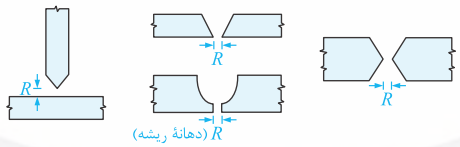
۱) گوشه ۲) شیاری با درز ساده ۳) شیاری با درز لاله‌ای ۴) شیاری با درز جناغی

حل: براساس مطالب درسنامه، جوش گوشه متداول‌ترین جوش در ساختمان‌های فولادی است. از این جوش می‌توان در اتصال رویهم، اتصال سپری و اتصال گونیا استفاده کرد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بحث ۲: جوش شیاری (نفوذی)

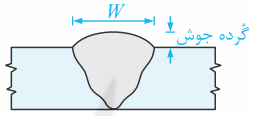
قبل از شروع بحث به مفهوم چند اصطلاح مهم در جوش شیاری توجه کنید.

۱) **دهانه یا بازشدگی ریشه (R)**: در شکل‌های زیر دهانهٔ ریشه (R) که همان فاصلهٔ بین دو لبه در محل ریشه درز می‌باشد، نشان داده شده است و برای آنکه الکترود بتواند به ریشه جوش برسد به کار گرفته می‌شود.



۲) **تسمه‌های پشت‌بند:** زمانی‌که جوشکاری از یک طرف باشد و فاصله لبه‌ها نیز زیاد باشد، از تسمه‌های پشت‌بند استفاده می‌شود. دقت کنید که جنس این تسمه‌ها باید با مصالح اصلی سازگار باشد که برای تثبیت آنها قبل از انجام عمل جوشکاری از خال جوش‌های متناوب استفاده می‌شود.

۳) **گُرده جوش:** در درزهای لب به لب نیاز به یک تحدب نسبی (تقریباً ۱/۵ میلی‌متر بالای سطح تراز) لازم است که به این تحدب گُرده جوش گفته می‌شود.



۴ **ضخامت ریشه:** برای آنکه از سوختن ریشه جوش و همچنین از ریزش جوش جلوگیری شود، به جای اینکه لبهٔ جوش در محل ریشه به‌صورت تیز باشد، ضخامتی برای آن قائل می‌شوند که آن را ضخامت ریشه یا پیشانی می‌نامند.

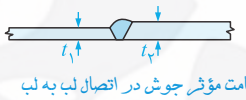
۵ **سنگ زدن ریشه از پشت:** برای دستیابی به ذوب و امتزاج کامل در تمام مقطع جوش و در نتیجه یک جوش صد در صد (جوش تمام قدرت)، لازم است در تمام انواع درزهای جوش شیاری، طرف دوم یا پشت کار نیز جوش شود (جوش پشت یا *Back Weld*). بنابراین قبل از جوش پشت کار لازم است ریشه جوش برداشته شود که این کار به وسیله الکترود گوج یا سنگ زدن صورت می‌گیرد.

۲-۱- مشخصات جوش شیاری

در مورد مشخصات جوش شیاری می‌توان به موارد زیر از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان اشاره کرد:

۱ ضخامت مؤثر جوش شیاری با نفوذ کامل (t_e) در دو حالت زیر تعیین می‌گردد:

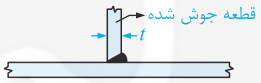
- در صورتی‌که اتصال لب به لب باشد برابر است با ضخامت قطعهٔ نازک‌تر



ضخامت مؤثر جوش در اتصال لب به لب

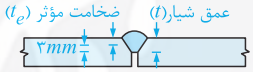
ضخامت مؤثر جوش : $t_e = min(t_1, t_2)$

- در صورتی‌که در اتصال کنج و سپری به کار رود برابر است با ضخامت قطعهٔ جوش شده



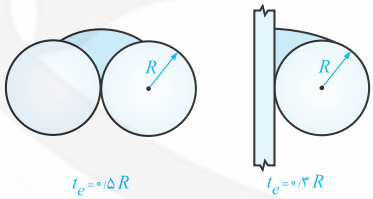
ضخامت مؤثر جوش : $t_e = t$

۲ ضخامت مؤثر جوش شیاری با نفوذ نسبی برابر است با عمق شیار جوش منهای ۳ میلی‌متر



ضخامت مؤثر جوش = عمق شیار − ۳ mm $\Rightarrow t_e = t - 3\ mm$

نکته: ضخامت مؤثر جوش شیاری که بین دو لبهٔ گرد (مثل شیار بین دو میلگرد) و یا بین یک لبهٔ گرد و لبهٔ تخت (مثل میلگرد در مجاورت ورق) داده می‌شود، مطابق شکل مقابل می‌باشد.



۳ طول مؤثر جوش شیاری (L_e) برابر با طول جوش شده می‌باشد.

۴ سطح مقطع جوش شیاری (A_e) برابر است با:

سطح مقطع مؤثر جوش شیاری = طول مؤثر جوش شیاری × ضخامت مؤثر جوش شیاری $\Rightarrow A_e = L_e t_e$

۲-۲- محدودیت‌های جوش شیاری

۱ حداکثر ضخامت، نباید از ضخامت نازک‌ترین قطعهٔ متصل‌شونده تجاوز کند.

۲ حداقل ضخامت مؤثر با توجه به ضخامت قطعهٔ نازک‌تر تعیین می‌شود.

۳ ضخامت مؤثر در جوش‌های شیاری با نفوذ نسبی نباید از مقدار موردنیاز محاسباتی و همچنین از مقادیر مندرج در جدول شمارهٔ (۱) کوچک‌تر باشد. حداقل ضخامت مؤثر با توجه به ضخامت قطعهٔ نازک‌تر تعیین می‌شود. در اتصال لب‌به‌لب قطعات، ضخامت جوش نباید از ضخامت نازک‌ترین قطعهٔ متصل شونده بزرگ‌تر باشد.

جدول ۱: حداقل ضخامت مؤثر جوش شیاری با نفوذ نسبی با یک بار عبور

ضخامت قطعهٔ نازک‌تر	حداقل ضخامت مؤثر (با یک بار عبور)
تا ۶ میلی‌متر	۳ میلی‌متر
بیش از ۶ تا ۱۲ میلی‌متر	۵ میلی‌متر
بیش از ۱۲ تا ۲۰ میلی‌متر	۶ میلی‌متر
بیش از ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر	۸ میلی‌متر

۴ در صورتی‌که نتوان ضخامت‌های حداقل فوق را با یک عبور الکترود (یک پاس جوش) تأمین نمود باید از پیش‌گرمایش و یا فرآیندهای کم هیدروژن استفاده کرد.

۵ برای قطعات با ضخامت بزرگتر از ۴۰ میلی‌متر، پیش‌گرمایش و دستورالعمل جوشکاری باید با مطالعهٔ خاص مورد بررسی قرار گیرد.

۶ استفاده از جوش شیاری با نفوذ نسبی در وضعیت بارگذاری متناوب (اثر خستگی)، مجاز نیست.

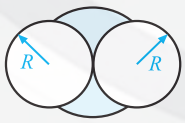
نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۳: کدام‌یک از گزینه‌های زیر بر کاربرد الکترود گوج دلالت دارد؟

۱) جوشکاری فولادهای ضد زنگ
۲) مضرّس کردن درز جوش
۳) برداشتن ریشه جوش از پشت کار
۴) جوشکاری آلومینیوم

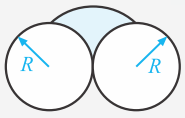
حل: براساس مطالب درسنامه، قبل از جوش پشت کار باید ریشه جوش برداشته شود، این کار به وسیلهٔ الکترود گوج یا سنگ زدن صورت می‌گیرد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۴: در اتصال دو میلگرد از طریق جوش (شکل زیر)، حداکثر ضخامت مؤثر کل جوش به کدام‌یک از مقادیر زیر نزدیک‌تر است؟ (میلگردها جوش‌پذیر فرض می‌شود.)



۱) برابر R
۲) برابر $0/6R$
۳) برابر $0/5R$
۴) برابر $0/3R$

حل: براساس مطالب درسنامه، ضخامت مؤثر جوش شیاری که بین دو لبه گرد (مثل شیار بین دو میلگرد) داده می‌شود مطابق شکل مقابل است:



بنابراین برای دو طرف، مقدار t_e برابر است با:

$$t_e = 2\times 0/5R = R \qquad t_e = 0/5R$$

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۵: تسمه‌های پشت‌بند عموماً برای چه منظوری مورد استفاده قرار می‌گیرد؟

۱) برای حذف گرده جوش
۲) برای کاهش دهانه ریشه و افزایش ضخامت ریشه
۳) برای کاهش دهانه ریشه و افزایش زاویه پخ
۴) برای افزایش دهانه ریشه و کاهش زاویه پخ

● حل: وقتی زاویه پخی لبه کم می‌شود، دهانه ریشه باید افزایش یابد. وقتی که دهانه ریشه زیاد می‌گردد، باید از تسمه پشت‌بند استفاده شود. آماده کردن لبه‌ها برای جوشکاری و دهانه ریشه هر دو تأثیر مستقیم بر هزینه جوشکاری (میزان مصرف مصالح) دارند. بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

تمرین ۶: در جوش‌های شیاری با نفوذ کامل، ضخامت ریشه برای چه منظوری ایجاد می‌شود؟

۱) برای دسترسی الکترود به ریشه جوش
۲) برای جلوگیری از ریزش جوش و سوختگی ریشه جوش
۳) برای نفوذ بیشتر جوش
۴) برای کاهش هزینه‌های آماده‌سازی لبه

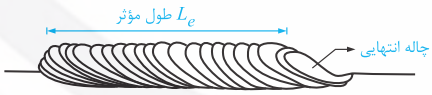
● حل: با توجه به مفاهیم درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

بحث ۳: جوش گوشه

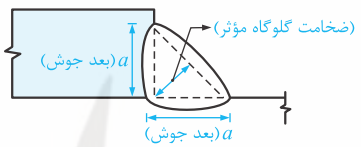
همان‌طور که اشاره شد، جوش گوشه یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین جوش‌ها در اجرای ساختمان است و مهم‌ترین کاربرد آن در اتصال نبشی نشیمن اتصال ساده، اعضای بادبندی و جوش ورق‌های تقویتی می‌باشد.

۳-۱- مشخصات جوش گوشه

۱) **طول مؤثر جوش گوشه (L_e)**: طول مؤثر جوش گوشه برای جوش‌هایی که در سوراخ و شکاف قرار نمی‌گیرند، برابر است با طول کلی نوار جوش شامل قسمت‌های برگشت خورده و برای جوش‌هایی که در سوراخ و شکاف قرار می‌گیرند، برابر با طول محوری (میانتاری) که از مقطع گلوگاه جوش می‌گذرد، است.

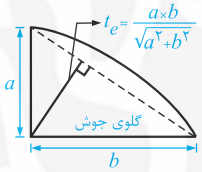


۲) **ضخامت گلوگاه مؤثر جوش گوشه (t_e)**: به کوتاهترین فاصله بین ریشهٔ مقطع جوش تا سطح خارجی آن گفته می‌شود. به عبارت دیگر برابر ارتفاع وارد بر وتر مثلث مقطع جوش است. در مورد جوش گوشه با ساق مساوی داریم:



$$t_e = \frac{a}{\sqrt{۲}} = ۰/۷۰۷\,a$$

تذکر: جوش‌های با ساق نامساوی زمانی به کار می‌رود که هدف، افزایش سطح گلوی جوش باشد و امکان اینکه اندازهٔ هر دو ساق زیاد شود، نباشد. بنابراین مجبوریم فقط اندازهٔ یکی از دو ساق را افزایش دهیم. دقت شود که اگر امکان افزایش اندازهٔ هر دو ساق باشد، باید از به کار بردن ساق‌های نامساوی پرهیز کرد، چرا که این عمل، غیراقتصادی می‌باشد.



$$t_e=\frac{a\times b}{\sqrt{a^2+b^2}}$$

۳ **بُعد جوش یا ساق جوش (a):** بُعد جوش گوشه (a) برابر با اندازه ساق مقطع جوش و یا یکی از قاعده‌های مثلث جوش می‌باشد. مهم‌ترین مشخصهٔ جوش که در نقشه‌های اجرایی درج می‌شود همین بُعد جوش است.

۴ **سطح مقطع مؤثر جوش گوشه (A_e):** سطح مقطع مؤثر جوش گوشه برابر است با:

سطح مقطع مؤثر جوش گوشه = ضخامت گلوگاه مؤثر جوش گوشه × طول مؤثر جوش گوشه $\Rightarrow A_e = L_e\, t_e$

۳-۲- محدودیت‌های جوش گوشه

حداقل بُعد جوش گوشه

- نباید از بُعد مورد نیاز برای انتقال بارهای محاسبه شده و اندازه‌های نشان داده شده در جدول زیر کوچکتر باشد.
- حداقل بُعد جوش تابع ضخامت قطعه نازک‌تر می‌باشد.
- نباید بُعد جوش از ضخامت نازکترین قطعهٔ متصل شونده تجاوز کند.
- در صورتی‌که نتوان ضخامت‌های حداقل جدول زیر را با یکبار عبور تأمین نمود، باید از پیش‌گرمایش یا فرآیندهای کم هیدروژن استفاده کرد.
- در سازهٔ تحت بار دینامیکی (به غیر از بارهای باد و زلزله) حداقل اندازهٔ جوش ۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲: حداقل بُعد جوش گوشه

ضخامت قطعهٔ نازک‌تر (t_{min})	حداقل بُعد جوش گوشه (با یک بار عبور)
تا ۶ میلی‌متر ($t_{min} \le 6\,mm$)	۳ میلی‌متر
بیش از ۶ تا ۱۲ میلی‌متر ($6\,mm < t_{min} \le 12\,mm$)	۵ میلی‌متر
بیش از ۱۲ تا ۲۰ میلی‌متر ($12\,mm < t_{min} \le 20\,mm$)	۶ میلی‌متر
بیش از ۲۰ میلی‌متر ($t_{min} > 20\,mm$)	۸ میلی‌متر

حداکثر بُعد جوش گوشه

مطابق جدول زیر می‌باشد:

جدول ۳: حداکثر بُعد جوش گوشه

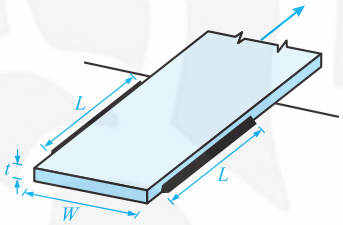
ضخامت قطعهٔ نازک‌تر (t_{min})	حداکثر بُعد جوش گوشه
ضخامت مساوی یا کمتر از ۶ mm ($t_{min} \le 6\,mm$)	ضخامت قطعه
ضخامت بیشتر از ۶ mm ($t_{min} > 6\,mm$)	ضخامت قطعه − ۲ mm

نکته: توجه داشته باشید که طول مؤثر جوش‌های گوشه‌ای که برای تحمل تنش‌ها محاسبه شده‌اند نباید از ۴ برابر بُعد جوش کمتر باشد. به عبارت دیگر، بُعد جوش نباید از $\frac{۱}{۴}$ طول آن تجاوز کند. بنابراین داریم:

برای جوش‌های گوشه : $a_e \le \frac{۱}{۴} L_e$ یا $L_e \ge ۴a_e$

۳-۳- جوش گوشه در لبه‌های طولی

در اتصال انتهای تسمه‌های کششی اگر از جوش گوشه فقط در لبه‌های طولی و موازی امتداد نیرو استفاده شود، طول جوش هر طرف نباید از فاصلهٔ عمودی بین آنها (تقریباً پهنای تسمه) کمتر باشد و این فاصله نباید از $۲۰۰\,mm$ تجاوز کند.



جوش گوشه در انتهای تسمه‌های کششی

مقدار حداکثر ← $W \le ۲۰۰\,mm$ ← پهنای تسمه

حداقل طول جوش ← $L \ge W$

۳-۴- ضوابط تکمیلی جوش گوشه

۱ در اتصالات پوششی رویهم، طول همپوشانی نباید از ۵ برابر ضخامت قطعهٔ نازک‌تر کمتر باشد و در هیچ حالتی از ۲۵ میلی‌متر کمتر نشود.

۲ در اتصالات مفصلی با نبشی‌های جان، که انعطاف‌پذیری اتصال به مقدار زیادی تابع انعطاف‌پذیری بال برجسته نبشی‌ها می‌باشد، برگشت در انتهای جوش گوشه (قلاب) نباید ۲ برابر بُعد جوش کمتر و از ۴ برابر بُعد جوش و نیز نصف پهنای بال نبشی بیشتر باشد.

۳ طول مؤثر جوش‌های گوشه و جوش منقطع:

الف) این جوش هنگامی مجاز است که نیروی انتقال یافته توسط جوش از مقاومتی که با جوش پیوسته (سرتاسری) و با حداقل بُعد جوش تأمین می‌شود، کمتر باشد.

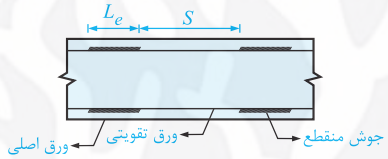
ب) استفاده از این جوش در موارد زیر مجاز است:

- اتصال جان و بال تیر ورق‌ها
- اتصال ورق‌های تقویتی بال
- اتصال قطعات سخت‌کننده به جان تیرورق‌ها
- اتصال اجزای اعضای ساخته شده از ورق

استفاده از جوش‌های گوشهٔ منقطع برای انتقال نیروها در اتصال جان به بال تیرهای ساخته شده از ورق (تیرورق‌ها)، اتصال ورق‌های تقویتی بال، اتصال قطعات سخت‌کننده به جان تیرورق و برای اتصال اجزای اعضای ساخته شده از ورق مجاز است. طول مؤثر قطعات جوش منقطع نباید از ۴ برابر بعد جوش و از ۴۰ میلی‌متر کمتر باشد. فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع نباید از مقادیر زیر بیشتر شود:

- در قطعات رنگ شده و قطعاتی که رنگ نمی‌شوند ولی احتمال زنگ‌زدگی و خوردگی ندارند، ۲۴ برابر ضخامت نازک‌ترین ورق یا ۳۰۰ میلی‌متر

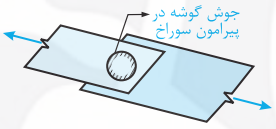
در قطعات رنگ نشده که تحت اثر زنگ‌زدگی و خوردگی (حاصل از عوامل جوی) قرار گیرند، ۱۴ برابر ضخامت نازک‌ترین ورق یا ۱۸۰ میلی‌متر



فاصلهٔ آزاد بین قطعات جوش

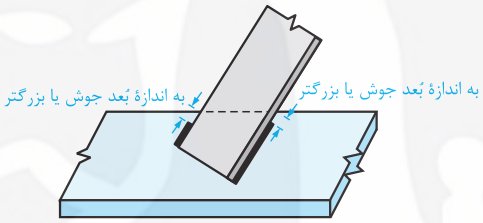
تذکر: منظور از t_{min} حداقل ضخامت بین دو قطعهٔ جوش شده است.

۴) استفاده از جوش گوشه در لبهٔ سوراخ و شکاف در اتصالات روی هم، به منظور انتقال برش یا جلوگیری از کمانش و یا جدایی قسمت‌های متصل شونده مجاز می‌باشد. جوش‌های گوشه در سوراخ‌ها و شکاف‌ها را نباید به عنوان جوش کام یا انگشتانه در نظر گرفت.



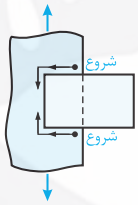
اتصال روی هم با جوش گوشه در شکاف

۵) در اتصالات پوششی (رویهم) که یکی از قطعه‌های اتصالی تا پشت لبهٔ قطعهٔ اتصالی دیگر که تحت اثر تنش کششی قرار دارد امتداد یافته باشد، جوش گوشه باید در فاصله‌ای بیشتر یا مساوی با بُعد جوش تمام شود.



جوش گوشه در انتهای اعضای محوری

۶) در اتصالات پوششی (رویهم) برای جلوگیری از زخم در لبه، انتخاب محل شروع و پایان مسیر جوشکاری باید مورد توجه قرار گیرد، به شکل مقابل توجه کنید:



مسیر مناسب برای جلوگیری از زخم در لبه

نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۷: در اتصال ساده تیر به ستون با استفاده دو نبشی در بالا و پایین تیر لازم است که: (قوهٔ قضائیه - ۸۴)

۱) نبشی بالا و پایین را دور تا دور جوش داد.
۲) فقط لبه‌های قائم نبشی بالا را به ستون جوش داد، ولی اتصال نبشی بالا به تیر با جوش کامل صورت گیرد.
۳) فقط لبه‌های قائم نبشی پایین را به ستون جوش داد و سایر قسمت‌های اتصال دلخواه است.
۴) فقط دو لبهٔ افقی بال‌های نبشی بالا را به تیر و ستون جوش داد و از جوش سایر لبه‌های بال‌های نبشی بالا خودداری کرد.

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۸: طول مؤثر جوش گوشه منقطع چقدر باید باشد؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) ۱۶ برابر ضخامت ورق نازک‌تر

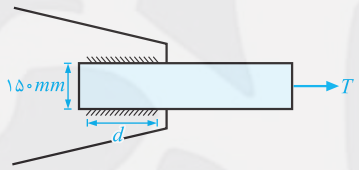
۲) سه برابر فاصله بین جوش‌ها

۳) چهار برابر اندازهٔ جوش یا ۴۰ میلی‌متر (هرکدام که بیشتر باشد)

۴) فاصله بین جوش‌ها

حل: با توجه به نکات درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۹: یک تسمه کششی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر مطابق شکل به یک صفحه اتصال به ضخامت ۲۵ mm جوش شده است. ضخامت جوش گوشه ۶ میلی‌متر است.
حداقل طول جوش (d) برحسب میلی‌متر چه مقدار می‌باشد؟



۱) ۱۰۰ ۲) ۲۰۰

۳) ۱۵۰ ۴) ۳۰۰

حل: براساس مطالب درسنامه، در اتصال‌های انتهای تسمه‌های کششی اگر از جوش گوشه فقط در لبه‌های طولی و موازی امتداد نیرو استفاده شود، طول جوش هر طرف نباید از فاصلهٔ عمودی بین آنها (تقریباً پهنای تسمه) کمتر باشد و این فاصله نباید از ۲۰۰ میلی‌متر تجاوز کند. یعنی برای این سؤال داریم:

$$\underbrace{۱۵۰\,mm}_{\text{پهنای تسمه (مقدار حداقل)}} \le d \le \underbrace{۲۰۰\,mm}_{\text{مقدار حداکثر}}$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۱۰: دو ورق با ضخامت ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر، با اتصال پوششی (رویهم) با جوش دوطرفه به هم متصل می‌شوند، حداقل طول همپوشانی لازم بر حسب میلی‌متر چه مقدار می‌باشد؟

۱) ۵۰ ۲) ۱۰۰ ۳) ۲۵ ۴) ۷۵

حل: براساس مطالب درسنامه، در اتصالات پوششی (رویهم) دو قطعه، طول همپوشانی نباید از ۵ برابر ضخامت قطعه نازکتر کمتر باشد و در هیچ حالتی از ۲۵ میلی‌متر کمتر نشود. یعنی:

$$\text{حداقل همپوشانی در اتصال رویهم} = max\{۵t_{min}\,,\,۲۵\,mm\} = max\{۵\times۱۰\,,\,۲۵\,mm\} = ۵۰\,mm$$

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۱۱: در اتصال لب به لب، دو ورق با ضخامت یکسان از چه نوع جوشی استفاده نمی‌شود؟

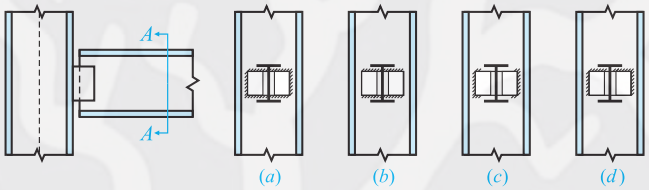
۱) گوشه ۲) شیاری با درز ساده

۳) شیاری با درز لاله‌ای ۴) شیاری با درز جناغی

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۱۲: برای تأمین انعطاف‌پذیری اتصال ساده شکل زیر، کدام‌یک از اتصالات زیر مجاز است؟

۱) (a)
۲) (b)
۳) (c)
۴) (d)



● حل: برای انعطاف‌پذیری اتصال ساده، باید برگشت جوش نبشی به ستون حداکثر نصف پهنای بال نبشی باشد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

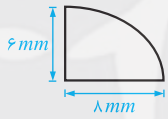
تمرین ۱۳: در اتصال مفصلی نبشی نشیمن حداقل و حداکثر طول قلاب جوش چقدر است؟

۱) ۱ برابر و ۲ برابر ۲) ۲ برابر و ۳ برابر ۳) ۲ برابر و ۴ برابر ۴) ۱ برابر و ۳ برابر

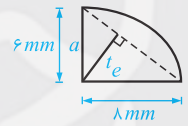
● حل: با توجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۱۴: اندازهٔ گلوی جوش در جوش گوشه با ساق‌های نامساوی $۶\ mm$ و $۸\ mm$، چند میلی‌متر است؟

۱) ۴ ۲) ۴/۸
۳) ۶ ۴) ۶/۴



● حل: براساس نکات درسنامه، ضخامت گلوی جوش برابر $t_e = \frac{ab}{\sqrt{a^۲ + b^۲}}$ می‌باشد، بنابراین داریم:



$$t_e = \frac{۶ \times ۸}{\sqrt{۶^۲ + ۸^۲}} = \frac{۴۸}{۱۰} = ۴/۸\ mm$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

بحث ۴: ضوابط جوش‌های انگشتانه و کام

یکی دیگر از انواع جوش، جوش انگشتانه و کام می‌باشد که در شرایط خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بحث به مهمترین مفاهیم و ضوابط آن در قالب نکات زیر خواهیم پرداخت.

۱) سطح مقطع مؤثر در برش برای جوش انگشتانه و کام مساوی سطح مقطع اسمی سوراخ و شکاف در صفحهٔ برش در نظر گرفته می‌شود.

۲) استفاده از جوش انگشتانه و کام برای انتقال برش در اتصال‌های پوششی و یا جلوگیری از کمانش در عناصر رویهم آمده در اعضای ساخته شده، مجاز می‌باشد. همچنین در برخی موارد که طول جوش گوشه برای انتقال بار کافی نیست می‌توان به‌صورت ترکیبی از جوش انگشتانه و کام نیز استفاده کرد.

۳ قطر سوراخ در جوش انگشتانه نباید از ضخامت قطعهٔ سوراخ شده به اضافه ۸ میلی‌متر کمتر باشد. همچنین این قطر نباید از قطر حداقل به اضافه ۳ میلی‌متر و یا $۲\frac{۱}{۴}$ برابر ضخامت جوش بزرگتر شود.

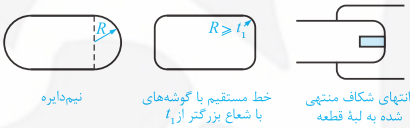
$$D_{min} = t_p + ۸ \quad , \quad D_{min} \le D \le min\,(D_{min} + ۳\ ,\ ۲/۲۵\,a)$$

۴ حداقل فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌های جوش‌های انگشتانه ۴ برابر قطر سوراخ می‌باشد.

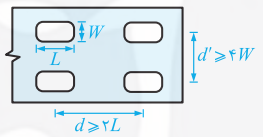
۵ طول شکاف در جوش کام نباید از ۱۰ برابر ضخامت جوش بیشتر باشد.

۶ پهنای شکاف در جوش کام نباید از ضخامت قطعهٔ بریده شده به اضافه ۸ میلی‌متر کمتر و همچنین از $۲\frac{۱}{۴}$ برابر ضخامت جوش بیشتر باشد.

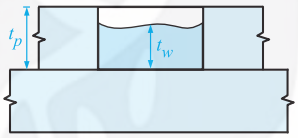
۷ انتهای شکاف یا باید نیم‌دایره‌ای باشد و یا خطی مستقیم که گوشه‌های آن تبدیل به ربعی از دایره (با شعاعی بزرگتر از ضخامت قطعه حاوی شکاف) می‌شود، باشد. مگر اینکه انتهای شکاف به لبهٔ قطعه، منتهی شده باشد.



۸ حداقل فاصله مرکز به مرکز شکاف‌ها در امتداد عمود بر طول، ۴ برابر پهنای شکاف و حداقل فاصلهٔ مرکز به مرکز شکاف‌ها در امتداد طول، ۲ برابر طول شکاف می‌باشد.



۹ ضخامت جوش انگشتانه و کام در قطعاتی که ضخامت آنها ۱۶ میلی‌متر و یا کمتر است، باید برابر با ضخامت قطعه باشد. در قطعاتی که ضخامت آنها بیش از ۱۶ میلی‌متر است، ضخامت این جوش باید حداقل $\frac{۱}{۲}$ ضخامت قطعه باشد و از ۱۶ میلی‌متر نیز کمتر نشود.



$$t_w = t_p \quad t_p \le ۱۶ \quad , \quad t_w = \frac{t_p}{۲} \ge ۱۶\ mm \qquad t_p > ۱۶$$

نمونه سؤالات بحث (٤)

تمرین ۱۵: برای اتصال دو ورق به ضخامت‌های ۱۸ و ۲۵ میلی‌متر از جوش انگشتانه استفاده شده است. به این منظور روی ورق به ضخامت $۱۸\ mm$ سوراخ‌هایی ایجاد شده است. حداقل قطر سوراخ چند میلی‌متر است؟

۱) ۲۸ ۲) ۳۱
۳) ۲۱ ۴) ۲۶

حل: باتوجه به ضخامت ۱۸ میلی‌متر داریم:

$$d \ge t_p + ۸\ mm \Rightarrow d \ge ۱۸\ mm + ۸\ mm \Rightarrow d \ge ۲۶\ mm$$

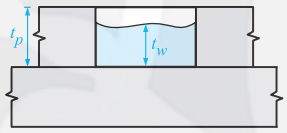
(ضخامت ورق ← t_p، قطر سوراخ ← d)

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۱۶: فرض کنید برای اتصال دو ورق هر یک به ضخامت ۲۰ میلی‌متر از جوش کام استفاده شده است. حداقل ضخامت جوش چقدر باید باشد؟

۱) ۸ میلی‌متر
۲) ۱۰ میلی‌متر
۳) ۱۶ میلی‌متر
۴) ۲۰ میلی‌متر

حل: براساس مورد (۹) درسنامه می‌توان نوشت:



ضخامت ورق (t_p)	ضخامت جوش (t_w)
$t_p \le ۱۶\ mm$	$t_w = t_p$
$t_p > ۱۶\ mm$	$t_w = max\{\frac{۱}{۲}t_p\ ,\ ۱۶\ mm\}$

بنابراین برای ورقی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر داریم:

$$t_P = ۲۰\ mm > ۱۶\ mm \Rightarrow t_w = max\{\frac{۱}{۲}(۲۰)\ ,\ ۱۶\ mm\} = ۱۶\ mm$$

بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

بحث ۵: آشنایی با الکترود

یکی از مهم‌ترین ارکان تشکیل‌دهندهٔ اسکلت فولادی الکترود یا فلز جوش نام دارد. شاید در حالت عادی تصور شود که الکترود تنها نقش پرکننده و اتصال‌دهنده دارد اما باید توجه کرد در شرایط مختلف قطر، روکش و جنس الکترود تأثیرات به سزایی در کیفیت جوش خواهد داشت. در این بحث به بررسی مهمترین مفاهیم و ضوابط الکترود می‌پردازیم.

۵-۱- الکترودهای سازگار با مصالح فلز پایه

فلز جوش یا همان الکترود مصرفی باید با مصالح فلز پایه سازگار و مطابق جدول زیر باشد:

جدول ٤: الکترودهای سازگار با فلز پایه

تنش تسلیم مشخصهٔ مصالح فلز پایه (F_y)	نوع الکترود سازگار
تا ۳۰۰ MPa و $t \le ۲۰\ mm$ (t = ضخامت فلز پایه)	E۶۰ یا معادل آن
	E۷۰ یا معادل آن
تا ۳۰۰ MPa و $t > ۲۰\ mm$	E۷۰ یا معادل آن
از ۳۰۰ MPa تا ۳۸۰ MPa	E۷۰ یا معادل آن
از ۳۸۰ MPa تا ۴۶۰ MPa	E۸۰ یا معادل آن

نکته: همان‌طور که مشاهده می‌کنید نوع الکترود مصرفی تابع ضخامت فلز پایه (t) و جنس فلز پایه (F_y) می‌باشد و با تغییرات آنها تغییر می‌کند.

۵-۲- پیش گرمایش فولادهای ساختمانی

پیش‌گرمایش از عوامل مهم جلوگیری از ایجاد ترک در جوش بوده که تنش‌های انقباضی را کاهش و شکل‌پذیری نوار جوش را افزایش می‌دهد. برای نیمرخ‌های نورد شدهٔ سنگین و قطعات ساخته شده با جوش و یا جوشکاری در هوای سرد، باید قبل از جوشکاری، پیش‌گرمایش تا دمای حداقل طبق جدول زیر صورت گیرد.

جدول ۵: حداقل پیش گرمایش و درجهٔ حرارت عبورهای میانی

مشخصات ورق		روش جوشکاری	نوع فولاد	طبقه
حداقل درجهٔ حرارت ورق (سانتی‌گراد)	ضخامت ورق (میلی‌متر)			
۲۰	≤ ۲۰	جوش دستی با الکترود روکش‌دار (غیر از الکترودهای کم هیدروژن)	St ۳۷ St ۵۲	A
۶۵	$۲۰ < t \leq ۴۰$			
۱۱۰	$۴۰ < t \leq ۶۵$			
۱۵۰	$t > ۶۵$			
۱۰	≤ ۲۰	جوش دستی با الکترود روکش‌دار کم هیدروژن جوش زیرپودری جوش تحت حفاظت گاز (الکترود فلزی یا تنگستن) جوش با الکترود توپودری	St ۳۷ St ۵۲	B
۲۰	$۲۰ < t \leq ۴۰$			
۶۵	$۴۰ < t \leq ۶۵$			
۱۱۰	$t > ۶۵$			
۱۰	≤ ۲۰	جوش دستی با الکترود روکش‌دار کم هیدروژن جوش زیرپودری جوش تحت حفاظ گاز (الکترود فلزی یا تنگستن) جوش با الکترود توپودری	$F_y \geq ۴۰۰\ MPa$	C
۶۵	$۲۰ < t \leq ۴۰$			
۱۱۰	$۴۰ < t \leq ۶۵$			
۱۵۰	$t > ۶۵$			

تذکر (۱): در جوشکاری ورق‌ها با ضخامت بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر که تحت بارهای دینامیکی قرار دارند، فقط باید از الکترودهای کم هیدروژن استفاده نمود.

تذکر (۲): هرقدر گیرداری قطعهٔ مورد جوش بیشتر باشد، دمای پیش گرمایش باید افزایش یابد.

تذکر (۳): دمای پیش گرمایش لازم نیست از ۲۳۰ درجهٔ سلسیوس بیشتر باشد.

نکته ۱: در هنگام جوشکاری ورق‌های ضخیم و یا فولادهای پر مقاومت و آلیاژدار، نیاز به دستورالعمل‌های خاص جوشکاری برای جلوگیری از وقوع ترک می‌باشد که عبارتند از:

۱. شکل و هندسه درز جوش مناسب
۲. حداقل نفوذ به منظور جلوگیری از رقیق‌شدگی فلز جوش با عناصر آلیاژ ورق
۳. پیش‌گرمایش به منظور به تأخیر انداختن سرعت سرد شدن و کاهش تنش‌های انقباضی.

نکته ۲: در صورت استفاده از الکترود کم هیدروژن، پیش‌گرمایش را می‌توان به حداقل رسانید. برای جوشکاری ورق‌های خیلی ضخیم یا پُر آلیاژ و یا درزهای با درجه گیرداری بالا، نیاز به پیش‌گرمایش بیشتری است.

نکته ۳: در هر صورت دمای پیش گرمایش نباید بیش از ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد شود.

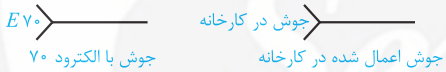
۵-۳- علائم جوش

در نقشه برای مشخص کردن جوش و خصوصیات مرتبط با آن از علامت ⟩ استفاده می‌شود که بر روی آن مشخصات جوش درج می‌شود. توجه داشته باشید که نوک پیکان به محل درز جوش اشاره دارد.

بر روی این علامت، (۴) موقعیت اصلی قرار داده شده است، به شکل مقابل توجه کنید:

هر کدام از این موقعیت‌ها اطلاعات خاصی در اختیار ما قرار می‌دهند که عبارتند از:

موقعیت ۱: در این قسمت مشخصات اضافی، نحوهٔ عمل یا مراجع دیگر قرار داده می‌شود، به‌طور مثال:



موقعیت ۲: در موقعیت (۲) اطلاعات زیر با فرمت‌های مشخص شده می‌توانند قرار بگیرند.

- S (E) ← اندازه جوش / ← اندازه گلوی مؤثر
- $L - P$ ← طول جوش / ← فاصله مرکز به مرکز تکه‌های جوش در جوش‌های منقطع
- $\frac{F}{A}$ ← F: نشانه سنگ زدن، شکل سطح جوش / ← A: زاویه شیار درز
- R ← اندازه شکاف، ریشه یا عمق پرشدگی با جوش در اتصالات کام و انگشتانه

تذکر: دقت کنید شکل سطح جوش در اطلاعات $\frac{F}{A}$ به دو صورت زیر می‌باشد:

شکل سطح جوش	تخت	محدب

جهت درک بیشتر این علائم به شکل‌های زیر دقت کنید:

موقعیت ۳: در این قسمت علائم اصلی جوش یا مشخصات جزئی جوش درج می‌شوند که طبق جدول زیر می‌باشند:

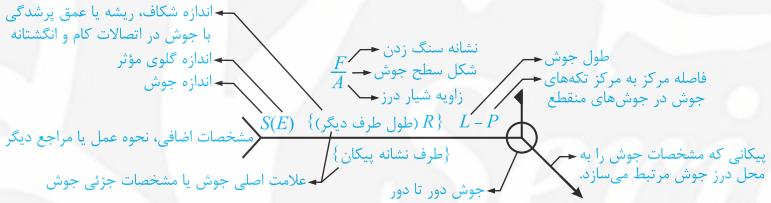
جدول ٦: علائم اصلی جوش

شیاری							کام یا انگشتانه	گوشه	جوش پشت یا پشت‌بند	جوش یکسره
نیم‌جناغ گرد	جناغی گرد	نیم لاله‌ای	لاله‌ای	نیم‌جناغی	جناغی	ساده				

موقعیت ۴: در این قسمت جوش دور تا دور و جوش در محل مشخص می‌شود که نمادهای آن به صورت زیر می‌باشد:

جوش در محل (موقع نصب)	جوش دور تا دور

تذکر: مشخصات جوش در نظر گرفته شده در آیین‌نامه به‌صورت زیر نمایش داده شده است:

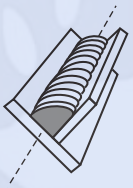
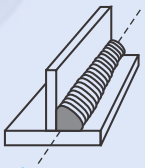
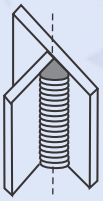
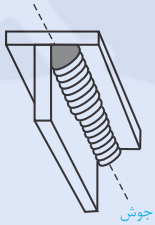
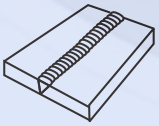
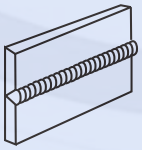
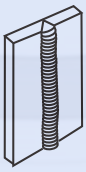
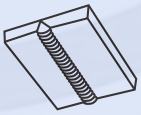


محل قراردادی جاگیری علامت‌های جوشکاری

۵-۴- وضعیت‌های جوشکاری با الکترود

با توجه به نحوه و زاویهٔ قرارگیری الکترود در محل جوش برای جوش‌های گوشه و شیاری وضعیت‌های مختلفی ایجاد خواهد شد که در جدول مشاهده می‌کنید:

جدول ۷: وضعیت‌های جوشکاری

	تخت یا کفی (۱F) یا F	افقی (۲F) یا H	قائم (۳F) یا V	سقفی (۴F) یا OH
جوش‌های گوشه	 محور نوار جوش	 محور نوار جوش	 محور نوار جوش	 محور نوار جوش
	تخت یا کفی (۱G)	افقی (۲G)	قائم (۳G)	سقفی (۴G)
جوش‌های شیاری	 ورق افقی جوش افقی	 ورق قائم جوش افقی	 ورق قائم جوش قائم	 ورق افقی جوش افقی

تذکر: با توجه به وضعیت‌های نشان داده شده از حالت ۱ به ۴ جوشکاری سخت‌تر خواهد شد و نیاز به جوشکار با مهارت و تسلط بیشتری می‌باشد.

۵-۵- نامگذاری الکترود طبق AWS

به منظور معرفی و استفاده بهتر از انواع الکترود یک سیستم نامگذاری برای آنها در نظر گرفته شده است.

در سیستم شماره‌گذاری براساس AWS، همراه حرف E یک عدد ۴ یا ۵ رقمی قرار می‌گیرد. (E مخفف الکترود است.)

الکترود ←
$$\boxed{E}\ \underbrace{X}_{(۱)}\underbrace{X}_{(۲)}\ \underbrace{X}_{(۳)}\ \underbrace{X}_{(۴)}$$

حال با هر یک از سه دسته اعداد بالا جداگانه آشنا می‌شویم.

۱) اولین دو رقم سمت چپ (یا سه رقم اول در سیستم پنج رقمی) حداقل مقاومت کششی مفتول الکترود را برحسب کیلو پوند (هزار پوند) بر اینچ مربع نشان می‌دهد. به‌طور مثال:

$E\ ۷۰XX \Rightarrow$ الکترود با مقاومت ۷۰ کیلوپوند بر اینچ مربع

نکته: در صورتی‌که این مقاومت در عدد ۷۰ ضرب شود مقاومت برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌دست می‌آید.

$$E\ ۷۰XX \Rightarrow \text{مقاومت کششی} = ۷۰ \times ۷۰ = ۴۹۰۰\ kg/cm^۲$$

۲) رقم سوم موقعیت جوشکاری را نمایش می‌دهد، بنابراین داریم:

$EXX\ ۱X =$ تمام وضعیت‌ها , $E\ XX\ ۲X =$ تخت و افقی , $EXX\ ۳X =$ تخت

۳) آخرین رقم، نوع جریان و نوع روکش الکترود را تعیین می‌کند که ارقام آن طبق جدول زیر می‌باشد:

جدول ۸: مفهوم رقم آخر در نام‌گذاری الکترود به روش AWS

نوع پوشش	نوع قوس	جریان	رقم آخر
آلی	قوس نفوذی	فقط $DCRP$	۰
آلی	قوس نفوذی	$A.C.$ یا $DCRP$	۱
روتیلی (اکسید تیتان)	قوس متوسط	$A.C.$ یا $DCRP$	۲
روتیل	قوس نرم	$A.C.$ یا $D.C$ قطب آزاد	۳
روتیل با پودر آهن (حدود ٪۳۰)	قوس نرم	$A.C.$ یا $D.C.$ قطب آزاد	۴
کم هیدروژن	-	فقط $DCRP$	۵
کم هیدروژن	قوس متوسط	$A.C.$ یا $DCRP$	۶
پودر آهن	-	$A.C.$ یا $D.C$	۷
کم هیدروژن - قوس آهن	-	$A.C.$ یا $DCRP$	۸

جدول ۹: علامت شناسایی الکترود

$DCSP =$ جریان یکسو - قطبیت مستقیم	$DCRP =$ جریان یکسو - قطبیت معکوس	$A.C. =$ جریان متناوب

تذکر: با توجه به جدول فوق می‌توان گفت الکترودهایی که رقم آخرشان ۵، ۶ و ۸ باشد، کم هیدروژن محسوب می‌شوند. از این الکترودها برای جلوگیری از ترک‌خوردگی جوش استفاده می‌شود.

جدول ۱۰: تفسیر آخرین رقم شماره‌گذاری براساس AWS

مثال	مفهوم	رقم
$E-۶۰XX = ۴۲۰۰\ kg/cm^۲$ $E-۱۱۰XX = ۷۷۰۰\ kg/cm^۲$	حداقل مقاومت کششی	۲ یا ۳ رقم اول
$E-XX\ ۱X$ = تمام وضعیت‌ها $E-XX\ ۲X$ = تخت و افقی $E-XX\ ۳X$ = تخت	وضعیت جوشکاری	رقم بعدی
به جدول ۸ مراجعه شود.	نوع جریان، نوع سرباره، نوع قوس، عمق نفوذ، وجود پودر آهن و هیدروژن در روکش	رقم آخر

نمونه سؤالات بحث (۵)

تمرین ۱۷: کدام‌یک از الکترودهای زیر را نمی‌توان برای همهٔ وضعیت‌های جوشکاری به‌کار برد؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۴)

۱) $E\ ۷۰۱۶$
۲) $E\ ۶۰۲۰$
۳) $E\ ۷۰۱۸$
۴) $E\ ۶۰۱۳$

حل: براساس مطالب درسنامه، رقم سوم نامگذاری الکترود معرف موقعیت جوشکاری است. عدد ۱ بیانگر جوشکاری در تمام وضعیت‌ها می‌باشد (گزینه‌های ۱، ۳ و ۴) و عدد ۲ برای جوشکاری در وضعیت تخت و افقی است. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۸: اگر فولاد از نوع مقاومت بالا باشد چه روشی برای جوشکاری ضروری است؟ (قوه قضائیه - ۸۶)

۱) استفاده از الکترود مخصوص و حرارت دادن
۲) حرارت دادن فولاد
۳) استفاده از الکترود مخصوص
۴) تمهیدی ضرورت ندارد.

حل: باتوجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۱۹: در یک اتصال گیردار، چنانچه ضخامت ورق روسری برابر ۲۵ میلی‌متر باشد. برای جوش‌کاری با جوش شیاری این ورق به بال یک ستون، استفاده از کدام‌یک از گزینه‌های زیر مجاز می‌باشد؟ فولاد مصرفی دارای $F_y = ۲۴۰\ MPa$ می‌باشد.

۱) $E\ ۷۰$
۲) $E\ ۶۰$ و $E\ ۷۰$
۳) $E\ ۶۰$ و $E\ ۸۰$
۴) $E\ ۶۰$، $E\ ۷۰$ و $E\ ۸۰$

حل: باتوجه به ضخامت ورق و جدول الکترودهای سازگار با فلز پایه گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۰: کاربرد الکترودهای کم هیدروژن در کجاست؟

۱) جوشکاری در هوای سرد
۲) جوشکاری در وزش باد
۳) جلوگیری از ترک خوردن
۴) نفوذ بیشتر جوش

حل: باتوجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۱: منظور از علامت زیر در نقشه‌های محاسباتی ساختمان‌های فولادی چیست؟

۱) منظور جوش گوشه دورتادور با ساق مؤثر برابر ۶ میلی‌متر است.
۲) منظور جوش گوشه با گلوگاه مؤثر برابر ۶ میلی‌متر و در محل (موقع نصب) است.
۳) منظور جوش انگشتانه به ضخامت ۶ میلی‌متر و در محل (موقع نصب) است.
۴) منظور جوش شیاری جناغی به ضخامت ۶ میلی‌متر و در محل (موقع نصب) است.

حل: براساس مفاهیم درسنامه گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۲: وضعیت جوشکاری‌های $4G$ و $2F$ به‌ترتیب به چه معنا می‌باشد؟

۱) جوش گوشه افقی، جوش شیاری سقفی
۲) جوش گوشه سقفی، جوش شیاری افقی
۳) جوش شیاری سقفی، جوش گوشه افقی
۴) جوش شیاری افقی، جوش گوشه سقفی

حل: با توجه به وضعیت‌های جوشکاری در جدول درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۳: در صورتی که انجام جوشکاری در موقعیت سقفی و یا قائم ضروری باشد، کدام الکترود قابل استفاده نیست؟

۱) $E\,XX\ 11$ ۲) $E\,XX\ 20$ ۳) $E\,XX\ 10$ ۴) $E\,XX\ 16$

حل: رقم سوم بیانگر وضعیت جوشکاری است، در گزینهٔ (۲) رقم سوم عدد دو است که بیانگر حالت تخت و افقی است و نمی‌تواند در حالت سقفی و قائم به کار برود، بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ این تست است.

بحث ۶: بررسی عیوب جوش

یکی از مهم‌ترین مواردی که در بحث جوشکاری مطرح می‌شود، عیوب ایجاد شده ناشی از جوشکاری نامناسب است که در این بحث به آن خواهیم پرداخت.

۶-۱- عیوب کلی جوش

عیوب کلی جوش را می‌توان در قالب جدول زیر دسته‌بندی کرد:

جدول ۱۱: بررسی عیوب جوش

نام خرابی (عیب) جوش	تعریف	علت ایجاد شدن خرابی و توضیحات
ذوب ناقص	عدم امتزاج کامل فلز پایه و فلز جوش مجاور آن	۱- کافی نبودن حرارت ورودی ۲- انتخاب نادرست قطبیت جریان و گاز محافظ ۳- طرح اتصال نامناسب ۴- سطح آلوده ورق ۵- نوع یا اندازهٔ نامناسب الکترود ۶- تنظیم نادرست جریان و سرعت جوشکاری

نام خرابی (عیب) جوش	تعریف	علت ایجاد شدن خرابی و توضیحات
نفوذ ناقص	فلز جوش تا عمق کمتری از آنچه در طراحی در نظر گرفته شده است در داخل درز یا شیار نفوذ می‌نماید	۱- ضخامت پیشانی ریشه بیش از نیاز دهانه ریشه ۲- دهانه ریشه خیلی کوچک ۳- زاویه پخی شیار V شکل خیلی کوچک ۴- اندازه الکترود خیلی بزرگ ۵- سرعت حرکت الکترود خیلی زیاد ۶- شدت جریان جوشکاری خیلی پایین
تخلخل	ایجاد حفره‌های خالی یا محبوس شدن گاز در فلز جوش هنگام سرد شدن	۱- استفاده از شدت جریان خیلی زیاد یا طول قوس خیلی بلند ۲- روش جوشکاری نامناسب ۳- استفاده غیر صحیح از تسمه پشت‌بند ۴- وجود رطوبت ۵- وزش باد در سطح جوش ۶- کاربرد الکترود نامرغوب **نکته:** با خشک کردن الکترود، تنظیم شدت جریان جوشکاری، تنظیم طول قوس و عدم جوشکاری در شرایط جوی نامناسب می‌توان از تخلخل جلوگیری کرد.
بریدگی کنارهٔ جوش	شیار ذوب شده‌ای در فلز مبنا که در انتهای ساق جوش قرار گرفته و بوسیله فلز جوش پر نشده است.	۱- تکنیک جوشکاری نامناسب ۲- سرعت جوشکاری زیاد ۳- استفاده از شدت جریان بیش از اندازه و طول قوس بلند **نکته ۱:** می‌توان با جوشکاری مجدد ناحیه بریدگی با الکترودهای نمره پایین‌تر از فلز جوش آن را پر نمود. **نکته ۲:** اگر بریدگی باعث تقلیل قابل ملاحظه در مقطع شود مجاز نمی‌باشد.
حسب سرباره (آخال)	گل جوش که قرار است به‌دلیل وزن مخصوص کمتر به سطح جوش بیاید به‌دلیل سرد شدن سریع درون جوش می‌ماند	عدم دقت در برداشتن گل جوش در جوش‌های با چند بار عبور **نکته:** جوش‌های سقفی بیشتر در معرض تداخل گل جوش هستند.
سررفتن جوش روی فلز پایه (لوچه)	جاری شدن فلز جوش روی فلز پایه بدون ذوب نمودن کامل آن	۱- تکنیک نامناسب جوشکاری (زاویهٔ نامناسب الکترود) ۲- سرعت جوشکاری خیلی آهسته **نکته ۱:** سررفتگی باعث ایجاد شیار تیز روی سطح قطعه و ایجاد تمرکز تنش خواهد شد. **نکته ۲:** سررفتگی مذاب به‌دلیل تأثیر نیروی ثقل اغلب در وضعیت افقی رخ می‌دهد.
گرده اضافی در جوش	فلز جوش اضافه بر مقدار موردنیاز جهت پر کردن اتصال	۱- مشکل اصلی گرده جوش احتمال ایجاد گوشه‌های تیز در نواحی جوش می‌باشد. ۲- گرده جوش می‌تواند در پاس ریشه و یا پاس نهایی اتفاق بیفتد. **نکته:** گرده اضافی تا ۱/۵ میلی‌متر در جوش شیاری مجاز است و مقادیر بیشتر باعث افزایش مخارج و کاهش مقاومت خستگی می‌گردد.
لکه قوس	روشن کردن قوس روی سطح فلز پایه خارج از درز اتصال	۱- مناطق کوچکی روی سطح فلز پایه به‌طور سطحی ذوب شده و سریعاً سرد می‌شود. ۲- لکه قوس قابل پذیرش نیست و باعث ترک در فلز پایه می‌شود.

نام خرابی (عیب) جوش	تعریف	علت ایجاد شدن خرابی و توضیحات
ترک‌خوردگی گرم	در درجه حرارت زیاد و در خلال سرد شدن ناگهانی جوش پس از آنکه فلز جوش رسوب و شروع به انجماد نماید، رخ می‌دهد.	۱- نفوذ هیدروژنی ۲- نسبت عمق به عرض زیاد ۳- تقعر سطح جوش ۴- عدم پیش گرمایش مناسب درز جوش ۵- وجود چاله انتهای جوش پرنشده ۶- وجود رطوبت در الکترود یا درز جوش ۷- طرح نامناسب درز جوش
ترک‌خوردگی سرد	در دمای معمولی اتاق رخ می‌دهد و ممکن است ساعت‌ها پس از جوشکاری رخ دهد.	
ترک‌های مویی	بسیار ریز هستند با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند و نیاز به ۱۰ برابر بزرگنمایی برای رویت دارند. عمر مفید سازه‌های معمولی (تحت بارهای ایستا) را کاهش نمی‌دهند.	
عدم پرشدگی شیار	شیار جوش پر نمی‌شود	کمبود رسوب فلز جوش در مقطع جوش شیاری
جرقه و پاشش	ذرات فلزی که در حین جوشکاری ذوبی به اطراف پرتاب می‌شود.	در صورتی‌که پاشش به‌صورت قطره بزرگ باشد ممکن است گرمای کافی جهت ایجاد حساسیت به ترک را ایجاد نماید.
چاله انتهای جوش	زمانی‌که ضخامت گلوی جوش کمتر از سایر قسمت‌های نوار جوش شود.	به علت تعویض الکترود و برداشتن الکترود به‌صورت ناگهانی **تذکر:** در جوش با طول محدود لازم است انتهای جوش در محلی واقع شود که میزان تنش کم است وگرنه با پاس به عقب پر شود.

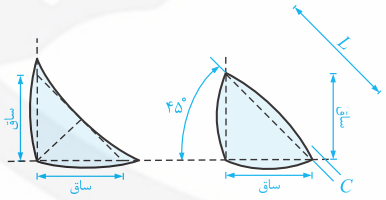
۶-۲- عیوب مقطع جوش

در این بخش به بررسی عیوب مقطع دو جوش پرکاربرد گوشه و شیاری می‌پردازیم.

۱ **جوش گوشه:** مقطع یک جوش گوشه و حداکثر میزان گرده (C) در حالت کلی به‌صورت زیر است.

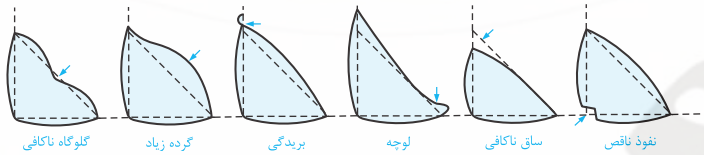
جدول ۱۲: میزان حداکثر گُرده

حداکثر گُرده (mm)	اندازهٔ ساق یا طول (L)
۱/۶ mm	$L \le 8\ mm$
۳ mm	$8 < L < 25$
۵ mm	$L \ge 25\ mm$



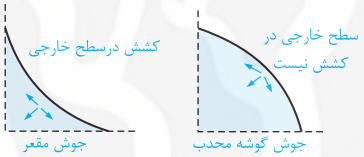
نمایش مقطع جوش گوشه

تذکر: مقاطع غیرقابل پذیرش جوش گوشه نیز به‌صورت زیر می‌باشد:

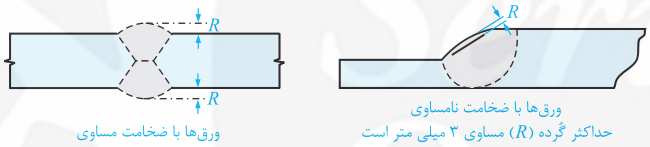


مقاطع غیرقابل پذیرش جوش گوشه

نکته: جوش گوشه را به دو صورت مقعر و محدب می‌توان اجرا کرد. وقتی که جوش مقعر خنک و منقبض می‌شود، سطح خارجی آن به کشش افتاده و باعث ایجاد ترک در جوش می‌شود. در حالی‌که جوش محدب بدون ایجاد کشش سطحی سرد و منقبض می‌شود، بنابراین با جوش محدب می‌توان جلوی ایجاد ترک را گرفت.

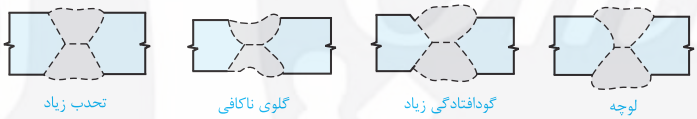


۲ **جوش شیاری:** جوش‌های شیاری باید با حداقل تحدب (R) اجرا شوند. در درزهای لب به لب یا اتصالات گونیا، حداکثر تحدب R برابر ۳ میلی‌متر است و باید دارای انتقال تدریجی با سطح فلز پایه داشته باشد.



مقاطع قابل پذیرش جوش‌های شیاری

توجه کنید که جوش‌های زیر به علت داشتن ناپیوستگی سطحی غیر قابل پذیرش می‌باشند.



مقاطع غیرقابل پذیرش جوش شیاری

تذکر: وجود گُرده جوش تا ۱/۵ میلی‌متر در جوش شیاری قابل پذیرش است و مقادیر بیشتر باعث افزایش مخارج و کاهش مقاومت خستگی می‌گردد.

۶-۳- تاثیر عوامل مهم روی کیفیت جوش

عوامل مختلف وابسته به فرآیند جوشکاری می‌تواند به‌صورت زیر روی کیفیت جوش مؤثر باشد:

جدول ۱۳: تأثیر عوامل مهم روی کیفیت جوش

عامل	ویژگی خط جوش	نوع آسیب	خصوصیات جوش
شدت جریان خیلی کم	گرده زیاد فلز جوش	عدم نفوذ در لبه‌ها (لوچه)	پیشرفت کند
شدت جریان خیلی زیاد	پاشیدگی زیاد	بریدگی لبهٔ جوش در طول درز اتصال	ترسیب نامنظم
قوس بلند (ولتاژ زیاد)	نامنظم با نفوذ نسبی	مقطع نامناسب فلز جوش	جوش کم بازده
جوشکاری با سرعت زیاد	باریک و نامنظم	کمبود فلز جوش در مقطع درز	فاقد مقاومت کافی
جوشکاری با سرعت خیلی کم	گرده زیاد فلز جوش	عدم نفوذ در لبه‌ها	اتلاف زمان زیاد
شدت جریان ولتاژ و سرعت مناسب	صاف، منظم و با شکل خوب	عدم بریدگی کناره جوش	یکنواخت در مقطع عرضی

۶-۴- کنترل اعوجاج و جمع‌شدگی

در رابطه با اعوجاج و جمع‌شدگی در زمان جوش‌کاری رعایت نکات زیر الزامی است:

۱) تا حد امکان، دستورالعمل و توالی جوش‌ها باید طوری انتخاب شود که حرارت جوشکاری در حین پیشرفت جوشکاری، متعادل گردد تا مقادیر اعوجاج و جمع‌شدگی حداقل شود.

۲) مسیر پیشرفت جوشکاری یک عضو، باید از نقطه با گیرداری بیشتر به سمت نقطه با آزادی بیشتر باشد.

۳) در هنگام مونتاژ، درزهایی که در آنها انتظار انقباض بزرگتری می‌رود باید قبل از درزهایی جوش شوند که انتظار انقباض کمتری از آنها داریم. جوشکاری این درزها باید تا حد امکان با گیرداری کمی انجام شود.

نمونه سؤالات بحث (۶)

تمرین ۲۴: مزیت و دلیل مطلوبیت جوش محدب در جوش گوشه چیست؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۴)

۱) به کشش نیفتادن سطح خارجی جوش و در نتیجه ترک نخوردن

۲) به کشش افتادن سطح جوش و در نتیجه شکل‌پذیر شدن

۳) جوش محدب گوشه مناسب نیست، بلکه جوش به‌صورت مقعر باشد بهتر است.

۴) جوش محدب یا مقعر فرقی باهم ندارد و لذا اجرای جوش به هر دو صورت مناسب است.

● حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۵: در عملیات نظارت کارگاهی کدام یک از گزینه‌های زیر برای سطح جوش گوشه‌ای *(Fillet)* قابل قبول است؟

۱) سطح گرده جوش گوشه‌ای باید کمی محدب باشد به شرط آن که ساق و بُعد جوش تأمین گردد.

۲) سطح گرده جوش گوشه‌ای می‌تواند کمی به طور یکنواخت مقعر باشد، به شرط آن‌که ساق و بعد جوش تأمین گردد.

۳) سطح گرده جوش گوشه‌ای می‌تواند تخت *(Flat)*، نه محدب و نه مقعر باشد به شرط آن که ساق و بعد جوش تأمین گردد.

۴) همه موارد بالا صحیح است.

● حل: براساس درسنامه سطح جوش می‌تواند محدب و مقعر باشد و مقدار C (حداکثر گُرده) باید از جدول (۱۲) پیروی کند، بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۷: ساخت و نصب قطعات قبل از جوشکاری

قبل از مرحلهٔ مونتاژ و نصب، در ابتدا باید قطعات با ابعاد و شکل‌های لازم بریده شوند و در محل‌های مشخص شده بر روی آنها سوراخ ایجاد شود. در این قسمت به بررسی نکات این موارد خواهیم پرداخت.

۷-۱- بریدن قطعات

در رابطه با نوع برش و دستگاه‌های به‌کار برده شده در این قسمت به مطالب ذکر شده دقت کنید:

۱) قطعات باید با ابعاد و شکل‌های لازم به دقت بریده شده و در محل‌های لازم سوراخ شوند. برش ورق‌هایی که در ساختن قطعات فولادی مصرف می‌شود باید توسط دستگاه برش حرارتی ریلی یا فرایندهای خودکار انجام گیرد. برای ورق‌های با ضخامت مساوی یا کمتر از ۱۵ میلی‌متر، برش‌کاری توسط دستگاه گیوتین مجاز است. در این حالت لبه‌های برش باید کاملاً یکنواخت و خالی از ناهمواری‌های سطحی بیش از ۰/۵ میلی‌متر باشد. ناهمواری‌ها و زخم‌های بیش از حد مجاز را باید با سنگ زدن و در صورت لزوم تعمیرکاری توسط جوش، هموار کرد.

۲) در قطعات و نیمرخ‌های سنگین با ضخامت اجزای تشکیل‌دهنده بیش از ۴۰ میلی‌متر، باید قبل از برش حرارتی، پیش گرمایش تا دمای حداقل ۶۵ درجه سلسیوس انجام شود.

۳) برش انتهایی نیمرخ‌های فولادی که برای ساخت مهاربندها، تیرها، ستون‌ها و اتصالات آنها مصرف می‌شوند، در صورت موافقت مهندس ناظر می‌تواند با اره یا برش حرارتی به‌صورت دستی انجام گیرد. در هر صورت کلیهٔ ناصافی‌هایی که بر اثر برش‌کاری به‌وجود می‌آید، باید با سنگ زدن بر طرف شوند.

۴) سوراخ‌کاری نهایی ورق‌ها و نیمرخ‌ها با ضخامت بیش از ۱۵ میلی‌متر باید به کمک متهٔ دوار انجام پذیرد. برای سوراخ‌های با قطر زیاد می‌توان ابتدا سوراخی با قطر کوچک‌تر توسط منگنه (پانچ) ایجاد نمود و سپس با مته، سوارخ را به قطر دلخواه رساند. قطعاتی که با پیچ به هم متصل می‌شوند در صورت امکان باید همه به هم خال جوش شده و با هم سوراخ‌کاری شوند. سوراخ‌کاری ورق‌ها و نیمرخ‌ها به کمک منگنه برای ضخامت‌های بیش از ۱۵ میلی‌متر مجاز نیست.

۵) تیرهای با مقطع کاهش یافته باید با استفاده از برش حرارتی برای ایجاد قوسی ملایم ساخته شوند. زبری سطح بریده شده با برش حرارتی باید حداکثر ۱۳ میکرون باشد. تمام نواحی انتقالی بین تیر با مقطع کاهش یافته و مقطع دست نخورده باید در جهت طول بال تیر برای کاهش آثار نامطلوب ناشی از تغییر ناگهانی مقطع گرد شوند. گوشه‌های بین سطح مقطع کاهش یافته و بالا و پایین بال‌های تیر جهت برداشتن لبه‌های تیز باید سنگ زده شوند، ولی رعایت حداقل شعاع گردی یا زاویهٔ پخی نیاز نیست.

۶) حداکثر رواداری برش حرارتی از خط برش تئوری ۶± میلی‌متر است. حداکثر رواداری عرض مؤثر ورق‌ها در هر مقطع ۱۰± میلی‌متر است.

۷) تورفتگی‌ها و زخم‌های ایجاد شده در اثر برش حرارتی در سطح برش کاهش یافته با حداکثر عمق ۶ میلی‌متر را می‌توان با سنگ زدن اصلاح نمود. طول ناحیهٔ دارای تورفتگی و زخم که سنگ زده می‌شود، نباید از ۵ برابر عمق تورفتگی در هر طرف کمتر باشد. از جوشکاری می‌توان برای اصلاح تورفتگی‌ها و زخم‌های ایجاد شده با عمق حداقل ۶ میلی‌متر و حداکثر ۱۳ میلی‌متر استفاده نمود. همچنین برای اصلاح نواحی که بر اثر سنگ زدن عمق مؤثر برش ناحیهٔ کاهش یافته از رواداری‌های مجاز بیشتر شده است، نیز می‌توان از جوش استفاده نمود. تورفتگی‌ها و زخم‌ها باید برداشته شده و در محل آنها گودی با عمق حداقل ۶ میلی‌متر با سنگ زدن ایجاد شود. همچنین در ناحیهٔ موردنظر پیش‌گرمایش با دمای حداقل ۶۶ درجهٔ سانتی‌گراد انجام شود. تورفتگی‌ها و زخم‌های با عمق بیش از ۱۳ میلی‌متر باید توسط روشی که به تأیید نمایندهٔ کارفرما رسیده است، اصلاح شوند.

۸ قطعات فولادی باید طوری ساخته شوند که هیچ نوع تغییرشکلی علاوه بر مقادیر رواداری ساخت، غیر از آنچه در نقشه مشخص شده، در آنها به وجود نیاید. انحنا و تغییرشکل‌هایی که طبق نقشه با دستور مهندس طراح لازم باشد، باید هنگام ساختن قطعات ایجاد شود.

۹ پخ‌زنی و آماده کردن لبهٔ قطعات برای جوشکاری باید هنگام برش حرارتی، با زاویه‌دادن به سر مشعل و با سنگ‌زنی‌های بعد انجام پذیرد. استفاده از دستگاه‌های پخ‌زن ضربه‌ای یا مکانیکی برای قطعات ورق‌های با ضخامت بیش از ۱۵ میلی‌متر مجاز نیست. پخ‌زنی و آماده کردن لبه‌ها باید مطابق جزئیات اجرایی دستورالعمل جوشکاری (WPS) باشد.

۱۰ الزامات مربوط به پیش‌خیز و پیش تنظیم در قطعات باید پس از تکمیل مونتاژ، کنترل شوند.

۱۱ به‌کارگیری روش‌های گرم کردن موضعی برای ایجاد انحنا یا صاف کردن قطعات با تأیید نمایندهٔ کارفرما مجاز است. دمای موضع گرم شده نباید از ۶۵۰ درجهٔ سلسیوس برای فولاد معمولی و ۵۶۵ درجهٔ سلسیوس برای فولاد پرمقاومت و آلیاژی بیشتر شود. این دما باید به کمک گچ‌های رنگی مخصوص که در دمای زیاد تغییر رنگ می‌دهند، مورد کنترل قرار گیرد. استفاده از روش‌های مکانیکی برای صاف کردن تا سه برابر مقادیر رواداری‌های مجاز، قابل قبول است.

۷-۲- پیش‌گرمایش قطعات

۱ به‌کارگیری روش‌های گرم کردن موضعی و یا تغییرشکل مکانیکی برای ایجاد انحنا یا راست کردن قطعات با تأیید مهندس ناظر مجاز می‌باشد، ولی دمای موضع گرم شده نباید از ۶۵۰ درجه سلسیوس برای فولاد معمولی و ۵۶۵ درجهٔ سلسیوس برای فولاد پرمقاومت و آلیاژی بیشتر شود.

۲ این دما باید به کمک گچ‌های رنگی مخصوص که در دمای حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس تغییر رنگ می‌دهند، مورد کنترل قرار گیرد.

۷-۳- الزامات قبل از جوشکاری

۱ جوشکاری باید طبق نقشه‌ها و مدارک فنی، توسط جوشکاران ماهر ارزیابی شده انجام گردد.

۲ قبل از جوشکاری باید سطوح مورد نظر از مواد زاید (گرد و خاک، زنگ‌زدگی، رنگ و غیره) کاملاً پاک شود.

۳ پیمانکار باید برای انواع جوش‌ها قبل از شروع جوشکاری، نوع الکترود مصرفی و قطر آن، شدت جریان و ولتاژ، تعداد پاس‌ها، نحوهٔ آماده‌سازی لبه‌ها و تمام اطلاعات اجرایی دیگر را توسط مهندس یا کاردان ارشد جوشکاری بر روی برگه‌های «دستورالعمل جوشکاری - WPS» ثبت نموده و در تمام مدت جوشکاری در اختیار جوشکار، سرپرست کارگاه جوشکاری و ناظرین قرار دهد. دستورالعمل جوشکاری باید طبق فرم استاندارد آن تهیه و به تأیید نماینده کارفرما برسد.

۴ روش اجرا باید طوری ترتیب داده شود که مقدار جوش‌های کارگاهی لازم به حداقل برسد، به‌طوری‌که ساخت قطعات با جوش در کارخانه انجام شده و اتصال در کارگاه حتی‌المقدور توسط پیچ پرمقاومت صورت گیرد.

۵ در سطوح و لبه‌هایی که پس از رنگ‌آمیزی جوش خواهند شد رنگ‌آمیزی باید حداقل در فاصلهٔ ۵۰ میلی‌متری از خط جوش متوقف شود.

۷-۴- الزامات حین جوشکاری

۱) جوشکاری در شرایط زیر مجاز نیست:

الف) زمانی که دمای محیط کار کمتر از ۱۰- درجهٔ سلسیوس است.

ب) زمانی‌که دمای فلز پایه کمتر از مقادیر ذکر شده در جدول ۱۰-۴-۵ است.

پ) زمانی‌که سطح کار مرطوب یا در معرض بارش باران و برف است.

ث) زمانی‌که محل جوشکاری در معرض وزش باد با سرعت بیش از ۱۰ کیلومتر بر ساعت است.

ت) زمانی‌که پرسنل جوشکاری تحت شرایط غیرایمن و نامتعادل هستند.

۲) بین قطعاتی که مستقیماً به طریق جوش گوشه به هم جوش می‌شوند نباید درزی بیش از ۲ میلی‌متر موجود باشد.

۳) خال‌جوش‌ها باید از همان کیفیت جوش‌های اصلی برخوردار باشند. نوع الکترود خال‌جوش‌های اصلی باید همانند باشند.

۷-۶- الزامات بعد از جوشکاری

۱) تسریع در سرد کردن جوش‌ها با هر روشی مانند آب ریختن ممنوع است.

۲) بر روی تمام جوش‌ها باید آزمایش‌های کنترل کیفیت چشمی توسط بازرس جوش انجام و نتیجه این آزمایش‌ها به مهندس ناظر و کارفرما گزارش شود.

۳) در جدول شمارهٔ (۱۴) میزان آزمایش‌های غیر مخرب جوش ارائه شده است. مهندس ناظر می‌تواند مستقیماً آزمایش‌ها را بر روی قطعات انجام داده و یا دستور تکرار و تجدید آنها لازم توسط پیمانکار را بنماید.

جدول ۱۴: میزان آزمایش‌های غیرمخرب جوش هنگام تولید و نصب

نوع جوش مورد آزمایش	نوع آزمایش	درصد آزمایش‌های برای گروه‌بندهای اهمیت ساختمان مطابق استاندارد ۲۸۰۰		
		۱ و ۲	۳	۴
۱- همهٔ جوش‌ها	بازرسی چشمی (VI)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲- جوش‌های لب‌به لب عرضی بال‌های کشش، اعضای کششی خرپاها، یک ششم عمق جان تیرها در مجاورت بال کششی و جوش شیاری ورق روسری و زیرسری به ستون در اتصال صلب تیر به ستون	پرتونگاری یا فراصوت (RT یا UT)	۱۰۰	۷۵	۲۵
۳- جوش‌های لب به لب طولی بال‌های کششی و اعضای کششی خرپاها	پرتونگاری یا فراصوت (RT یا UT)	۱۰	۵	-
۴- جوش‌های لب به لب عرضی و طولی در بال‌های فشاری و اعضای فشاری خرپاها و ستون‌ها	پرتونگاری یا فراصوت (RT یا UT)	۲۰	۱۰	-
۵- جوش‌های لب به لب عرضی جان تیرها که شامل بند ۲ فوق نیست و جوش‌های لب به لب طولی جان تیرها	پرتونگاری یا فراصوت (RT یا UT)	۲۰	۱۰	-
۶- جوش گوشهٔ بال به جان و سخت‌کننده‌ها	رنگ نافذ (PT) یا ذرات مغناطیسی (MT)	۱۰	۱۰	۵
۷- جوش‌های گوشهٔ اتصالات مهاربندها و اتصالات تیر به ستون	رنگ نافذ (PT) یا ذرات مغناطیسی (MT)	۱۰۰	۲۰	۱۰

تذکر (۱): ورق‌های با ضخامت کمتر یا مساوی ۸ میلی‌متر نیاز به آزمایش پرتونگاری (RT) یا فراصوت (UT) ندارند.

تذکر (۲): ساختمان‌های گروه ۳ دارای ۴ طبقه یا بیشتر روی سطح زمین، مطابق گروه‌های ۱ و ۲ ارزیابی می‌شوند.

۷-۵- آزمایش‌های جوش

در حالت کلی آزمایش‌های در نظر گرفته شده برای جوش در سه ردهٔ آزمایش‌های ارزیابی و تأیید (برای جوشکاران)، آزمایش‌های مخرب و آزمایش‌های غیرمخرب می‌باشد.

۱ **آزمایش‌های مخرب:** آزمایش های مخرب عبارتند از آزمایش‌های مکانیکی روی نمونه جوش شده جهت تعیین مقاومت و سایر خواص مکانیکی که برای انواع جوش‌ها به‌صورت زیر است:

- آزمایش‌های مخرب جوش شیاری
  - آزمایش کشش مقطع کاهش یافته (برای مقاومت کششی)
  - آزمایش‌های خمش هدایت شده (برای سلامت جوش)
  - آزمایش شکست نمونه زخم‌دار (برای سلامت جوش)
  - آزمایش کشش روی نمونه تمام مصالح (برای رسم نمودار تنش ـ کرنش مصالح جوش)
- آزمایش‌های مخرب جوش گوشه
  - آزمایش کشش مستقیم برای برش طولی و برش عرضی (برای تعیین مقاومت برشی جوش)
  - آزمایش خمش هدایت شده جوش گوشه (برای تعیین سلامت فلز جوش)
  - آزمایش شکست نمونه کنج (برای تعیین سلامت جوش)
  - آزمایش حک (برای تعیین سلامت جوش)
  - آزمایش ضربه (برای تعیین مقاومت ضربه‌ای و استحکام جوش)

تذکر: به‌طور کلی آزمایش ضربه از نظر نحوهٔ اعمال نیروی دینامیکی برای شکست نمونه در دو حالت آزمایش ایزود و آزمایش شارپی انجام می‌شود.

۲ **آزمایش‌های غیرمخرب:** آزمایش‌های غیرمخرب در برنامه کنترل کیفیت (QC) قرار می‌گیرند و از آن برای تأیید جوش تمام شده استفاده می‌شود. انواع آزمایش‌های غیرمخرب عبارتند از:

جدول ۱۵: آزمایش‌های غیرمخرب جوش

نام آزمایش	نماد	کاربرد
بازرسی با مواد نافذ	PT	محل‌یابی معایب سطحی با مواد نافذ مانند رنگ قرمز
آزمون ذرات مغناطیسی	MT	بررسی و بازبینی عیوب سطحی و نزدیک به سطح ورق ویژهٔ فلزات مغناطیسی‌شونده
آزمون فراصوتی	UT	تشخیص معایب داخلی با استفاده از انتشار امواج از فرستنده
آزمون پرتونگاری	RT	نشان دادن نوع و محل عیوب داخلی و بسیار ریز (میکروسکوپی) با پرتو گاما و x
آزمون جریان گردابی	ECT	آشکارسازی معایب و نواقص در مصالح با استفاده از انرژی الکترومغناطیسی
آزمون نشت	—	تعیین نشت یا تراوش مایعات در فشار زیاد با استفاده از آب، هوا یا روغن تحت فشار
آزمایش سختی	—	تعیین سختی فلز جوش و فلز پایه در محدودهٔ جوشکاری

نکته: تمام بازرسی‌های غیرمخرب جوشکاری را می‌توان بلافاصله بعد از خنک شدن جوش انجام داد. تنها در مورد جوشکاری فولادهای خیلی پرمقاومت ($F_y > ۶۰۰۰ kg/cm^۲$) بازرسی‌ها ۴۸ ساعت بعد از خنک شدن آغاز می‌شود.

نمونه سؤالات بحث (۷)

تمرین ۲۶: اگر در هنگام جوشکاری بارندگی آغاز شود، مهندس ناظر چه دستوری باید صادر کند؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) استفاده از پیش‌گرمایش
۲) استفاده از خشک‌کن الکترود
۳) بهره‌گیری از برس سلیمی
۴) قطع عملیات جوشکاری

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲۷: در ساختمان‌های فولادی در چه موردی انجام آزمایش‌های غیرمخرب اجباری است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۵)

۱) اتصالات پیچی در قاب‌های خمشی
۲) جوش اتصالات بادبندها در قاب‌ها
۳) جوش اتصالات خمشی در کلیه سیستم‌های دوگانه فولادی
۴) اتصالات جوش بین اعضای اصلی قاب‌های خمشی ویژه

حل: در اتصالات پیچی آزمایشات غیرمخرب موضوعیتی ندارد. در مورد سایر موارد مطرح شده در سؤال می‌توان گفت در حالت کلی انجام آزمایشات غیرمخرب روی جوش‌های مختلف یک سازه، امری لازم و مفید می‌باشد و همان‌طور که در جدول مشاهده کردید بادبندها نیز از این قاعده مستثنی نیستند. احتمالاً منظور طراح اهمیت بیشتر بوده که در این صورت اعضای اصلی قاب‌های خمشی ویژه از اهمیت بیشتری برخوردارند و انجام آزمایش‌های غیرمخرب برای آنها ضروری‌تر است. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲۸: اگر در هنگام جوشکاری وزش باد شروع شود، مهندس ناظر باید دستور استفاده از کدام مورد را صادر نماید؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) الکترود کم هیدروژن
۲) چادر
۳) گرمکن
۴) ماسک

حل: براساس مطالب درسنامه، جوشکاری در جریان باد ممنوع است. بنابراین چنانچه بتوان با استفاده از امکاناتی مانند چادر مانع از وزش باد به محل جوشکاری شد می‌توان به جوشکاری را ادامه داد. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۲۹: حداکثر دمای مجاز موضع گرم شده برای ایجاد انحنا در قطعات با فولاد پرمقاومت چند درجه سلسیوس است؟

۱) ۴۵۰
۲) ۶۵۰
۳) ۶۰۰
۴) ۵۶۵

● حل: براساس مطالب درسنامه، دمای موضع گرم شده نباید از ۶۵۰ درجه سلسیوس برای فولاد معمولی و ۵۶۵ درجهٔ سلسیوس برای فولاد پر مقاومت و آلیاژی بیشتر شود. بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

تمرین ۳۰: در مورد برش ورق فولادی با ضخامت $10mm$ گزینه صحیح را انتخاب کنید؟

۱) می‌توان از دستگاه گیوتین استفاده کرد.
۲) باید از دستگاه برش شعله ریلی استفاده کرد.
۳) باید قبل از برش، پیش گرمایش انجام شود.
۴) باید از اره یا برش دستی استفاده کرد.

● حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۱: در جوشکاری قطعات فولادی با $F_u = 520MPa$، در خصوص بازرسی چشمی جوش کدام گزینه صحیح است؟

۱) بازرس چشمی جوش باید حداقل ۷۲ ساعت بعد از تکمیل جوش انجام شود.
۲) بازرس چشمی جوش باید حداقل ۴۸ ساعت بعد از تکمیل جوش انجام شود.
۳) بازرسی چشمی جوش می‌تواند به محض خنک شدن جوش تا دمای محیط آغاز شود.
۴) بازرسی چشمی در جوشکاری این نوع فولاد مجاز نمی‌باشد.

● حل: براساس مطالب درسنامه، بازرسی عینی جوش‌ها به محض خنک شدن جوش تا دمای محیط آغاز گردد. در فولادهای خیلی پرمقاومت با تنش تسلیم بزرگتر از ۶۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، بازرسی‌های عینی باید ۴۸ ساعت بعد از تکمیل جوش انجام شود. بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

تمرین ۳۲: در ساختمان‌های فلزی در شرایط عادی، جوشکاری در چه حرارتی منع گردیده است؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) در گرمای محیط کمتر از ۴ درجه
۲) در دمای محیط کمتر از ۱۰- درجه
۳) در دمای محیط کمتر از ۴- درجه
۴) در دمای محیط زیر صفر درجه

● حل: با توجه به مفاهیم درسنامه و در شرایط عادی، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۳۳: استحکام اتصال جوش توسط کدام‌یک از آزمایشات زیر تعیین می‌شود؟

۱) آزمایش شیمیایی حک
۲) آزمایش خمش
۳) آزمایش ضربه
۴) آزمایش کشش

● حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۳۴: کدام‌یک از موارد زیر جزء آزمایش‌های مخرب جوش شیاری لب به لب محسوب نمی‌شود؟

۱) آزمایش کشش مقطع کاهش یافته
۲) آزمایش خمش هدایت شده
۳) آزمایش کشش بر روی نمونه تمام مصالح
۴) آزمون پرتونگاری

● حل: براساس نکات درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۵: کدام‌یک از موارد زیر در ردیف آزمایش‌های غیرمخرب بازرسی جوش قرار می‌گیرد؟

۱) آزمایش ذرات مغناطیسی
۲) آزمایش حک
۳) آزمایش ضربه
۴) آزمایش خمش هدایت شده

حل: با توجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۶: برای پخ‌زنی لبه یک ورق فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر، کدام‌یک از روش‌های زیر مجاز نیست؟

۱) استفاده از دستگاه پخ‌زنی
۲) سنگ‌زنی
۳) برش حرارتی
۴) براده‌برداری

حل: با توجه به مطالب درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۷: چند درصد از جوش‌های لب به لب طولی بال‌های کششی و اعضای کششی خرپاها باید بازرسی چشمی شوند؟

۱) ٪۲۰
۲) ٪۱۰
۳) ٪۱۰۰
۴) ٪۳۰

حل: بازرسی چشمی برای انواع جوش‌ها ٪۱۰۰ می‌باشد.
بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

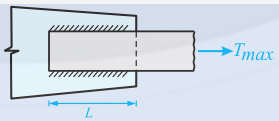
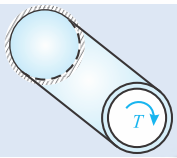
بحث ۸: طراحی جوش

هر یک از جوش‌هایی که در سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا توان لازم برای مقابله با بارهای وارده را داشته باشد. در این بحث مبانی طراحی جوش را با زبانی ساده مرور خواهیم کرد.

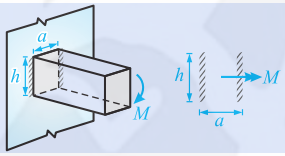
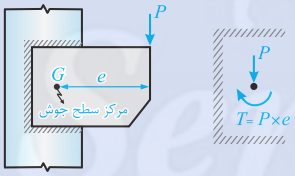
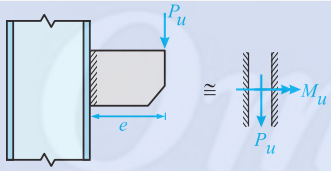
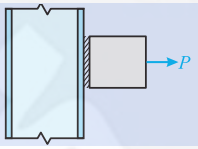
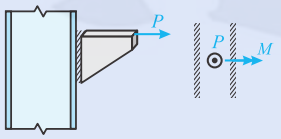
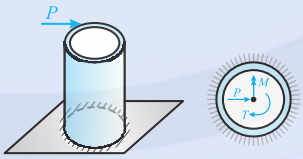
۸-۱- تحلیل تنش‌های وارد بر جوش

چند نمونه از مهم‌ترین اتصالات و تنش‌های وارد بر جوش در آنها را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

جدول ۱۶: انواع بارگذاری وارد بر جوش

ردیف	بارگذاری وارد بر جوش	شکل اتصال	توضیحات
۱	نیروی برشی خالص		● تنش‌های وارد بر جوش تنها از نوع برشی می‌باشد. ● مشخصه این حالت وارد شدن نیرو در مرکز سطح جوش است.
۲	لنگر پیچشی خالص		● تنش‌های وارد بر جوش به‌صورت برش ناشی از پیچش می‌باشد. ● در این حالت تنش‌ها با فاصله از مرکز سطح جوش رابطهٔ مستقیم دارند.

ادامهٔ جدول ۱۶: انواع بارگذاری وارد بر جوش

ردیف	بارگذاری وارد بر جوش	شکل اتصال	توضیحات
۳	لنگر خمشی خالص		تنش‌های وارد بر جوش تنش‌های نرمال (قائم) ناشی از خمش به‌صورت کششی و فشاری هستند.
۴	نیروی برشی و لنگر پیچشی		هر دو نیروی برشی و لنگر پیچشی تنش‌های برشی در یک صفحه مشترک تولید می‌کنند. در برخی نقاط که علامت تنش‌ها با هم یکسان است، تنش‌ها جمع شده و تنش بحرانی را تولید می‌کنند. لنگر پیچشی می‌تواند به‌صورت خالص یا ناشی از خروج از مرکزیت بار ایجاد شود. نیروی برشی و جوش‌ها در یک صفحه قرار دارند.
۵	نیروی برشی و لنگر خمشی		نیروی برشی تنش برشی و لنگر خمشی تنش‌های قائم در دو صفحه متعامد تولید می‌کنند. تنش بحرانی از جمع مجذور مربعات تنش در هر حالت به‌دست می‌آید. نیروی برشی و خط جوش در یک صفحه مشترک نیستند.
۶	نیروی محوری خالص		جوش تحت نیروی محوری، تنش‌های محوری کششی یا فشاری در آن ایجاد می‌شود. در این حالت لزوماً باید نیرو از مرکز سطح جوش عبور کند.
۷	نیروی محوری و لنگر خمشی		جوش تحت تنش‌های قائم و هم صفحه با تنش‌های ناشی از خمش قرار دارد. برای تنش بحرانی تنش در هر دو حالت با هم جمع جبری می‌شود. می‌تواند ناشی از خروج از مرکزیت نیروی محوری تولید شود.
۸	نیروی برشی، لنگر خمشی و لنگر پیچشی		نیروی برشی و لنگر پیچشی تنش برشی و لنگر خمشی تنش‌های قائم تولید می‌کند. برآیند تنش‌ها از جمع جبری تنش‌های برشی ناشی از برش، پیچش و در نهایت جمع برداری با تنش‌های قائم ناشی از خمش انجام می‌شود.
۹	برش خالص		جوش اتصال بال به جان باید جریان برش ایجاد شده را در محل مرز بال و جان منتقل کند.

۸-۲- مقاومت طراحی جوش

۱ مقاومت موجود جوش در طراحی به روش $LRFD$ مساوی ϕR_n و در طراحی به روش ASD مساوی $\frac{R_n}{\Omega}$ بوده که در آن مقادیر ϕ و Ω مطابق جدول (۱۷) تعیین می‌شوند و R_n مقاومت اسمی جوش است و باید به شرح زیر برابر کوچک‌ترین مقدار محاسبه شده براساس حالت‌های حدی مربوط به مصالح فلز پایه و حالت‌های حدی مربوط به فلز جوش در نظر گرفته شود:

الف) براساس مصالح فلز پایه

$$R_n = F_{nBM} A_{BM}$$

ب) براساس مصالح فلز جوش

$$R_n = F_{nw} A_{we}$$

که در آن:

F_{nBm}: تنش اسمی فلز پایه مطابق جدول (۱۷)

F_{nw} : تنش اسمی فلز جوش مطابق جدول (۱۷)

A_{BM} : سطح مقطع فلز پایه

A_{we}: سطح مقطع مؤثر جوش

۲ در جوش‌های گوشه به غیر از جوش‌هایی که تحت اثر نیروهای محوری کششی یا فشاری موازی با محور جوش قرار دارند، کلیهٔ تنش‌ها می‌تواند به‌صورت برشی بر روی سطح مقطع مؤثر جوش در نظر گرفته شود، در صورتی‌که جوش تحت اثر ترکیبی از لنگر خمشی، پیچشی، نیروی برشی و نیروی محوری قرار داشته باشد، تنش‌های مورد اشاره برآیند (به‌صورت برداری) تنش‌های ناشی از این نیروها خواهد بود که باید کمتر از مقاومت موجود جوش مطابق جدول (۱۷) باشد.

۳ **ترکیب انواع جوش‌ها**

اگر در یک اتصال از ترکیب دو یا چند نوع جوش به‌صورت مجموعه (جوش شیاری، جوش گوشه، جوش انگشتانه و جوش کام) استفاده شود، برای تعیین مقاومت موجود اتصال باید مقاومت موجود هر یک از جوش‌ها را جداگانه نسبت به محور مجموعهٔ جوش محاسبه و سپس مقاومت موجود مجموعه را از مجموع مقاومت‌های موجود تک تک جوش‌ها تعیین نمود.

جدول ۱۷: ضریب کاهش مقاومت و تنش اسمی برخی از جوش‌ها

نوع جوش	نوع تنش	ضریب کاهش مقاومت (ϕ)	تنش اسمی (F_{nw} یا F_{nBM})
جوش شیاری با نفوذ کامل	کششی یا فشاری	۰/۹	مقاومت تسلیم فلز پایه (F_y)
جوش گوشه	برشی	۰/۷۵	۰/۶ × مقاومت نهایی کششی فلز جوش ($0/6 F_{ue}$)
جوش کام و انگشتانه	برشی	۰/۷۵	۰/۶ × مقاومت نهایی کششی فلز جوش ($0/6 F_{ue}$)

تذکر ۱: گاهی اوقات طول جوش در اتصال باتوجه به هندسهٔ ورق و اتصال، جوابگوی بارهای وارده بر جوش نبوده و طراح از ترکیب جوش انگشتانه و گوشه برای جبران کمبود مقاومت استفاده می‌کند. در این شرایط هر یک از جوش‌ها به تنهایی در برابر بارهای اعمالی مقاومت می‌کنند و ظرفیت نهایی اتصال از ترکیب ظرفیت هر یک از جوش‌ها به‌دست می‌آید.

جوش کام همراه با جوش گوشه — جوش انگشتانه همراه با جوش گوشه

تذکر ۲: استفاده همزمان از چند نوع جوش در اتصال به شرط طراحی مناسب و درنظر گرفتن نیروهای وارد بر هر جوش و طراحی اصولی آنها برمبنای بار وارده باتوجه به رفتار جوش بلامانع است، اما باید جهت تنش‌ها و بارهای وارد بر جوش کاملاً مشخص شود. براساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان اگر از دو یا چند نوع جوش به‌صورت مجموعه (جوش شیاری، جوش گوشه، جوش انگشتانه و جوش کام) در یک اتصال استفاده شود، برای تعیین مقاومت طراحی مجموعه باید مقاومت طراحی مجموعه را از مجموع مقاومت‌های طراحی تک‌تک جوش‌ها تعیین نمود.

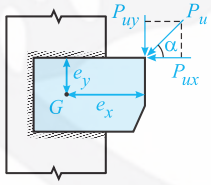
۸-۳- ارزش نهایی جوش گوشه

در جوش گوشه به حاصلضرب مقدار گلوی جوش (t_e) در تنش اسمی با ضریب ϕ، ارزش جوش گفته می‌شود و با R_{uw} نمایش داده می‌شود. در حقیقت ارزش جوش، مقاومت نهایی است که طول واحد جوش گوشه می‌تواند آن را تحمل کند.

$$R_{uw} = \phi F_{nw} t_e$$

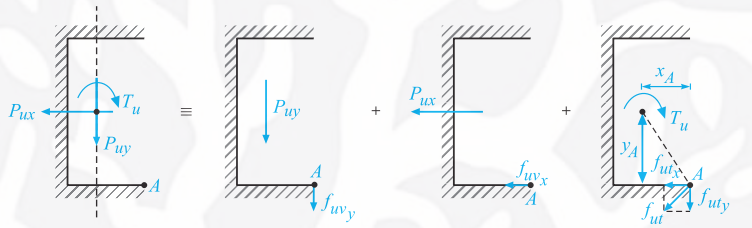
۸-۴- جوش گوشه تحت اثر توأم لنگر پیچشی و نیروی برشی

اتصال مقابل را در نظر بگیرید. این اتصال تحت اثر نیروی مورب P_u همراه با خروج از مرکزیت نسبت به مرکز سطح جوش (نقطهٔ G) می‌باشد. به‌منظور بررسی تنش‌های ایجاد شده در جوش، ابتدا نیروی P_u را به دو مؤلفهٔ P_{ux} و P_{uy} تجزیه می‌کنیم. با انتقال نیروهای P_{ux} و P_{uy} به مرکزسطح جوش، مجموعهٔ جوش تحت اثر دو نیروی برشی P_{ux} و P_{uy} و لنگر پیچشی T_u ناشی از خروج از مرکزیت این بارها قرار می‌گیرد.

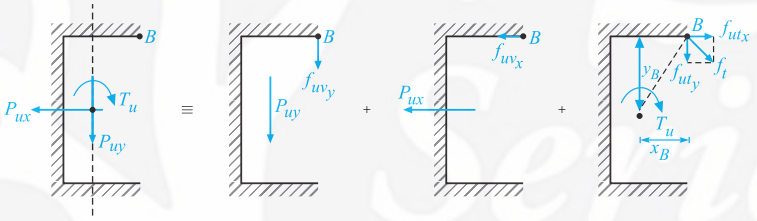


$$P_{ux} = P_u \cos\alpha \ , \ P_{uy} = P_u \sin\alpha$$
$$T_u = P_{uy} \times e_x - P_{ux} \times e_y$$

نیروهای برشی وارده بر جوش، تنش برشی در راستای نیرو ایجاد می‌کنند و لنگر پیچشی وارد بر جوش نیز تنش‌های برشی در راستای عمود بر خط واصل از مرکزسطح جوش به نقطهٔ مورد نظر تولید می‌کند. به‌منظور درک بهتر مطلب، تنش‌ها در دو نقطه از این اتصال در صفحه بعد نشان داده شده‌اند.



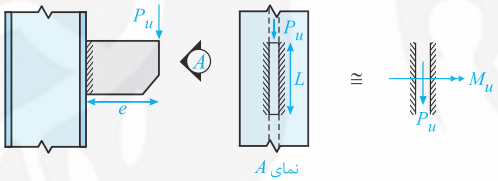
تنش‌های ایجاد شده در نقطهٔ A از جوش



تنش‌های ایجاد شده در نقطهٔ B از جوش

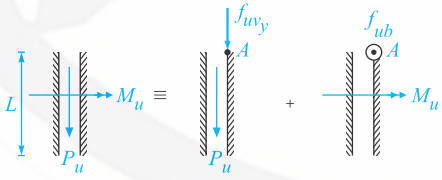
۸-۵- جوش گوشه تحت اثر توأم لنگر خمشی و نیروی برشی

شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن یک براکت به‌صورت عمود بر بال ستون قرار گرفته است و با استفاده از جوش گوشه، وجوه قائم براکت را به بال ستون متصل کرده‌ایم.



$$M_u = P_u \times e$$

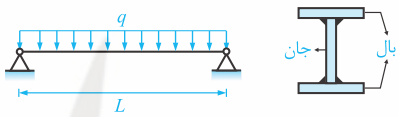
در این حالت اگر اتصال تحت اثر نیروی نهایی P_u همراه با خروج از مرکزیت باشد، با انتقال نیروی P_u به محل مرکزسطح جوش، لنگر خمشی نهایی به مقدار $M_u = P_u \times e$ روی جوش ایجاد می‌شود. همان‌طور که از قبل می‌دانیم، نیروی برشی P_u در جوش تنش برشی در جهت نیرو ایجاد می‌کند اما لنگر خمشی (M_u) باعث به‌وجود آمدن تنش‌های نرمال در جهت عمود بر صفحهٔ جوش می‌گردد.



توجه کنید که نقطهٔ A بیشترین فاصله را از مرکز سطح جوش دارد و تنش نرمال بزرگتری در آن ایجاد می‌شود. لذا نقطهٔ A بحرانی می‌باشد.

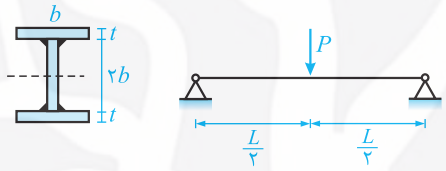
۸-۶- بررسی جوش اتصال بال به جان در تیر ورق‌ها

شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن با اتصال سه ورق به یکدیگر، یک تیر ورق ساخته‌ایم:



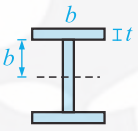
سؤال اساسی که مطرح می‌شود آن است که جوش اتصال بال به جان در تیر ورق بر چه مبنایی طراحی می‌شود؟ در جواب باید گفت که در یک تیر ورق، جوش اتصال بال به جان باید بتواند جریان برش را از بال به جان منتقل کند. در ادامه چگونگی جوش برای این بحث را در یک تمرین به شما آموزش می‌دهیم.

تمرین: در تیر زیر، برای اتصال بال به جان از جوش یکسره استفاده کرده‌ایم. اگر بعد جوش D، ممان اینرسی مقطع I و ارزش جوش R_w باشد، کنترل جوش این مقطع چگونه است؟



حل: برای پاسخ به این تمرین، گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

گام اول: با کمک مفاهیم مقاومت مصالح، جریان برش منتقل شده از بال به جان را محاسبه می‌کنیم:



$$q = \frac{V\,\boxed{Q}}{I} = \frac{V\left(bt \times \boxed{\left(b + \frac{t}{۲}\right)}\right)}{۲} = \frac{Vb^{۲}t}{I}$$

ممان استاتیک بال ← ، معمولاً برابر b فرض می‌شود. →

گام دوم: نیروی برشی بین بال و جان در طول L، از حاصل‌ضرب جریان برش در طول L به‌دست آمده و برابر است با:

$$\text{برش ایجاد شده} = q \times L = \frac{Vb^{۲}tL}{I}$$

گام سوم: عملاً در بالا، دو خط جوش بال را به جان وصل می‌کنند. برش قابل تحمل این دو خط جوش در طول L برابر است با:

$$\text{برش قابل تحمل توسط خط جوش} = ۲ \times \boxed{R_w \times L}$$

برش مقاوم هر خط جوش ←

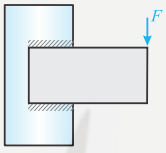
گام چهارم: برش قابل تحمل توسط خط جوش باید از برش وارده بزرگتر باشد و از این رابطه جوش طراحی می‌شود:

$$\text{برش وارده} \le \text{برش مقاوم} \Rightarrow \frac{Vb^{۲}tL}{I} \le ۲R_w L$$

دقت شود که V برش ایجاد شده در تیر دو سر مفصل است که در این سؤال، مقدار آن برابر $\frac{P}{۲}$ است. با این روند عملاً کفایت خط جوش موجود در مقطع را بررسی کردیم.

نمونه سؤالات بحث (۸)

تمرین ۳۸: در اتصال تسمه‌ای به ستون با اتصال جوش مطابق شکل عمل شده است. اگر نیروی F به تسمه وارد شود جوش تحت اثر کدام تنش‌ها محاسبه می‌شود؟ (دادگستری - ۷۹)



۱) تنش پیچشی و برشی
۲) تنش پیچشی و فشاری
۳) تنش خمشی و کششی
۴) تنش برشی

حل: براساس مفاهیم بیان شده در درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است. توجه داشته باشید که واژهٔ تنش پیچشی اصطلاحاً واژهٔ نادرستی است. در اثر لنگر پیچشی تنش برشی ناشی از پیچش ایجاد خواهد شد.

تمرین ۳۹: مبنای طراحی جوش اتصال بال به جان در تیر ورق‌ها چیست؟ (دادگستری - ۸۴)

۱) کمانش قائم جان تیر
۲) انتقال برش بین بال و جان
۳) لهیدگی یا جاری شدن جان در زیر بارهای سنگین
۴) لهیدگی بال در زیر بارهای سنگین

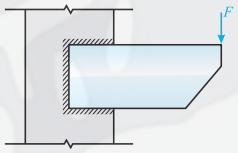
حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۰: مقاومت جوش لب به لب چقدر است؟ (دادگستری - ۸۶)

۱) مساوی یا بیشتر از مقاومت عضو اصلی
۲) حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد
۳) مساوی مقاومت عضو اصلی
۴) بیشتر از مقاومت عضو اصلی

حل: جوش لب به لب یا همان شیاری با نفوذ کامل یک جوش تمام قدرت است و طوری طراحی و اجرا می‌شود که پس از آزمایش، محل گسیختگی در جوش نباشد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۱: ورقی مطابق شکل به ستون جوش داده شده است. این جوش برای تحمل چه نیروهایی باید محاسبه شود؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۷)



۱) برش خالص
۲) ترکیب برش و خمش
۳) خمش خالص
۴) ترکیب برش و پیچش

حل: براساس مفاهیم بیان شده در درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۲: ضریب φ در جوشکاری هنگامی که جوش در محل انجام شود و توسط افراد مجرب بازرسی چشمی شود، چقدر است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۳)

۱) ۰/۶ ۲) ۰/۷۵ ۳) ۰/۸۵ ۴) ۱

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۳: ارزش جوش عبارتست از: (دادگستری - ۸۱)

۱) حاصل ضرب طول جوش در گلوی مؤثر جوش
۲) حاصل ضرب گلوی مؤثر جوش در تنش مجاز جوش
۳) حاصل ضرب طول جوش در تنش مجاز جوش
۴) حاصل ضرب طول جوش در ساق جوش

حل: براساس مطالب درسنامه، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۴: در صورت استفاده از چند نوع جوش در یک اتصال ظرفیت مجاز جوش چگونه محاسبه می‌شود؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۱)

۱) ظرفیت مؤثر هر یک از جوش‌ها به‌طور جداگانه نسبت به محور مجموعه جوش محاسبه شده و سپس ظرفیت مجاز مجموعه را تعیین می‌کنند.

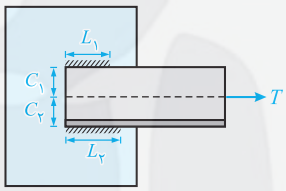
۲) به علت تنش‌های پسماند ناشی از عملیات جوشکاری ضعیف‌ترین ظرفیت نوع جوش ملاک طراحی می‌باشد.

۳) ترکیب چند نوع جوش در یک اتصال مجاز نیست، زیرا به علت تغییرات سختی در انواع جوش‌ها توزیع نیروها یکسان نخواهند بود.

۴) با توجه به اینکه نوع جوش با ظرفیت بیشتر سهم بالاتری در مقاومت اتصال خواهد داشت مبنی‌بر محاسبات اتصال براساس نوع جوش با ظرفیت بیشتر خواهد بود.

حل: براساس مفاهیم ارائه شده در درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۵: برای طراحی بهینهٔ جوش نبشی به ورق، کدام رابطه باید برقرار باشد؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۷)



۱) $\frac{L_1}{L_2}=\frac{C_1}{C_2}$

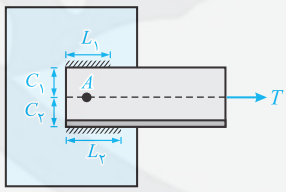
۲) $\frac{L_1}{L_2}=\frac{C_2}{C_1}$

۳) $\frac{L_1}{L_2}=\frac{C_1}{2C_2}$

۴) $\frac{L_1}{L_2}=\frac{C_2}{2C_1}$

حل: باتوجه به مفاهیم بیان شده، طراحی جوش زمانی بهینه خواهد شد که امتداد نیروی T از مرکز سطح جوش عبور کند. در این صورت جوش‌ها تنها تحت نیروی برشی بوده و در آنها تنش‌های اضافی ناشی از لنگر پیچشی ایجاد نخواهد شد.

بنابراین با فرض قرارگیری مرکز سطح جوش در امتداد نیروی T داریم:

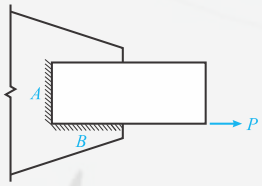


$$\sum M_A = 0 \Rightarrow F_1 \times C_1 = F_2 \times C_2$$

$$\begin{cases} F_1 \times C_1 = F_2 \times C_2 \\ F = R_w \times L \\ (R_w)_1 = (R_w)_2 \end{cases} \Rightarrow L_1 \times C_1 = L_2 \times C_2 \Rightarrow \frac{L_1}{L_2}=\frac{C_2}{C_1}$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۶: در اتصال زیر، هر یک از جوش‌های A و B براساس کدام‌یک از بارگذاری‌ها باید طراحی شوند؟

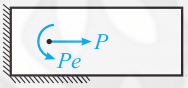


۱) خمش و برش - پیچش و برش

۲) پیچش و برش - خمش و برش

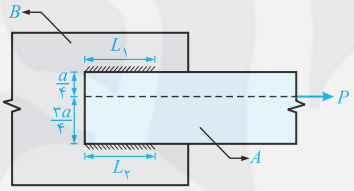
۳) پیچش و برش - پیچش و برش

۴) پیچش و برش - برش



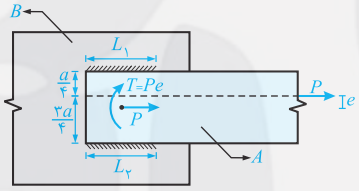
حل: نیروی P در صفحه جوش‌ها بوده و خمش ایجاد نمی‌شود. با انتقال نیروی P به مرکز سطح جوش‌ها، یک لنگر پیچشی نیز به وجود می‌آید و هر دو جوش باید برای برش و پیچش طراحی شوند. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۴۷: در شکل زیردر مورد نیروی وارد بر جوش گوشه و طول‌های L_1 و L_2 گزینه صحیح را انتخاب کنید.



۱) جوش تحت نیروی برشی و لنگر پیچشی و L_1 بزرگ‌تر از L_2
۲) جوش تحت نیروی کششی و لنگر پیچشی و L_1 بزرگ‌تر از L_2
۳) جوش تحت نیروی برشی و لنگر خمشی و L_1 بزرگ‌تر از L_2
۴) جوش تحت نیروی برشی و لنگر خمشی و L_1 کوچک‌تر از L_2

حل: با انتقال نیروی P به مرکز اتصال جوشی، به‌دلیل هم صفحه بودن نیرو و جوش، یک لنگر پیچشی نیز علاوه‌بر نیروی برشی ایجاد خواهد شد و گزینهٔ (۱) صحیح است. اگر طول L_1 بیشتر از L_2 باشد، مرکز اتصال جوشی به سمت بالا جابه‌جا شده و به امتداد نیروی P نزدیک‌تر خواهد شد. بنابراین فاصله e کاهش یافته و لنگر پیچشی وارد بر اتصال کمتر و در نتیجه تنش‌های وارد بر جوش کاهش می‌یابد.

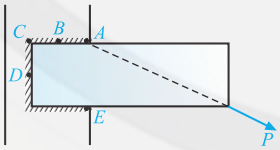


تمرین ۴۸: در صورتی‌که در یک جوش به جای انجام آزمایش اولتراسونیک، جوشکاری در محل و با بازرسی چشمی صورت گیرد، مقاومت جوش چه تغییری می‌کند؟

۱) ۱۵ درصد کاهش ۲) ۲۵ درصد افزایش ۳) ۱۵ درصد افزایش ۴) ۲۵ درصد کاهش

حل: در آزمایش اولتراسونیک ضریب β برابر ۱ و در بازرسی چشمی در محل برابر ۰/۷۵ می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت مقاومت جوش ۲۵ درصد کاهش می‌یابد و گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۹: بحرانی‌ترین نقطه در جوش شکل داده شده، عبارت است از:



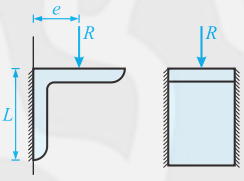
۱) A ۲) C
۳) A و E ۴) B و D

حل: تنها در نقطهٔ A، تنش‌های f_{T_x} و f_{V_x} و همچنین تنش‌های f_{T_y} و f_{V_y} با یکدیگر هم‌جهت بوده و از طرفی این نقطه بیشترین فاصلهٔ را از مرکز سطح جوش‌ها داشته و بیشترین تنش‌های برشی ناشی از پیچش را دارد. بنابراین این نقطه از جوش، بحرانی‌ترین نقطه برای طراحی اتصال جوشی می‌باشد و گزینهٔ (۱) صحیح است.

$$f_{V_x}=\frac{P_x}{A}\ ,\ f_{V_y}=\frac{P_y}{A}\ ,\ f_{T_x}=\frac{Ty}{J}\ ,\ f_{T_y}=\frac{Tx}{J}$$

تذکر: در هنگام محاسبهٔ تنش‌ها در شکل فوق، نیروی P به مرکز سطح جوش‌ها منتقل شده است و این اتصال تحت اثر نیروی برشی و لنگر پیچشی قرار دارد.

تمرین ۵۰: حداکثر تنش در جوش اتصال ساده با نبشی نشیمن انعطاف‌پذیر، چقدر است؟ (از برگشت جوش صرف‌نظر می‌شود)



۱) $f = \frac{R}{L}\sqrt{۳e^۲ + L}$

۲) $f = \frac{R}{۲L}\sqrt{۱+(\frac{۶e}{L})^۲}$

۳) $f = \frac{R}{۲L}$

۴) $f = \frac{۳Re}{L^۲}$

حل: این جوش تحت اثر نیروی برشی $V = R$ و لنگر خمشی $M = Re$ قرار دارد و تنش محاسباتی آن عبارت است از:

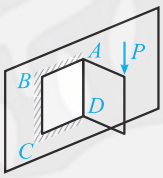
$$f_V = \frac{V}{A} = \frac{R}{۲Lt_e} \quad , \quad f_b = \frac{M}{S} = \frac{Re}{۲ \times \frac{t_e L^۲}{۶}}$$

$$f = \sqrt{f_V^۲ + f_b^۲} = \sqrt{(\frac{R}{۲Lt_e})^۲ + (\frac{۶Re}{۲t_e L^۲})^۲}$$

$$f = \frac{R}{۲Lt_e}\sqrt{۱+(\frac{۶e}{L})^۲} \xrightarrow{t_e = ۱ \text{ فرض}} f = \frac{R}{۲L}\sqrt{۱+(\frac{۶e}{L})^۲}$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۵۱: مطابق شکل یک نبشی به یک ورق جوش شده و در انتهای لبه آن تحت اثر بارگذاری قرار گرفته است. بحرانی‌ترین نقطه جوش کدام نقطه است؟



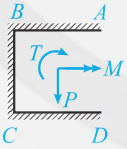
۱) نقطه A

۲) نقطه B

۳) نقطه C

۴) نقطه D

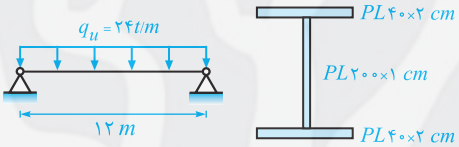
حل: اگر نیروی P را به مرکز سطح جوش‌ها منتقل کنیم، مشاهده می‌کنیم که جوش $ABCD$ تحت اثر نیروی برشی P، لنگر خمشی M و لنگر پیچشی T قرار دارد. تحت اثر نیروی برشی P، تنش برشی کلیه نقاط جوش، یکسان است.



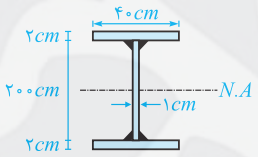
تحت اثر لنگر خمشی M، نقاط واقع در خطوط جوش فوقانی و تحتانی متحمل بیشترین تنش‌ها هستند، با این تفاوت که ماهیت تنش‌ها در خط جوش AB به‌صورت کششی و در خط جوش CD به‌صورت فشاری می‌باشد. تحت اثر لنگر پیچشی T، دورترین نقاط از مرکز سطح مجموعه جوش‌ها (D و A) بیشترین تنش برشی را دارند. با توجه به توضیحات فوق دیده می‌شود که تحت اثر بارگذاری وارده، تنش‌های ماکزیمم در نقاط A و D از جوش به‌وجود می‌آیند. با توجه به اینکه ناشی از لنگر خمشی M، تنش ایجاد شده در نقطه A کششی و تنش ایجاد شده در نقطه D فشاری است و جوش در کشش ضعیف‌تر از فشار است، نتیجه می‌شود نقطه A از نقطه D بحرانی‌تر است. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵۲: در تیر زیر درصورتی‌که تنش اسمی برشی مقاوم جوش $۲۵۲۰\ kg/cm^۲$ باشد، بعد جوش لازم محاسباتی اتصال بال به جان حدوداً چقدر است؟ (جوش اتصال بال به جان سراسری است، جوش در محل کارگاه است)

۱) ۳ میلی‌متر
۲) ۴ میلی‌متر
۳) ۵ میلی‌متر
۴) ۶ میلی‌متر



حل: براساس مطالب درسنامه داریم:



$$V_{max} = \frac{q_u L}{۲} = \frac{۲۴\times ۱۲}{۲} = ۱۴۴\ ton$$

$$q = \frac{VQ}{I_x} = \frac{۱۴۴\times ۱۰^۳ \times (۴۰\times ۲)\times \left(\frac{۲۰۰}{۲}+\frac{۲}{۲}\right)}{\frac{۱}{۱۲}(۴۰\times ۲۰۴^۳ - ۳۹\times ۲۰۰^۳)} \simeq ۵۰۶\ kg/cm$$

$$q\times L = \underbrace{۲}_{\text{دو خط جوش}} \times \phi F_{nw}\, L\, t_e \Rightarrow ۵۰۶ = ۲\times ۰/۷۵\times ۲۵۲۰\times t_e \Rightarrow t_e = ۰/۱۳۳\ cm$$

$$۰/۷۰۷\, a_w = t_e = ۰/۱۷۸ \Rightarrow a_w = ۰/۱۹\ cm \simeq ۲\ mm$$

حال با توجه به جدول حداقل بُعد جوش گوشه در آیین‌نامه، چون ضخامت ورق نازکتر برابر $۱۰\ mm$ است، حداقل بعد جوش گوشه $۵\ mm$ و حداکثر آن $۸\ mm$ است. پس جوش گوشه در این تست باید $۵\ mm$ بعد داشته باشد.

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین بیشتر

مهندس عزیز: پس از مطالعه این فصل، جهت بررسی سؤالات مرتبط با آن در آزمون‌های سال‌های ۸۸ به بعد به جدول انتهای کتاب مراجعه نمایید در این جدول شمارهٔ سؤالات مرتبط با این فصل در آزمون‌های مختلف مشخص شده است. جهت تمرین و تسلط بیشتر و آشنایی با سبک و سیاق طرح سؤالات در سال‌های اخیر به بررسی سؤالات بپردازید.

سری عمران

فصل هفتم:

استاتیک، مقاومت مصالح و تحلیل سازه‌ها

در این فصل مهمترین مباحث دروس استاتیک، مقاومت مصالح و تحلیل سازه‌ها که در آزمون‌های کارشناسی رسمی قوه قضائیه و دادگستری، مورد نظر طراحان سؤال می‌باشد برای شما شرح داده شده‌اند. اغلب مباحث این فصل شامل سؤالاتی مفهومی و محاسباتی می‌باشند و شما می‌توانید با حل مثال‌های قرار گرفته در هر بحث، مفاهیم درسی مرتبط با موضوع را بهتر یاد بگیرید. در جدول زیر مجموعه مباحث مطرح شده در این فصل و نیز تعداد سؤالات مطرح شده از آنها در آزمون‌های کارشناسی رسمی از سال ۸۸ تاکنون آورده شده است.

عنوان مجموعه مباحث	شمارهٔ بحث‌ها	تعداد سؤالات مطرح شده در آزمون‌های کارشناسی رسمی	
		قوهٔ قضائیه	دادگستری
تحلیل استاتیکی (تیر، قاب و خرپا) و تنش و کرنش	۱-۳	۷	۴
اعضای محوری	۴	۱	۱
مشخصات هندسی و خمش در مقاطع	۵	۴	۲
تنش برشی در اعضاء و مرکز برش	۶	۵	-
پیچش در مقاطع	۷	۲	۱
تغییر شکل تیرها و تقارن	۸	۳	۱

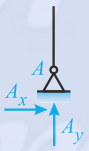
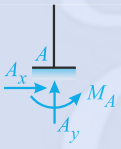
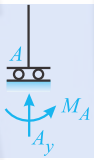
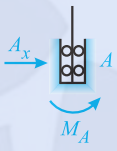
بحث ۱: تحلیل استاتیکی قاب‌های معین

شناخت نیروهای داخلی و عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی را می‌توان پایه‌ای‌ترین موضوع و مفهوم و پیش‌نیاز حل بسیاری از مسائل در مکانیک جامدات دانست.
بنابراین در این بحث به بررسی مهم‌ترین موارد آن خواهیم پرداخت.

۱-۱- عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی

هر سازه به وسیلهٔ یک سری تکیه‌گاه به زمین متصل می‌شود که معروف‌ترین آنها به همراه تعداد عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی‌شان به شرح جدول زیر می‌باشد:

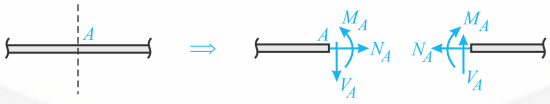
جدول ۱: انواع تکیه‌گاه‌ها

نام تکیه‌گاه	مفصلی	غلتکی	گیردار	گیردار غلتکی	محوری	ترکیبی
شکل شماتیک						
تعداد عکس‌العمل (r)	$r=۲$	$r=۱$	$r=۳$	$r=۲$	$r=۲$	$r=۱$

هریک از عکس‌العمل‌ها در واقع یک قید در برابر یک حرکت می‌باشند. به عنوان مثال عکس‌العمل A_x بیانگر عدم حرکت تکیه‌گاه A در امتداد افق، عکس‌العمل A_y بیانگر عدم حرکت تکیه‌گاه A در امتداد قائم و عکس‌العمل M_A بیانگر عدم دوران تکیه‌گاه در صفحه می‌باشد. بنابراین صفر بودن هر یک از عکس‌العمل‌ها بیانگر آزاد بودن امکان حرکت در آن امتداد و راستا می‌باشد.

۱-۲- نیروهای داخلی

چنانچه در یک نقطهٔ پیوسته از یک عضو سازه‌ای، یک برش ایجاد کنیم نیروهای داخلی آن عضو به‌صورت زیر آزاد خواهند شد:



در این اتصال:
N_A: نیروی محوری در مقطع است که جهت مثبت آن از محور عضو به سمت خارج است.
V_A: نیروی برشی در مقطع است که جهت مثبت آن باعث دوران عضو به‌صورت ساعتگرد می‌شود.
M_A: لنگر خمشی در مقطع است که جهت مثبت آن باعث کشیدن تارهای پایین مقطع می‌شود.

۱-۳- معادلات تعادل

برای به‌دست آوردن مقادیر عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی و یا نیروهای داخلی در یک مقطع از قاب معین از معادلات تعادل صفحه بعد استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 & \text{(معادلهٔ تعادل در جهت افق)} \\ \sum F_y = 0 & \text{(معادلهٔ تعادل در جهت قائم)} \\ \sum M = 0 & \text{(معادلهٔ تعادل لنگر)} \end{cases}$$

تذکر: با توجه به اینکه تعداد معادلات تعادل ۳ می‌باشد، چنانچه تعداد مجهول‌ها (عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی یا نیروهای داخلی) در یک مقطع یا یک سازه برابر ۳ باشد، سازه قابل حل بوده و اصطلاحاً معین است.

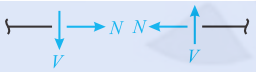
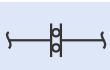
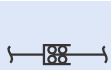
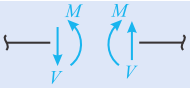
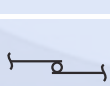
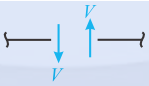
در ادامه برای سهولت و دسته‌بندی مطالب، قاب‌های معین را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنیم:

الف) قاب‌هایی که پیوسته‌اند و ناپیوستگی داخلی ندارند: این قاب‌ها پیوسته بوده و در آنها اتصالاتی نظیر مفصل خمشی یا برشی مشاهده نمی شود. بنابراین برای محاسبهٔ عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی قاب تنها کافی است معادلات تعادل را روی کل قاب نوشته و مجهولات را به‌دست آوریم. در این قاب‌ها چنانچه نیروی داخلی در یکی از نقاط داخلی قاب مدنظر باشد، کافی است آن نقطه را برش زده و پس از آزاد شدن نیروهای داخلی مقطع، تعادل هر قسمت را جداگانه بررسی نماییم.

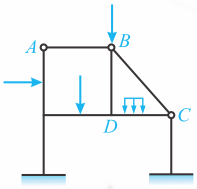
ب) قاب‌هایی که ناپیوستگی داخلی دارند: چنانچه قاب دارای ناپیوستگی نظیر مفصل خمشی، مفصل برشی یا غلتک باشد و نیروی داخلی موردنظر با نوشتن یکبار معادلات تعادل به‌دست نیاید، بایستی قاب را از محل ناپیوستگی خارج و تعادل هر یک از قسمت‌های جدا شده را بررسی کرد.

تذکر: در هنگام جداسازی قاب، به نیروهای داخلی محل ناپیوستگی مطابق جدول زیر توجه کنید.

جدول ۲: نیروهای داخلی در اتصالات

	اتصال پیوسته	اتصال جداشده	توضیحات
عضو پیوسته			$M \neq 0 \, , V \neq 0 \, , N \neq 0$
مفصل خمشی			$M = 0 \, , V \neq 0 \, , N \neq 0$
مفصل برشی			$M \neq 0 \, , V = 0 \, , N \neq 0$
مفصل محوری			$M \neq 0 \, , V \neq 0 \, , N = 0$
غلتک			$M = 0 \, , V \neq 0 \, , N = 0$

تذکر مهم: در یک عضو دو سر مفصل، مستقیم و فاقد بارگذاری بر روی آن (بارگذاری از جنس نیرو بر روی گره‌های ابتدایی و انتهایی مشکلی ندارد)، تنها نیروی محوری کششی یا فشاری ایجاد می‌شود و این عضو، عملکرد خرپایی دارد.

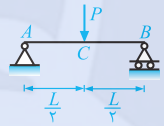
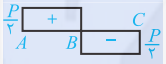
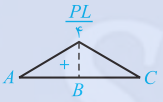
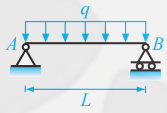
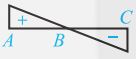
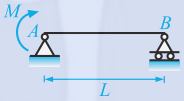
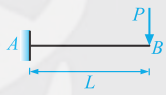
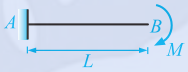
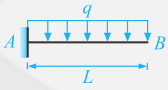
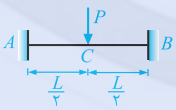
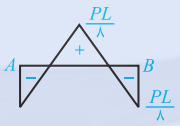
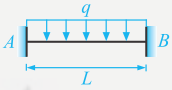
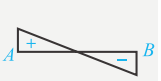
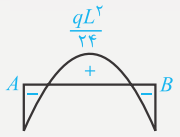


$\Longrightarrow$ در عضوهای AB و BC تنها نیروی محوری می‌تواند ایجاد شود و برش و لنگر در آنها صفر است.

۱-۴- نمودارهای نیروی برشی و لنگر خمشی

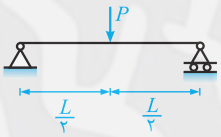
یکی از مهم‌ترین نتایج تحلیل سازه‌ها رسم نمودارهای نیروی برشی و لنگر خمشی در اعضاء سازه می‌باشد که برای طراحی اعضاء استفاده می‌شود. در جدول زیر نمودارهای نیروی برشی و لنگر خمشی تیرهای متداول و معروف را تحت بارگذاری‌های خاص مشاهده می‌کنید.

جدول ۳: نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی تیرهای معروف

ردیف	شکل تیر	نمودار نیروی برشی	نمودار لنگر خمشی	R_A	R_B	V_{max}	M_{max}
۱				$\frac{P}{۲}$	$\frac{P}{۲}$	$\frac{P}{۲}$	$\frac{PL}{۴}$
۲				$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL^۲}{۸}$
۳				$-\frac{M}{L}$	$+\frac{M}{L}$	$\frac{M}{L}$	M
۴				P	-	P	PL
۵		صفر		۰	-	۰	M
۶				qL	-	qL	$\frac{qL^۲}{۲}$
۷				$\frac{P}{۲}$	$\frac{P}{۲}$	$\frac{P}{۲}$	$\frac{PL}{۸}$
۸				$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL}{۲}$	$\frac{qL^۲}{۱۲}$

نمونه سؤالات بحث (۱)

تمرین ۱: برای تیر نشان داده شده در شکل، چنانچه طول آن دو برابر شود، کدام‌یک از جملات زیر صحیح می‌باشد؟



۱) لنگر ماکزیمم ۴ برابر و نیروی برشی ماکزیمم ۲ برابر می‌شود.
۲) لنگر ماکزیمم ۲ برابر و نیروی برشی ماکزیمم ۲ برابر می‌شود.
۳) لنگر ماکزیمم ۲ برابر و نیروی برشی ماکزیمم ثابت می‌ماند.
۴) لنگر ماکزیمم ۴ برابر و نیروی برشی ماکزیمم ثابت می‌ماند.

حل: با توجه به جدول می‌توان دریافت مقادیر نیروی برشی ماکزیمم و لنگر خمشی حداکثر برای تیر دو سرمفصل تحت بار متمرکز در وسط دهانه (تیر شمارهٔ (۱)) برابر است با:

$$V_{max}=\frac{P}{۲} \quad , \quad M_{max}=\frac{PL}{۴}$$

بنابراین می‌توان گفت نیروی برشی حداکثر مستقل از طول تیر (L) و لنگر خمشی حداکثر با طول تیر رابطهٔ مستقیم دارد. پس با ۲ برابر شدن طول تیر نیروی برشی حداکثر ثابت و لنگر خمشی حداکثر ۲ برابر خواهد شد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲: در شرایط یکسان با طول و شدت بار گستردهٔ یکنواخت ثابت، مقطع کدام‌یک از تیرهای زیر باید برای لنگر خمشی بیشتری طراحی شود؟ (دادگستری - ۷۳)

۱) تیر دو سر مفصل
۲) تیر طره
۳) تیر دو سر گیردار
۴) همه یکسان هستند.

حل: با توجه به اینکه طول همهٔ تیرها ثابت و شدت بار گستردهٔ وارد بر آنها یکسان است می‌توان با استفاده از جدول درسنامه، مقادیر حداکثر لنگر خمشی آنها را با هم مقایسه نمود:

$$\begin{cases} (۱)\ \text{تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده یکنواخت}: M_{max}=\dfrac{qL^{۲}}{۸} \\ (۲)\ \text{تیر طره (کنسول) تحت بار گسترده یکنواخت}: M_{max}=\dfrac{qL^{۲}}{۲} \\ (۳)\ \text{تیر دو سرگیردار تحت بار گسترده یکنواخت}: M_{max}=\dfrac{qL^{۲}}{۱۲} \end{cases} \Rightarrow M_{۲}>M_{۱}>M_{۳}$$

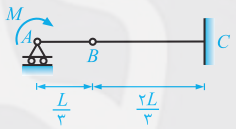
بنابراین مقدار حداکثر لنگر خمشی در تیر طره از همه بیشتر بوده و این عضو باید برای لنگر خمشی بزرگتری طراحی شود. بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۳: نمودار لنگر خمشی نشان داده شده مربوط به کدام تیر است؟

۱) تیر دو سر گیردار با بار گستردهٔ یکنواخت
۲) تیر دو سر مفصل با بار گستردهٔ غیریکنواخت
۳) تیر یک سر مفصل ـ یک سرگیردار با بار گستردهٔ یکنواخت
۴) تیر دو سرگیردار با بار گستردهٔ غیریکنواخت

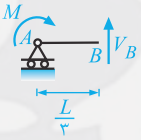
حل: باتوجه به نمودار نشان داده شده می‌توان دریافت که در دو سر تیر، لنگر خمشی مقداری منفی دارد در حالی‌که در تکیه‌گاه مفصلی لنگر خمشی صفر است. بنابراین گزینه‌های (۲) و (۳) نادرست هستند. از طرفی چون مقدار لنگر خمشی در تکیه‌گاه سمت راست و چپ هر دو منفی بوده و با هم برابر نیست می‌توان نتیجه گرفت اولاً هر دو تکیه‌گاه گیردار هستند و ثانیاً بار گسترده غیریکنواخت است. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴: در شکل زیر، لنگر تکیه‌گاهی چقدر می‌باشد؟



۱) $۲M$
۲) M
۳) $\frac{M}{۲}$
۴) $۳M$

حل: سازه مورد نظر معین است. بنابراین سازه را در محل مفصل خمشی جدا کرده و نیروی برشی را در این نقطه محاسبه می‌کنیم. لنگر تکیه‌گاه گیردار فقط ناشی از نیروی برشی منتقل شده از سمت چپ سازه می‌باشد.

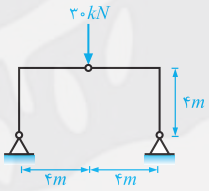


$$\sum M_A = ۰ \Rightarrow M = V_B \times \frac{L}{۳} \Rightarrow V_B = \frac{۳M}{L}$$

$$\sum M_C = ۰ \Rightarrow M_C = V_B \times \frac{۲L}{۳} = \frac{۳M}{L} \times \frac{۲L}{۳} = ۲M$$

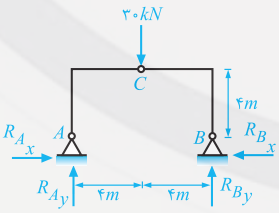
بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵: لنگر خمشی در بالای هر ستون برحسب $kN.m$ چقدر است؟ (اتصال میانه تیر مفصلی است)



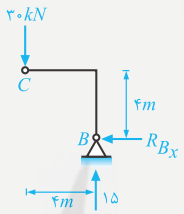
۱) ۴۵
۲) ۷۵
۳) ۱۲۰
۴) ۶۰

حل: سازه متقارن است و عکس‌العمل‌های قائم تکیه‌گاهی با هم برابر است. بنابراین خواهیم داشت:



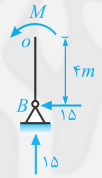
$$\begin{cases} \sum F_y = ۰ \Rightarrow R_{A_y} + R_{B_y} = ۳۰\,kN \\ \text{براساس تقارن} \Rightarrow R_{A_y} = R_{B_y} \end{cases} \Rightarrow R_{A_y} = R_{B_y} = ۱۵\,kN$$

سپس عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی در جهت افقی را به‌دست می‌آوریم:



$$\sum M_C = ۰ \Rightarrow ۱۵ \times ۴ = R_{B_x} \times ۴ \Rightarrow R_{B_x} = ۱۵$$

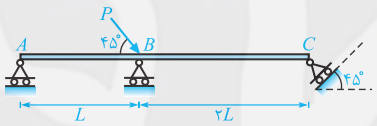
در نهایت لنگر در بالای ستون برابر است با:



$$\sum M_o = ۰ \Rightarrow M = ۱۵ \times ۴ = ۶۰\ kN.m$$

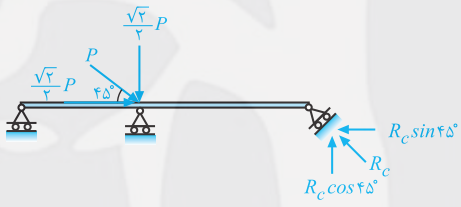
بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۶: مقدار لنگر در محل تکیه‌گاه B چقدر است؟ (قوهٔ قضائیه – ۸۷)



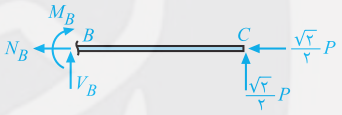
۱) صفر
۲) $\frac{\sqrt{۲}}{۲} PL$
۳) $\sqrt{۲}\, PL$
۴) $۲\sqrt{۲}\, PL$

حل: ابتدا نیروی P را تجزیه کرده و سپس معادلات تعادل را برای تیر موردنظر می‌نویسیم:



$$\sum F_x = ۰ \Rightarrow \frac{\sqrt{۲}}{۲} P - R_C \sin ۴۵^\circ = ۰$$
$$\Rightarrow R_C = P$$

اکنون برای محاسبه لنگر در نقطه B این نقطه را برش زده و داریم:



$$\sum M_B = ۰ \Rightarrow M_B - P \frac{\sqrt{۲}}{۲} \times ۲L = ۰$$
$$\Rightarrow M_B = \sqrt{۲}\, PL$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

بحث ۲: تحلیل خرپاهای معین

در خرپا، تنها نیروی محوری وجود دارد و اعضاء هیچگونه برش یا خمشی تحمل نمی‌کنند و بارگذاری تنها روی گره‌ها وارد می‌شود. برای محاسبهٔ نیروهای داخلی در خرپا، از روش‌های مفصل و مقطع استفاده می‌کنیم.

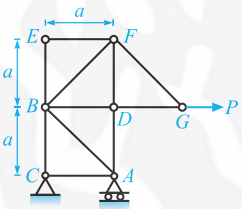
۲-۱- روش مفصل

در این روش هر یک از مفصل‌های خرپا را جداگانه در نظر می‌گیریم و معادلات تعادل در دو راستای دلخواه را برای آن می‌نویسیم تا نیروی محوری اعضاء به‌دست آید. بدیهی است برای تحلیل خرپا با این روش، از مفصل یا گرهی شروع می‌کنیم که اعضاء کمتری به آن متصل هستند.

با توجه به اینکه نیروی اعضای خرپا می‌تواند به‌صورت کششی یا فشاری باشد، در ابتدای حل، نیروی اعضای مجهول را به‌صورت کششی در نظر می‌گیریم. در نهایت چنانچه مقداری مثبت برای آن به‌دست آمد، فرض اولیه صحیح بوده و نیروی عضو موردنظر کششی می‌باشد. ولی چنانچه نیروی عضو مقداری منفی به‌دست آید، فرض نادرست بوده و نیروی عضو فشاری می‌باشد.

برای آموزش و درک بهتر به تمرین آموزشی زیر توجه نمایید.

تمرین: **نیروی داخلی همه اعضای خرپای مقابل را به‌دست آورید.**



حل: ابتدا با نوشتن معادلات تعادل برای کل سازه، عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی را محاسبه می‌کنیم:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow P - C_x = 0 \Rightarrow C_x = P \leftarrow$$

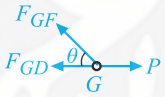
$$\sum M_C = 0 \Rightarrow P \times a - A_y \times a = 0 \Rightarrow A_y = P \uparrow$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - C_y = 0 \Rightarrow C_y = P \downarrow$$

در ادامه هر یک از مفصل‌های خرپا را جداگانه در نظر گرفته و تعادل آن را بررسی می‌کنیم. در این مرحله از گرهی شروع می‌کنیم که کمترین اعضا به آن متصل هستند. بنابراین ابتدا تعادل در گره E را بررسی می‌کنیم:

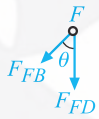
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow F_{EF} = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{EB} = 0 \Rightarrow F_{EB} = 0 \end{cases}$$

بررسی گره G:



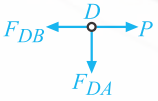
$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \Rightarrow F_{GF} \sin\theta = 0 \Rightarrow F_{GF} = 0 \\ \sum F_x = 0 \Rightarrow P - F_{GD} - F_{GF}\cos\theta = 0 \Rightarrow F_{GD} = P \quad \text{(کششی)} \end{cases}$$

بررسی گره F: نیروی اعضای FG و FE برابر صفر به‌دست آمده و داریم:



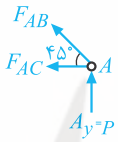
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow -F_{FB}\sin\theta = 0 \Rightarrow F_{FB} = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{FD} - F_{FB}\cos\theta = 0 \Rightarrow F_{FD} = 0 \end{cases}$$

بررسی گره D: نیروی عضو DG از مراحل قبل برابر P و کششی به‌دست آمده بنابراین معادل آن را روی گره D به‌صورت کششی اعمال می‌کنیم. هم‌چنین نیروی عضو DF برابر صفر به‌دست آمده و داریم:



$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow P - F_{DB} = 0 \Rightarrow F_{DB} = P \quad \text{(کششی)} \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{DA} = 0 \Rightarrow F_{DA} = 0 \end{cases}$$

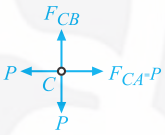
بررسی گره A: نیروی عضو AD صفر به‌دست آمد. هم‌چنین عکس‌العمل قائم تکیه‌گاه A برابر P و به سمت بالا می‌باشد. بنابراین داریم:



$$\begin{cases} \sum F_y = ۰ \Rightarrow F_{AB}\sin ۴۵^\circ + P = ۰ \Rightarrow F_{AB} = -\sqrt{۲}P = \sqrt{۲}P & \text{(فشاری)} \\ \sum F_x = ۰ \Rightarrow -(-\sqrt{۲}P)\cos ۴۵^\circ - F_{AC} = ۰ \Rightarrow F_{AC} = P & \text{(کششی)} \end{cases}$$

دقت کنید علامت منفی به‌دست آمده در قسمت اول نشان می‌دهد جهت انتخابی برای F_{AB} اشتباه بوده و نیروی آن فشاری است.

بررسی گره C: نیروی عضو CA از قسمت قبل برابر P و کششی به‌دست آمد. بنابراین آن را به گره C منتقل می‌کنیم. همچنین عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه C را نیز در این گره اعمال می‌کنیم:



تعادل در راستای افق برقرار است $\sum F_x = ۰ \Rightarrow P - P = ۰$

$$\begin{cases} \sum F_y = ۰ \Rightarrow F_{CB} - P = ۰ \Rightarrow F_{CB} = P & \text{(کششی)} \end{cases}$$

در پایان مشاهده می‌کنیم نیازی به بررسی گره B نیست و نیروی داخلی در تمام اعضا محاسبه شده است.

۲-۲- اعضای صفر نیرویی

براساس معادلات تعادل می‌توان به نتایج جالبی در مورد اعضای صفر نیرویی رسید که عبارتند از:

۱) هرگاه در گرهی تنها دو عضو غیر هم‌راستا به یکدیگر رسیده و هیچ باری روی گره اثر نکند، نیروی داخلی در هر دو عضو به این اعضاء، صفر نیرویی گفته می‌شود. (مانند گره‌های E و F در مثال قبل)

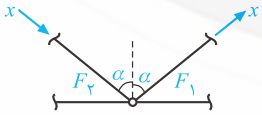
۲) اگر در یک گره از خرپا، سه عضو به یکدیگر رسیده و دو عضو از آنها هم‌راستا باشند، در صورتی‌که بر گره بارگذاری خارجی اثر نکند، عضو سوم الزاماً صفر نیرویی است (مانند گره D در مثال قبل)

۳) اگر در یک گره دو عضو از خرپا به یکدیگر رسیده و بار خارجی در راستای یکی از این اعضاء اثر کند، نیروی داخلی عضو دیگر لزوماً صفر است. (مانند گره G در مثال قبل)

۴) اگر در یک گره دو نیروی خارجی در راستای دو عضو بر گره اثر کنند، نیروی داخلی هر عضو برابر نیروی خارجی در همان راستا می‌باشد.

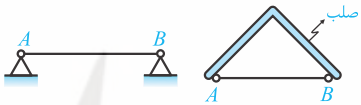
$$\Rightarrow \begin{cases} F_1 = F' \\ F_2 = F \end{cases}$$

۵) در یک گره فاقد بارگذاری مطابق شکل زیر، اگر معادلات تعادل را اعمال کنیم، با فرض اینکه نیروی میله (۱) را برابر x در نظر بگیریم، نیروی میله (۲) با استفاده از تعادل، برابر $-x$ به‌دست می‌آید.



$$\Rightarrow \begin{cases} F_1 = x \\ F_2 = -x \end{cases}$$

۶) چنانچه عضوی از خرپا بین دو تکیه‌گاه مفصلی (ثابت) یا دو سر یک عضو صلب قرار گیرد با توجه به عدم توانایی عضو در تغییر طول، نیروی داخلی آن الزاماً صفر خواهد بود.

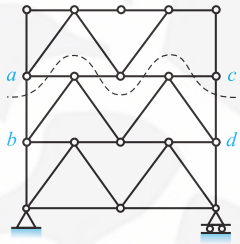


$F_{AB} = ۰$

۲-۳- روش مقطع

در این روش با زدن مقطعی دلخواه در خرپا و اعمال معادلات تعادل بر آن، نیروی اعضاء برش خورده محاسبه خواهد شد. با توجه به اینکه بر هر مقطع تنها سه معادله تعادل ($\sum F_x = ۰$ ، $\sum F_y = ۰$ ، $\sum M = ۰$) می‌توان اعمال کرد، بنابراین در یک مقطع مناسب باید تنها نیروی سه عضو مجهول باشد. یعنی برش انتخابی بهتر است به‌گونه‌ای باشد که تنها سه عضو را قطع کند. در این حالت برخلاف روش مفصل، می‌توان از معادله تعادل لنگر حول هر نقطه دلخواه استفاده کرد.

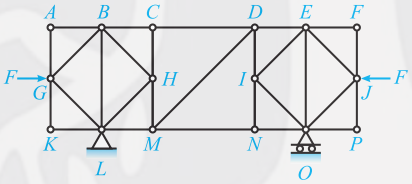
نکته: تحلیل خرپا به روش مقطع، مستلزم انتخاب مقطع و برش مناسب می‌باشد. در برخی از خرپاها انتخاب برش مناسب، کمک شایانی به حل مسئله می‌نماید. برای مثال خرپای شکل مقابل را درنظر بگیرید. با استفاده از معادلات تعادل روی کل خرپا، نیروهای مجهول با برش‌های نشان داده شده در شکل مقابل محاسبه می‌شوند:



$$\Rightarrow \begin{cases} \sum M_a = ۰ \Rightarrow & F_{cd} \text{ به‌دست می‌آید.} \\ \sum M_c = ۰ \Rightarrow & F_{ab} \text{ به‌دست می‌آید.} \end{cases}$$

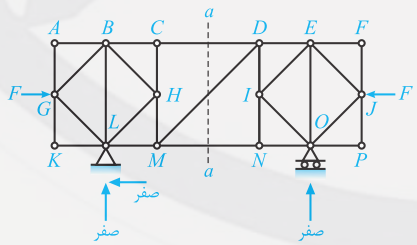
نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۷: تعداد اعضا با نیروی صفر در خرپای زیر چند عدد است؟



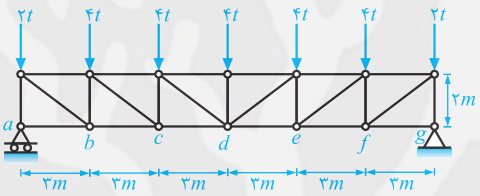
۱) ۱۴
۲) ۱۵
۳) ۱۶
۴) ۱۷

حل: طبق نکته (۱) بیان شده در درسنامه و با بررسی معادلات تعادل در گره‌های A ، F ، P و K می‌توان نتیجه گرفت اعضاء AB ، AG ، FE ، FJ ، PJ ، PO ، KL و KG صفر نیرویی می‌باشند. از طرفی با توجه به معادلات تعادل، عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها در این خرپا برابر صفر است.



با توجه به این موضوع با زدن مقطع $a-a$ در شکل صفحهٔ قبل و بررسی تعادل در راستای قائم برای سمت راست مقطع، نیروی محوری عضو DM برابر صفر به‌دست می‌آید. در این صورت طبق نکته (۲) درسنامه و با بررسی معادلات تعادل روی گره‌های C ، M ، D و N نیروی اعضای CH ، MH ، DI و NI نیز صفر خواهد بود. با صفر شدن نیروی این اعضا، مفاصل H و I شامل شرایط بیان شده در نکته (۱) درسنامه شده و در نتیجه نیروی اعضای HB ، HL ، IE و IO نیز صفر خواهد شد. بنابراین در این سازه با توجه به نوع بارگذاری وارده در مجموع ۱۷ عضو صفر نیرویی وجود دارد. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۸: در خرپای شکل زیر نیروی داخلی میله *cd* چند تن است؟ (قوه قضائیه – ۸۷)



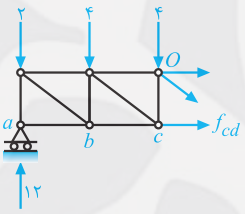
۱) ۲۴ تن کششی

۲) ۲۴ تن فشاری

۳) $۲۴\sqrt{۲}$ تن کششی

۴) ۴۸ تن کششی

حل: با توجه به تقارن عکس‌العمل‌های قائم با هم برابر بوده و با زدن برش مطابق شکل داریم:



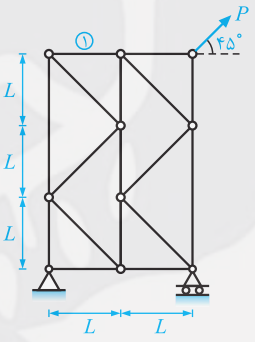
$$R_a = R_g = \frac{۲۴}{۲} = ۱۲t$$

$$\sum M_o = ۰ \Rightarrow ۱۲\times۶ - ۲\times۶ - ۴\times۳ - f_{cd}\times۲ = ۰$$

$$\Rightarrow f_{cd} = ۲۴t \text{ (کششی)}$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۹: نیروی عضو (۱) در خرپای نشان داده شده کدام است؟



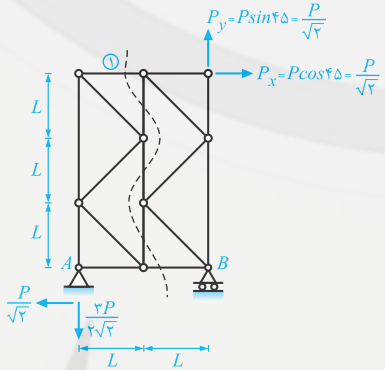
۱) $\frac{\sqrt{۲}}{۲}P$

۲) $\frac{\sqrt{۲}}{۴}P$

۳) $\sqrt{۲}P$

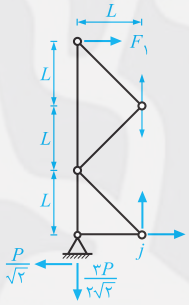
۴) $\frac{P}{۲}$

حل: ابتدا نیروی مایل P را در راستای افق و قائم تجزیه کرده و سپس عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه‌ها را محاسبه می‌کنیم.



$$\begin{cases} \sum F_x = ۰ \Rightarrow A_x = -\dfrac{P}{\sqrt{۲}} \\ \sum M_B = ۰ \Rightarrow A_y = -\dfrac{۳P}{۲\sqrt{۲}} \\ \sum F_y = ۰ \Rightarrow B_y = \dfrac{P}{۲\sqrt{۲}} \end{cases}$$

در ادامه طبق نکته بیان شده در روش مقطع، برای محاسبه نیروی عضو (۱) از مقطع شکل زیر استفاده می‌کنیم. همانطورکه مشاهده می‌کنید در این مقطع با لنگرگیری حول نقطه j نیروی همه اعضای قائم مقطع حذف خواهند شد و نیروی عضو (۱) به‌راحتی به‌دست خواهد آمد.



$$\sum M_j = 0 \Rightarrow \frac{3P}{2\sqrt{2}} \times L = F_1 \times 3L$$

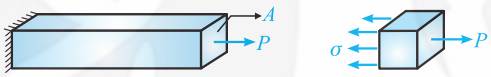
$$\Rightarrow F_1 = \frac{P}{2\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}P}{4} \quad \text{(کششی)}$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

بحث ۳: تنش و کرنش

تنش و کرنش را می‌توان ابتدایی‌ترین و البته پرکاربردترین مفاهیم در مقاومت مصالح دانست که در ادامه با بیان موارد زیر مهم‌ترین نکات آن را بررسی می‌کنیم.

۱ **تنش قائم:** نیروی عمود بر واحد سطح را تنش قائم (نرمال) می‌نامند و آن را با نماد σ نشان می‌دهند. تنش‌های قائم با توجه به جهت نیرو به دو صورت کششی (σ_t) و فشاری (σ_c) دسته‌بندی می‌شوند.

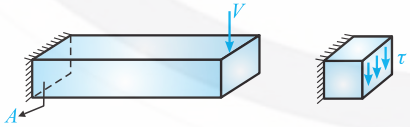


$$\sigma = \frac{P}{A}$$

در این رابطه P مقدار نیروی محوری و A سطح مقطع عضو است.

تذکر: واحد تنش با توجه به واحد نیرو و سطح از جنس نیرو بر طول به توان ۲ بوده و می‌تواند N/mm^2، kN/m^2، kg/cm^2، Pa (N/m^2) و یا psi (lb/in^2) که پوند بر اینچ مربع است) باشد.

۲ **تنش برشی:** اگر نیروی موازی سطح وارد شود تنش برشی در آن به‌وجود می‌آید. به عبارتی دیگر از تقسیم نیروی برشی (V) به مساحت (A) تنش برشی میانگین به‌دست می‌آید که آن را با نماد τ نشان می‌دهند.



$$\tau_{ave} = \frac{V}{A}$$

۳ **تنش لهیدگی:** تنش ایجاد شده در سطح تماس اعضای یک اتصال و یا سطح تکیه‌گاه اعضاء، تنش لهیدگی نام دارد که آن را با σ_b نشان می‌دهند. این تنش معمولاً در اتصالات بررسی می‌شود.

۴ **تنش پسماند:** تنش‌های ایجاد شده در مقاطع نورد شده در هنگام سرد شدن به دلیل سرعت سرد شدن متفاوت در نقاط مختلف را تنش پسماند می‌گویند. برای مطالعهٔ بیشتر در مورد این تنش‌ها می‌توانید به فصل فولاد مراجعه کنید.

۵ **کرنش قائم:** در اثر اعمال نیرو به سازه در المان‌های آن، تغییر شکل‌هایی رخ می‌دهد که تحت عنوان کرنش نامگذاری می‌شود. کرنش قائم را می‌توان تغییر طول واحد یک میله تحت نیروی فشاری یا کششی دانست که با نماد ε آن را نشان می‌دهند. به عبارتی دیگر کرنش قائم نسبت تغییر طول عضو به طول اولیه آن است و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_\circ}$$

تذکر: با توجه به رابطهٔ کرنش می‌توان گفت پارامتر کرنش بدون بُعد است.

۶ **کرنش برشی:** تغییر زوایای یک المان در اثر اعمال تنش‌های برشی است و با نماد γ نشان می‌دهند.

۷ **قانون هوک:** رابطهٔ بین تنش و کرنش را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد که به آن قانون هوک گفته می‌شود:

$$\sigma = E\,\varepsilon$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته یا مدول یانگ مصالح است و واحد آن مشابه تنش است. پارامتر E را می‌توان یک خاصیت مهم دانست که بیانگر توانایی مصالح مقطع برای مقاومت در مقابل تغییر شکل دادن می‌باشد. در ادامهٔ مطالب با کاربرد این پارامتر بیشتر آشنا خواهید شد.

۸ **قانون هوک برشی:** رابطهٔ بین تنش برشی و کرنش برشی را قانون هوک برشی می‌نامند.

$$\tau = G\gamma$$

در این رابطه G مدول برشی مقطع می‌باشد که بیانگر توانایی ماده برای مقاومت در برابر تغییر شکل‌های برشی است.

۹ **ضریب (نسبت) پواسون:** نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری یک عضو تحت تنش محوری را ضریب پواسون می‌نامند و آن را با نماد υ نشان می‌دهند. مقدار υ برای مواد مختلف متفاوت است. مثلاً برای فلزات بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ و برای بتن حدود ۰/۱ است.

$$\upsilon = \left|\frac{\text{کرنش جانبی}}{\text{کرنش محوری}}\right|$$

تذکر: چوب‌پنبه دارای کمترین ضریب پواسون $(\upsilon = 0)$ و لاستیک دارای بیشترین ضریب پواسون $(\upsilon = \frac{1}{2})$ در بین مواد می‌باشند. البته برخی کامپوزیت‌ها دارای ضریب پواسون منفی هم هستند.

نکته: با استفاده از ضریب پواسون می‌توان پارامترهای G و E را به هم مرتبط کرد:

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)}$$

۱۰ **تغییر دما:** با تغییر درجهٔ حرارت، مواد تمایل به تغییر شکل دارند به عنوان مثال یک میله را در نظر بگیرید. بدیهی است با افزایش دما، طول میله افزایش یافته و با کاهش دما، میله کاهش طول خواهد داد. تغییر طول یک عضو به طول اولیهٔ L و ضریب انبساط حرارتی α که تحت تأثیر تغییر درجهٔ حرارت ΔT قرار گرفته است، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید (واحد α، $\frac{1}{^\circ C}$ است):

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \Rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_\circ} = \frac{\alpha L_\circ \Delta T}{L_\circ} = \alpha \Delta T$$

۱۱ **تنش مجاز:** هر ماده‌ای در طبیعت توانایی تحمل نیروهای خاصی را دارد و چنانچه بیش از تاب ماده به آن نیرو وارد شود اصطلاحاً گسیخته خواهد شد. به عنوان مثال تنش مجاز چوب بسیار کمتر از فولاد است. بنابراین بارهای کمتری را می‌تواند تحمل کند. تنش مجاز از ویژگی‌های خود ماده است و آن را معمولاً با نماد σ_{all} یا τ_{all} نشان می‌دهند.

۱۲ **ضریب اطمینان:** همواره در طراحی المان‌های مختلف یک حاشیه امنیت در رسیدن مواد به تنش مجازشان در نظر می‌گیریم. به نسبت تنش نهایی وارد بر ماده به تنش مجاز آن ضریب اطمینان می‌گوییم. با توجه به تعریف ارائه شده ضریب اطمینان همواره بزرگتر از ۱ است و آن را با نماد $S.F$ یا $F.S$ نشان می‌دهیم.

نمونه سؤالات بحث (۲)

تمرین ۱۰: کدام‌یک از عبارت‌های زیر صحیح است؟

۱) قانون هوک تناسب بین نیروی وارد بر عضو و تغییر طول را بیان می‌کند.

۲) تحت یک نیروی ثابت با افزایش سطح مقطع تنش افزایش می‌یابد.

۳) حداکثر ضریب پواسون برای مواد مختلف برابر یک است.

۴) هرچه ضریب اطمینان بیشتر باشد نیروی کمتری می‌توان به عضو وارد کرد.

حل: با توجه به مفاهیم ارائه شده در درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۱۱: دو میلهٔ هم‌جنس و هم‌طول تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته‌اند. اگر نیروی میلهٔ اول ۲ برابر میلهٔ دوم و سطح مقطع میلهٔ اول ۳ برابر سطح مقطع میلهٔ دوم باشد، تنش نرمال میلهٔ دوم چند برابر میلهٔ اول است؟

۱) $\frac{۱}{۳}$ ۲) ۳ ۳) $\frac{۲}{۳}$ ۴) $\frac{۳}{۲}$

حل: با توجه به تعریف ارائه شده برای تنش داریم:

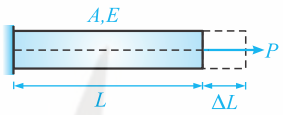
$$\begin{cases} P_۲ = P \Rightarrow P_۱ = ۲P \\ A_۲ = A \Rightarrow A_۱ = ۳A \end{cases} \Rightarrow \frac{\sigma_۲}{\sigma_۱} = \frac{\frac{P_۲}{A_۲}}{\frac{P_۱}{A_۱}} = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{۲P}{۳A}} = \frac{۳}{۲}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بحث ۴: اعضای محوری

اعضایی از سازه که صرفاً به‌صورت محوری (تحت نیروی فشاری یا کششی) بارگذاری می‌شوند (مانند اعضای خرپا) را اعضای محوری می‌نامند. در مورد این اعضاء می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱ در شکل زیر، میله‌ای با طول L و سطح مقطع ثابت A، تحت اثر نیروی محوری P واقع در مرکز سطح میله قرار دارد. میزان تغییر طول محوری این میله عبارت است از:



$$\Delta L = \frac{PL}{EA}$$

در این رابطه:

ΔL: تغییر طول میله L: طول اولیهٔ میله E: مدول الاستیسیته

A: سطح مقطع P: نیروی محوری ایجاد شده در عضو می‌باشد.

تذکر: مطابق آنچه در بحث قبلی بیان شد، اگر نیروی P به‌صورت کششی باشد میله افزایش طول و چنانچه نیروی P به‌صورت فشاری باشد میله کاهش طول خواهد داد.

نکته ۱: به حاصلضرب EA صلبیت محوری نیز گفته می‌شود. به عبارتی دیگر عامل اصلی در تعیین میزان تغییر طول و کرنش اعضای محوری پارامتر EA می‌باشد. بنابراین هرچه صلبیت محوری بیشتر باشد تمایل عضو برای تغییر طول کمتر است.

نکته ۲: به ماده‌ای که نقاط آن در اثر اعمال بار تغییر شکل و جابه‌جایی نداشته باشد **عضو صلب** می‌گوییم. به عبارتی دیگر صلبیت محوری عضو صلب آنقدر زیاد است که هیچ تغییر شکلی در آن ایجاد نخواهد شد.

عضو صلب : $EA=\infty \Rightarrow \Delta L=\frac{PL}{EA}=\frac{PL}{\infty}=0$

۲ مطابق شکل اگر یک میله به‌طول L و ضریب انبساط حرارتی α را علاوه بر نیروی کششی F، تحت بارگذاری حرارتی ΔT نیز قرار دهیم (دمای آن را به اندازهٔ ΔT افزایش دهیم) افزایش طول محوری آن تحت مجموع دو عامل عبارت است از:

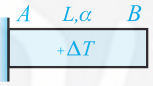
$$\Delta L=\underbrace{\frac{FL}{EA}}_{\text{ناشی از نیروی کششی } F}+\underbrace{\alpha L\Delta T}_{\text{ناشی از افزایش حرارت}}$$

تذکر: در صورتی‌که دمای عضو را کاهش دهیم (سرد کنیم) طول آن کاهش می‌یابد.

۳ عضو نامعین زیر را در نظر بگیرید. فرض کنید که دمای این عضو به اندازهٔ ΔT افزایش یافته است. با این افزایش دما، میلهٔ AB تمایل به افزایش طول به اندازهٔ $\alpha L\Delta T$ دارد که به‌دلیل ثابت بودن تکیه‌گاه‌ها، این امکان وجود ندارد. همین امر سبب ایجاد یک نیروی فشاری (R) در میله می‌شود که برای محاسبهٔ آن، یکی از تکیه‌گاه‌ها را آزاد کرده و با اعمال شرط سازگاری $\Delta_B=0$ در اثر مجموع حرارت و عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی داریم:

$$\xrightarrow{+}\ \Delta_B=0 \Rightarrow \underbrace{\alpha\Delta TL}_{\text{افزایش طول ناشی از حرارت}}+\underbrace{\frac{(-R)L}{EA}}_{\text{کاهش طول ناشی از نیروی فشاری}}=0 \Rightarrow R=EA\alpha\Delta T \Rightarrow \sigma=\frac{R}{A}=E\alpha\Delta T$$

در چنین سازه‌های نامعینی، با افزایش دما به جز در موارد خاص، در سازه نیروها و تنش‌های اضافی ایجاد می‌شود. این در حالی است که در میلهٔ معین زیر، با گرم کردن سازه، نقطهٔ انتهایی B به‌سادگی در راستای افق جابه‌جا شده و نیروی اضافی در آن ایجاد نمی‌شود.



$$\Delta_B = \alpha L \Delta T \quad ,$$

نکته: در حالت کلی چنانچه یک سازه معین باشد (مانند میلهٔ یکسرگیردار شکل فوق) تغییر درجهٔ حرارت، نقص هندسی (مانند کوتاه یا بلند بودن اعضاء) و نشست‌های تکیه‌گاهی در آن، تنش تولید نخواهد کرد، بلکه فقط نقاط سازه نسبت به هم آزادانه جابه‌جا شده و حرکت می‌کنند.

نمونه سؤالات بحث (٤)

تمرین ۱۲: تیر نشان داده شده در شکل زیر، تحت بارگذاری حرارتی به اندازهٔ ΔT گرم می‌شود. اگر سطح مقطع کل تیر نصف شود، تنش موجود در آن چه تغییری می‌کند؟

۱) نصف می‌شود.
۲) دو برابر می‌شود.
۳) تغییری نمی‌کند.
۴) با توجه به کمبود اطلاعات نمی‌توان اظهار نظر کرد.

حل: مشابه مورد بیان شده در درسنامه با توجه به اینکه تکیه‌گاه B مفصلی است، تغییرمکان نقطهٔ B صفر است. بنابراین مقدار تنش در تیر برابر است با:

$$\xrightarrow{+} \Delta_B = 0 \Rightarrow \alpha L \Delta T - \frac{RL}{EA} = 0 \Rightarrow \sigma = \frac{R}{A} = E\alpha\Delta T$$

ملاحظه می‌کنید تنش ایجاد شده در میله ناشی از حرارت در این حالت خاص که سطح مقطع میله ثابت است، مستقل از سطح مقطع بوده و تغییرات آن تأثیری در میزان تنش ندارد. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۱۳: دو میله هم‌جنس و هم‌طول تحت نیروی محوری کششی قرار می‌گیرند. اگر سطح مقطع میلهٔ دوم ۲ برابر میلهٔ اول و نیروی میلهٔ دوم ۴ برابر میلهٔ اول باشد، تغییر طول میلهٔ دوم چند برابر میلهٔ اول است؟

۱) ۲ ۲) $\frac{1}{2}$ ۳) ۴ ۴) $\frac{1}{4}$

حل: با توجه به رابطهٔ بیان شده برای تغییر طول میله برای مقایسه دو حالت داریم:

$$\Delta L = \frac{PL}{EA} \Rightarrow \frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{P_2}{P_1} \times \underbrace{\frac{L_2}{L_1}}_{1} \times \frac{A_1}{A_2} \times \underbrace{\frac{E_1}{E_2}}_{2} = \frac{P_2}{P_1} \times \frac{A_1}{A_2} = 4 \times \frac{1}{2} = 2$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

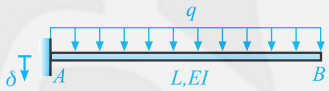
تمرین ۱۴: یک میله با مقطع دایره‌ای را مطابق شکل از سقف آویزان می‌کنیم و سپس به اندازهٔ ΔT آن را سرد می‌کنیم. وضعیت تنش در آن چگونه خواهد بود؟

۱) در نهایت تنشی در آن ایجاد نخواهد شد.
۲) تنها در اثر سرد کردن در آن تنش ایجاد می‌شود.
۳) تنها در اثر وزن در آن تنش ایجاد می‌شود.
۴) هم در اثر سرد کردن و هم در اثر وزن در آن تنش ایجاد می‌شود.

حل: در اثر وزن میلهٔ طول آن افزایش خواهد یافت و در آن تنش کششی ایجاد می‌شود اما در اثر کاهش دما هر چند طول میله کاهش خواهد یافت اما تنشی در آن ایجاد نخواهد شد. چون میله یکسرگیردار معین است. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تذکر: اگر سؤال در مورد جابه‌جایی انتهای میله پرسیده شده بود می‌توان گفت ابتدا افزایش طول و سپس کاهش طول می‌دهد اما پیدا کردن موقعیت دقیق انتهای میله بعد از رها کردن و سرد کردن با توجه به میزان وزن و دما مشخص می‌شود.

تمرین ۱۵: چنانچه تکیه‌گاه A در تیر طرهٔ نشان داده شده به میزان δ نشست کند، لنگر خمشی در این تکیه‌گاه نسبت به حالت ثابت چه تغییری خواهد کرد؟



۱) افزایش می‌یابد.
۲) کاهش می‌یابد.
۳) تغییر نمی‌کند.
۴) هیچ‌کدام

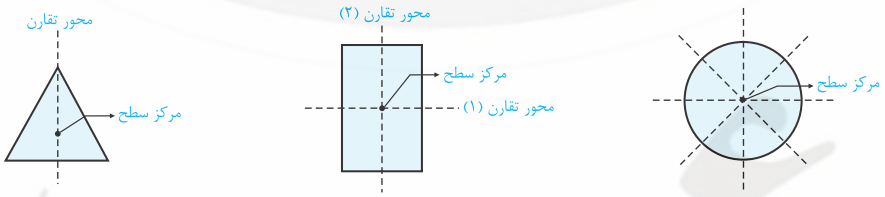
حل: تیر طره (یکسر گیردار) تنها ۳ عکس‌العمل تکیه‌گاهی دارد. بنابراین یک تیر معین است و نشست تکیه‌گاهی، لنگر خمشی اضافی در تکیه‌گاه آن ایجاد نخواهد کرد. بنابراین لنگر خمشی تکیه‌گاه A قبل و بعد از نشست برابر $\frac{qL^2}{2}$ می‌باشد و گزینهٔ (۳) صحیح است.

بحث ۵: بررسی خمش در مقاطع

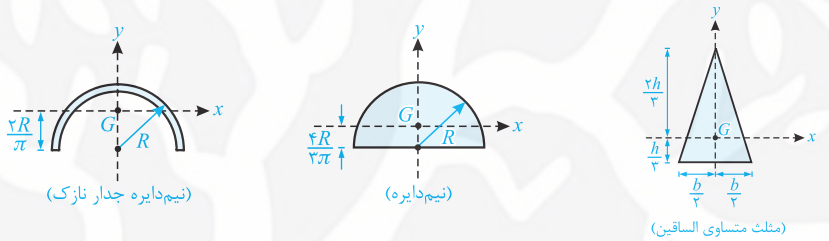
مهم‌ترین موضوع در درس مقاومت مصالح را می‌توان بررسی و محاسبهٔ تنش‌های ناشی از خمش در مقاطع دانست، چراکه در طراحی مقاطع فولادی و بتنی، به‌طور مستقیم با این موضوع سروکار خواهیم داشت. مطالب این بحث را می‌توان در بخش‌های مختلف دسته‌بندی کرد که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم.

۵-۱- مرکز سطح مقطع

۱) مرکز سطح یک مقطع همواره بر روی محور تقارن آن قرار می‌گیرد بنابراین اگر مقطع دارای یک محور تقارن باشد، مرکز سطح بر روی آن محور است (مانند مثلث) ، اگر مقطع دارای دو محور تقارن باشد، مرکز سطح در محل برخورد آن دو محور است (مانند مستطیل)، اگر مقطع دارای بیش از دو محور تقارن باشد، مرکز سطح در محل برخورد این محورها است (مانند دایره).



۲ مقاطع زیر از مقاطع هندسی معروف در مقاومت مصالح هستند که مرکز سطح آنها مشخص شده است.



(نیم‌دایره جدار نازک) (نیم‌دایره) (مثلث متساوی الساقین)

۳ محل مرکز سطح، به غیراز موارد فوق، باتوجه به رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i} \quad , \quad \bar{x} = \frac{\sum A_i \bar{x}_i}{\sum A_i}$$

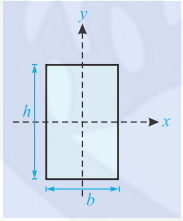
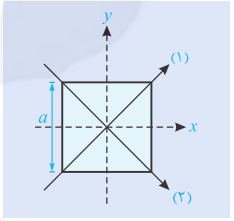
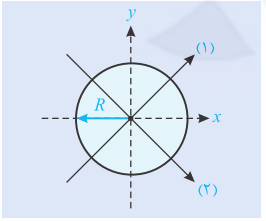
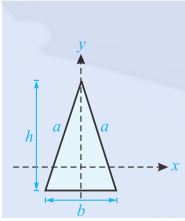
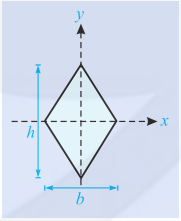
در روابط فوق A_i مساحت هر یک از قسمت‌های تقسیم شده، $\bar{y}_i$ فاصله مرکز سطح هر قسمت تا تراز مبنای افقی و $\bar{x}_i$ فاصلهٔ مرکز سطح هر قسمت تا تراز مبنای قائم می‌باشد.

۵-۲- ممان اینرسی مقطع (I)

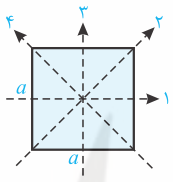
یکی از فاکتورهای اصلی در سختی و مقاومت عضو در برابر خمش ممان اینرسی می‌باشد. به عبارتی هرچه ممان اینرسی یک مقطع بیشتر باشد عضو مقاومت بیشتری در برابر خمش داشته و سخت‌تر خم می‌شود و در نهایت تنش‌های کمتری را تحمل می‌کند. در مورد ممان اینرسی به نکات زیر توجه کنید:

۱ ممان اینرسی مقاطع متقارن و معروف، حول محورهای اصلی x و y در جدول آورده شده است:

جدول ٤: ممان اینرسی مقاطع

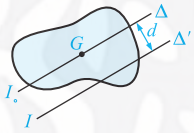
				
$\begin{cases} I_x = \frac{bh^3}{12} \\ I_y = \frac{hb^3}{12} \end{cases}$	$I_x = I_y = I_1 = I_2 = \frac{a^4}{12}$	$I_x = I_y = I_1 = I_2 = \frac{\pi R^4}{4}$	$\begin{cases} I_x = \frac{bh^3}{36} \\ I_y = \frac{hb^3}{48} \end{cases}$	$\begin{cases} I_x = \frac{bh^3}{48} \\ I_y = \frac{hb^3}{48} \end{cases}$

۲ اگر در یک مقطع بیش از دو محور تقارن داشته باشیم (مانند مثلث متساوی‌الاضلاع، مربع، دایره و به‌طور کلی n ضلعی‌های منتظم)، ممان اینرسی حول تمام محورهای عبوری از مرکز سطح مقطع با یکدیگر برابر خواهند بود.



$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \frac{a^4}{12}$$

۳ اگر ممان اینرسی حول محور گذرنده از مرکز سطح مقطع (محور Δ) برابر $I_{\circ}$ باشد، ممان اینرسی حول هر محور دیگری به فاصلهٔ d که با محور Δ موازی است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$I = I_{\circ} + A\,d^{۲}$$

نکته: با استفاده از پارامترهای A و I پارامتری به نام شعاع ژیراسیون (r) تعریف می‌شود که کاربرد آن بیشتر در بحث طراحی ستون‌ها در سازه‌های فولادی می‌باشد.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

۵-۳- ممان استاتیک سطح (Q)

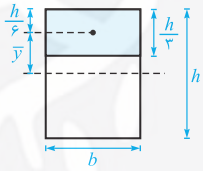
یکی دیگر از مشخصات مقاطع که در تعیین نیروی وارد بر یک سطح خاص ناشی از خمش و یا محاسبهٔ تنش‌های برشی کاربرد دارد، ممان استاتیک است. ممان استاتیک سطح هاشورخورده در شکل مقابل نسبت به محور نشان داده شده، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

مساحت قسمت هاشورخورده

$$Q = A\,\bar{y}$$

فاصلهٔ مرکز سطح قطعهٔ هاشور خورده نسبت به محور مورد نظر

به‌عنوان مثال در مستطیل ممان استاتیک قسمت‌های هاشورخورده نسبت به محور خط‌چین عبوری از مرکز برابر است با:



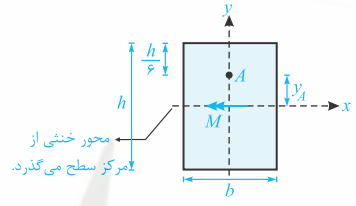
$$\bar{y} = \frac{h}{۲} - \frac{h}{۶} = \frac{h}{۳} \quad , \quad Q = A\bar{y} = (b \times \frac{h}{۳}) \times \frac{h}{۳} = \frac{bh^{۲}}{۹}$$

۵-۴- محاسبه تنش‌های ناشی از خمش

در اثر وارد شدن لنگر خمشی بر یک مقطع، تنش‌های نرمال ناشی از خمش (به‌صورت کششی و فشاری) در آن ایجاد خواهند شد که از رابطه زیر به‌دست می‌آیند:

$$|\sigma| = \frac{My}{I}$$

در این رابطه، M لنگر خمشی وارد بر مقطع می‌باشد که نحوهٔ محاسبهٔ آن را در بحث (۱) آموختید. y فاصلهٔ نقطه موردنظر از محور خنثی و I ممان اینرسی مقطع حول محور خنثی می‌باشد. محور خنثی برای مقاطع معروف خطی افقی است که از مرکز سطح مقطع عبور می‌کند.



به‌طور مثال در مقطع مقابل که تحت خمش تک محوره حول محور x قرار گرفته، مقدار تنش نرمال ناشی از خمش در نقطهٔ A به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

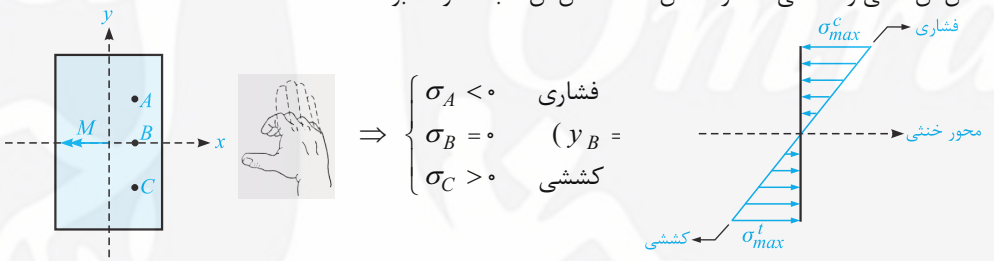
$$|\sigma| = \frac{My}{I}$$

$$y_A = \frac{h}{۲} - \frac{h}{۶} = \frac{h}{۳} \Rightarrow \sigma = \frac{M(\frac{h}{۳})}{\frac{bh^۳}{۱۲}} = \frac{۴M}{bh^۲}$$ (فشاری)

$I_x = \frac{bh^۳}{۱۲}$: ممان اینرسی حول محور خمش که همان محور x است.

در مورد محاسبهٔ تنش‌های ناشی از خمش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) اگر لنگر خمشی وارد بر مقطع (M) مثبت باشد نقاط بالای محور خنثی را تحت فشار و نقاط پایین محور خنثی را تحت کشش قرار می‌دهد. تنش‌های کششی را با علامت مثبت ($\sigma > ۰$) و تنش‌های فشاری را با علامت منفی ($\sigma < ۰$) نشان می‌دهند. تنش ناشی از خمش روی محور خنثی برابر صفر است ($y = ۰$). تعیین فشاری یا کششی بودن تنش با توجه به قانون دست راست انجام می‌شود. بدین ترتیب اگر انگشت شست دست راست را در راستای لنگر خمشی قرار داده و چهار انگشت دیگر را خم کنیم، مشاهده می‌کنید چهار انگشت در بالای محور x به صفحه داخل شده و در قسمت پایین از صفحه خارج می‌شوند. در این حالت نقاط بالای محور x تحت فشار و نقاط پایین محور x تحت کشش قرار خواهند گرفت و با توجه به قرارداد، قسمتی که در فشار است، تنش آن منفی و قسمتی که در کشش است، تنش آن مثبت خواهد بود:



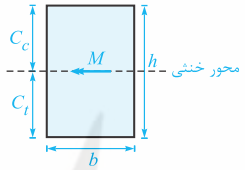
۲) چنانچه مقدار حداکثر تنش خمشی مدنظر باشد، باید پارامترهای M و y حداکثر باشند (توجه کنید I ثابت است)، در این‌صورت می‌توانیم رابطه را برای تنش خمشی حداکثر به‌صورت زیر تعریف کنیم:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}\, y_{max}}{I} = \frac{M_{max}\, C}{I}$$ (معمولاً y_{max} را با C نشان می‌دهند)

۳) حاصل تقسیم $\frac{I}{C}$ را با پارامتر S نشان داده که آن را اساس (مدول) مقطع می‌نامند. بنابراین داریم:

$$S = \frac{I}{C} \Rightarrow \sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S}$$

اساس مقطع مربوط به مستطیل را در زیر مشاهده می‌کنید. S_c اساس مقطع ناحیهٔ فشاری و S_t اساس مقطع ناحیهٔ کششی می‌باشند.



$$S_c = S_t = \frac{I}{C} = \frac{\frac{bh^۳}{۱۲}}{\frac{h}{۲}} = \frac{bh^۲}{۶}$$

۴ حداکثر لنگر خمشی قابل اعمال به مقطع در حالی‌که تنش در مصالح آن از تنش جاری شدن مصالح (تنش مجاز) بیشتر نشود را مقاومت خمشی می‌نامند. این مقدار از برابر قرار دادن تنش خمشی حداکثر با تنش مجاز مصالح به‌دست می‌آید:

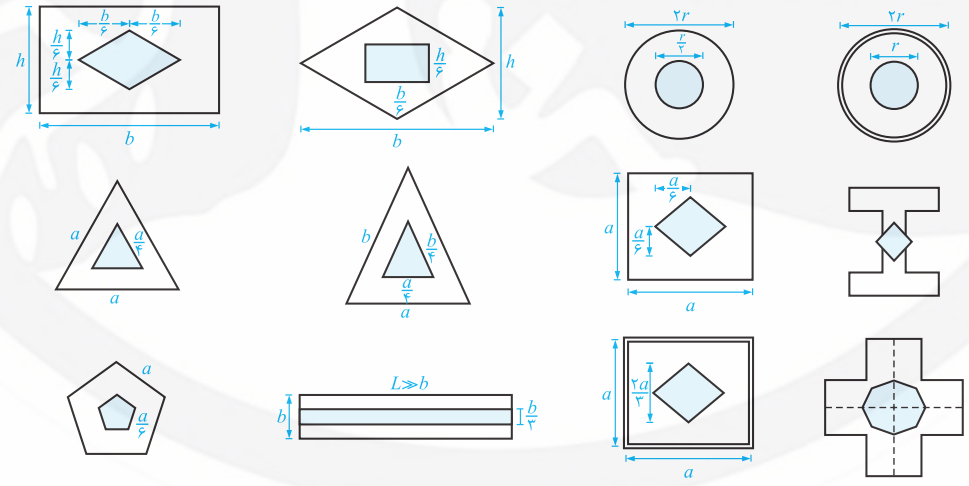
$$\sigma_{max}=\frac{M}{S}\le\sigma_{all}\quad\Rightarrow\quad M_{max}=S\,\sigma_{all}$$

بنابراین می‌توان گفت هرچه ممان اینرسی (I) و اساس مقطع (S) برای یک مقطع بیشتر باشد، مقطع مقاومت خمشی بیشتری خواهد داشت و به عبارتی لنگر بیشتری تحمل می‌کند.

۵ به حاصلضرب EI اصطلاحاً صلبیت خمشی گفته می‌شود و معیاری برای مقایسهٔ تغییر شکل‌های یک سازه در اثر خمش است که در بحث‌های بعدی با آن بیشتر آشنا خواهیم شد.

۶ هسته مرکزی مقطع مجموعه نقاطی است که با اعمال نیروی محوری کششی یا فشاری روی محیط آن، محور خنثی بر مقطع مماس می‌شود. در این حالت می‌توان گفت تنش‌های وارد بر مقطع فقط از جنس نیروی وارده (یا کششی یا فشاری) هستند.

در حالت کلی برای رسم هسته یک مقطع فرض می‌کنیم که در حالت‌های مختلف محور خنثی بر روی مرزهای مقطع قرار گرفته و در هر حالت محل اعمال نیرو را با کمک تعریف فوق به‌دست می‌آوریم. در نهایت با وصل کردن این نقاط به یکدیگر شکل هسته را به‌دست می‌آوریم. هسته مقطع برای مقاطع معروف در شکل زیر آورده شده است.



نمونه سؤالات بحث (۵)

تمرین ۱۶: با مقطع و طول یکسان، در کدام‌یک از تیرهای زیر تحت بار گستردهٔ یکنواخت تنش‌های ناشی از خمش بیشتر خواهد شد؟

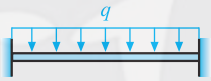
۱) تیر دو سر مفصل
۲) تیر طره (یکسر گیردار)
۳) تیر دو سرگیردار
۴) تنش همه یکسان است.

حل: با نگاهی به رابطهٔ محاسبهٔ تنش‌های ناشی از خمش متوجه خواهیم شد پارامترهای M، C و I در تعیین حداکثر تنش ناشی از خمش در مقاطع مؤثر است. از طرفی برای یک مقطع ثابت، مقادیر C و I ثابت هستند و کافیست تا مقدار M برای سه تیر نام برده مقایسه شود. این مقایسه برای طول یکسان در بحث (۱) انجام شد و به نتیجهٔ زیر دست پیدا کردیم. بنابراین داریم:

$$\begin{cases} (۱)\ \text{تیر دو سر مفصل}: M_{max}=\dfrac{qL^۲}{۸} \\ (۲)\ \text{تیر طره (یکسرگیردار)}: M_{max}=\dfrac{qL^۲}{۲} \\ (۳)\ \text{تیر دو سرگیردار}: M_{max}=\dfrac{qL^۲}{۱۲} \end{cases} \Rightarrow M_۲ > M_۱ > M_۳ \Rightarrow \sigma_۲ > \sigma_۱ > \sigma_۳$$

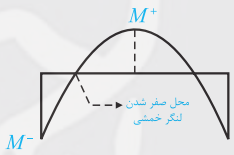
بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۷: در تیر دو سرگیردار نشان داده شده تحت بار گستردهٔ یکنواخت، تنش‌های ناشی از خمش در کدام نقطه کمترین مقدار را دارد؟



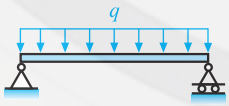
۱) در وسط دهانه
۲) در روی تکیه‌گاه‌ها
۳) در فاصلهٔ بین تکیه‌گاه و وسط دهانه
۴) همهٔ نقاط یکسان هستند.

حل: با توجه به رابطهٔ خمش و ثابت بودن پارامترهای C و I در کل تیر، باید میزان لنگر خمشی نقاط مختلف را بررسی کنیم. از بحث (۱) به‌خاطر دارید که نمودار تغییرات لنگر خمشی در تیر دو سرگیردار تحت بار گسترده یکنواخت به‌صورت مقابل است:



با توجه به نمودار مشاهده می‌کنید در فاصلهٔ بین تکیه‌گاه‌ها و وسط دهانه، لنگر خمشی به صفر می‌رسد و عملاً تنش ناشی از خمش نیز در آن صفر خواهد بود. بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۱۸: در یک تیر دو سر مفصل با مقطع ثابت تحت بار گستردهٔ یکنواخت، چنانچه تمام ابعاد آن α برابر شود، تنش‌های خمشی چند برابر خواهد شد؟



۱) α برابر
۲) $\dfrac{۱}{\alpha}$ برابر
۳) $\alpha^۲$ برابر
۴) تغییری نمی‌کند.

حل: یک بار دیگر رابطهٔ تنش‌های خمشی را با هم مرور می‌کنیم:

$$\begin{cases} \sigma=\dfrac{My}{I} \\ M_{max}=\dfrac{qL^۲}{۸} \end{cases} \Rightarrow \sigma=\dfrac{\frac{qL^۲}{۸}y}{I} \Rightarrow \sigma \propto \dfrac{qL^۲y}{I}$$

با توجه به رابطهٔ فوق، مقدار تنش σ به پارامترهای q، L، y و I وابسته است. چنانچه تمام ابعاد تیر α برابر شود، به‌ترتیب طول α برابر، ارتفاع مقطع α برابر و ممان اینرسی α^4 برابر خواهد شد. بنابراین داریم:

$$\sigma \propto \frac{\alpha^2 \times \alpha}{\alpha^4} = \frac{1}{\alpha}$$

تذکر: اگر تیر نشان داده شده تحت اثر وزن قرار داشته باشد باید به‌جای شدت بار گسترده از رابطهٔ $q = \gamma A$ استفاده کنیم که در این صورت تنش‌های خمشی α برابر خواهند شد.

$$\sigma \propto \frac{AL^2 y}{I} = \frac{\alpha^2 \times \alpha^2 \times \alpha}{\alpha^4} = \alpha \quad \Rightarrow$$ گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۱۹: هستهٔ مرکزی یک مقطع به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع a کدام است؟

۱) یک مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع $\frac{a}{4}$
۲) یک مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع $\frac{a}{3}$
۳) یک لوزی به قطر $\frac{1}{2}a$
۴) یک لوزی به قطر $\frac{2}{3}a$

حل: با توجه به نکات درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

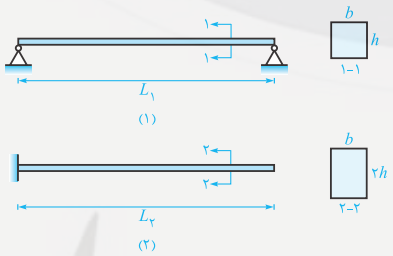
تمرین ۲۰: با فرض سطح مقطع یکسان، کدام‌یک از مقاطع زیر دارای مقاومت خمشی بیشتری می‌باشد؟

۱)
۲)
۳)
۴)

حل: با توجه به مفهوم بیان شده در مورد مقاومت خمشی مقاطع می‌توان گفت هر مقطعی که دارای ممان اینرسی (I) و یا اساس مقطع (S) بیشتری باشد، مقاومت خمشی بالاتری خواهد داشت. از طرفی در مورد ممان اینرسی می‌توان به این نکته اشاره کرد که در مقاطع مختلف هرچه تراکم مصالح دورتر از مرکز آن باشد مقطع دارای ممان اینرسی بیشتری می‌باشد. در نتیجه در حالت کلی مقطع I شکل دارای ممان اینرسی بیشتر و مقاومت خمشی بالاتر نسبت به سایر مقاطع می‌باشد. بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

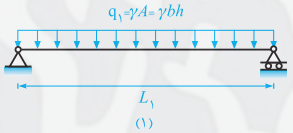
تمرین ۲۱: مقطع دو تیر نشان داده شده، به شکل مربع مستطیل است. ارتفاع مقطع تیر (۱) h_1 دو برابر ارتفاع مقطع تیر (۲)، h_2 می‌باشد. تنش خمشی ماکزیمم آنها زیر اثر وزن خود یکی می‌باشد. نسبت $\frac{L_1}{L_2}$ چقدر است؟

(قوه قضائیه - ۸۷)

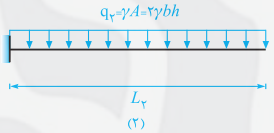


۱) $L_1 = L_2$
۲) $L_1 = 2L_2$
۳) $L_1 = \sqrt{2}L_2$
۴) $L_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}L_2$

حل: براساس نکات بیان شده می‌توان بارگذاری وارد بر هر تیر را به‌صورت گسترده مطابق شکل زیر نشان داد:



$$M_{max_1}=\frac{q_1 L_1^2}{8}$$



$$M_{max_2}=\frac{q_2 L_2^2}{2}$$

$$\sigma=\frac{MC}{I} \Rightarrow \sigma_{max}=\frac{M_{max}C_{max}}{I} \Rightarrow \frac{(\sigma_{max})_2}{(\sigma_{max})_1}=\frac{(M_{max})_2}{(M_{max})_1}\times\frac{(C_{max})_2}{(C_{max})_1}\times\frac{I_1}{I_2}$$

$$=\frac{\frac{q_2 L_2^2}{2}}{\frac{q_1 L_1^2}{8}}\times\frac{(C_{max})_2}{(C_{max})_1}\times\frac{I_1}{I_2} \Rightarrow 1=4\times\frac{2\gamma bh}{\gamma bh}\times\frac{L_2^2}{L_1^2}\times\frac{h}{\frac{h}{2}}\times\frac{\frac{bh^3}{12}}{\frac{b(2h)^3}{12}} \Rightarrow L_1=\sqrt{2}L_2$$

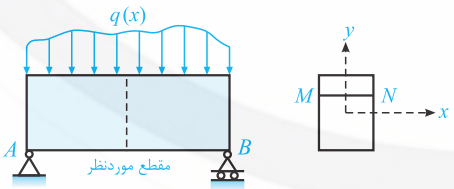
بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

بحث ۶: بررسی تنش برشی در مقاطع

یکی دیگر از مفاهیم مهم در مقاومت مصالح محاسبهٔ تنش‌های برشی ناشی از نیروی برشی در مقطع می‌باشد. معمولاً در مهندسی عمران اعضاء سازه‌ای برای خمش طراحی می‌شوند و توسط تنش‌های برشی کنترل می‌شوند. در این بحث به مفاهیم مهم تنش برشی اشاره خواهیم کرد.

۶-۱- رابطهٔ محاسبه تنش برشی

تیر نشان داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید. با کمک معادلات تعادل استاتیکی می‌توان نشان داد که تنش برشی در محل MN با استفاده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:



$$\tau=\frac{VQ}{Ib}$$

در رابطه بیان شده در رابطهٔ فوق داریم:

V: نیروی برشی وارد بر مقطع است که با استفاده از معادلات تعادل و جداول بحث (۱) به‌دست می‌آید.

Q: ممان استاتیک قسمت جدا شده در محل پاره‌خط MN است که در بحث قبلی با آن آشنا شدید.

I: ممان اینرسی کل مقطع است که در بحث قبلی با آن آشنا شدید.

b: عرض مقطع در محل مورد نظر است. مثلاً برای مقطع مستطیلی در تمام ارتفاع ثابت است.

برای محاسبهٔ تنش برشی در یک نقطه از مقطع و در یک نقطه از تیر باید مقادیر V، Q، I و b را در آن نقطه به‌دست آورده و با جایگذاری در رابطهٔ فوق آن را محاسبه کنیم.

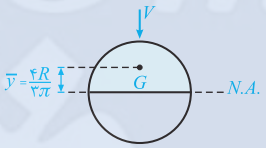
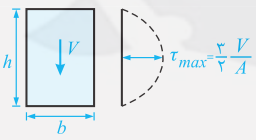
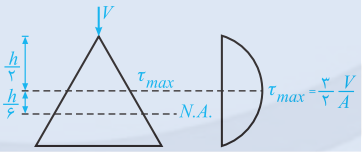
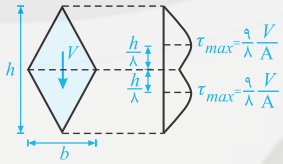
در مورد رابطهٔ تنش برشی و مفاهیم آن می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) برای مقاطع با ضخامت ثابت تنش برشی حداکثر روی محور خنثی رخ می‌دهد. چون پارامتر Q برای آنها ماکزیمم است. اما برای سایر مقاطع در محلی که نسبت $\frac{Q}{b}$ ماکزیمم باشد، تنش برشی ماکزیمم است.

۲) مقاومت برشی یک مقطع، حداکثر نیروی برشی قابل تحمل توسط مقطع با شرط بیشتر نشدن تنش برشی مقطع از تنش برشی مجاز τ_{all} می‌باشد. برای به‌دست آوردن مقاومت برشی مقطع، کافیست تنش برشی حداکثر در مقطع عرضی را با تنش برشی مجاز τ_{all} برابر قرار دهیم.

مقادیر تنش برشی ماکزیمم، مقاومت برشی و محل حداکثر شدن تنش برشی برای مقاطع معروف را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

جدول ٦: روابط محاسبه تنش‌های برشی

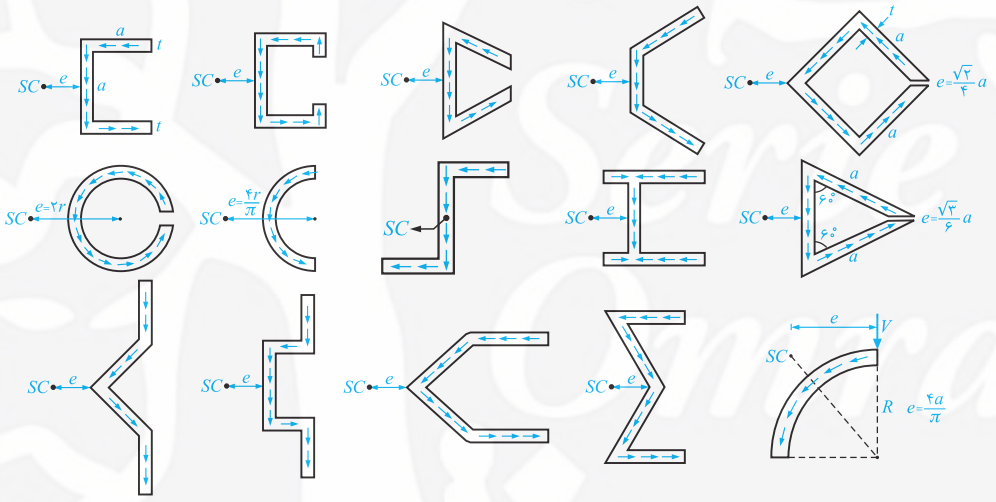
شماره	نام مقطع	شکل مقطع	τ_{max} تنش برشی ماکزیمم	V_{max} مقاومت برشی	محل تنش برشی حداکثر
۱	دایره		$\frac{۴}{۳}\frac{V}{A}$ $A=\pi R^۲$	$\frac{۳}{۴}\tau_{all}\,A$	روی محور خنثی (قطر دایره)
۲	مستطیل		$\frac{۳}{۲}\frac{V}{A}$ $A=bh$	$\frac{۲}{۳}\tau_{all}\,A$	روی تار خنثی (وسط ارتفاع مقطع)
۳	مثلث		$\frac{۳}{۲}\frac{V}{A}$ $A=\frac{bh}{۲}$	$\frac{۲}{۳}\tau_{all}\,A$	در وسط ارتفاع مقطع و در فاصله $\frac{h}{۶}$ از تار خنثی
۴	لوزی		$\frac{۹}{۸}\frac{V}{A}$ $A=\frac{bh}{۲}$	$\frac{۸}{۹}\tau_{all}\,A$	در فاصله $\frac{h}{۸}$ از محور خنثی

تذکر: در روابط فوق A مساحت مقطع مورد نظر و V نیروی برشی وارد بر مقطع عرضی می‌باشد.

۶-۲- مرکز برش

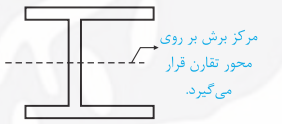
برای هر مقطع نقطه‌ای وجود دارد که در صورت قرارگیری نیروی برشی در آن نقطه، در مقطع لنگر پیچشی ایجاد نخواهد شد. در این صورت تنش‌های برشی وارد بر مقطع تنها ناشی از نیروی برشی خواهند بود. این نقطه مرکز برش نام دارد. در صورتی‌که نیروی برشی در نقطه‌ای غیر از مرکز برش قرار گیرد علاوه بر تنش‌های برشی ناشی از نیروی برشی، تنش‌های برشی ناشی از پیچش نیز ایجاد خواهد شد که در بحث بعدی با آن آشنا می‌شویم.

نکته: در شکل‌های زیر مرکز برش برخی از مقاطع معروف نشان داده شده است که آن را SC نامیده‌ایم.

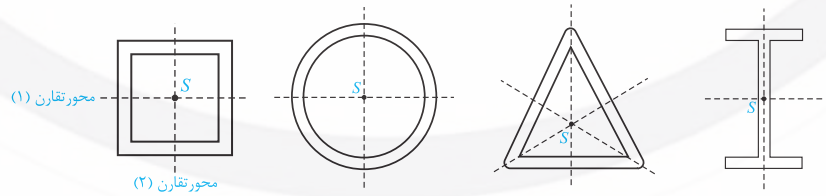


در مورد محل مرکز برش مقاطع می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

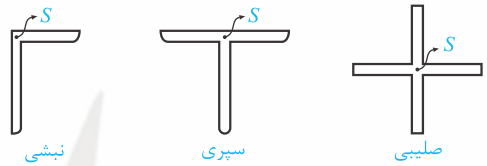
۱) در مقاطع با یک محور تقارن، مرکز برش لزوماً بر روی آن محور تقارن قرار دارد.



۲) در صورتی‌که مقطعی دارای دو محور تقارن باشد، مرکز برش و مرکزسطح در آن مقطع بر یکدیگر منطبق می‌شوند و محل مرکز برش، محل تقاطع دو محور تقارن است.



۳) به‌طور کلی اگر مقطعی از اتصال چند قطعهٔ همرس در **یک نقطه** تشکیل شده باشد، مرکز برش در محل اتصال قطعات به یکدیگر قرار دارد. با توجه به این موضوع، محل مرکز برش در شکل‌های مقابل نقطهٔ S می‌باشد.



نمونه سؤالات بحث (۶)

تمرین ۲۲: در کدام یک از مقاطع زیر، تنش برشی ماکزیمم بر اثر نیروی برشی روی محور خنثی ظاهر نمی‌شود؟

۱) دایره ۲) مستطیل
۳) لوزی ۴) هیچ‌کدام

حل: با توجه به جدول درسنامه، در مقطع لوزی تنش حداکثر در فاصلهٔ $\frac{h}{8}$ از محور خنثی رخ می‌دهد.

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۲۳: اگر برش تعیین کننده طراحی باشد، به ازاء مساحت یکسان کدام‌یک از مقاطع زیر اقتصادی‌تر است؟

۱) مستطیل ۲) مثلث ۳) دایره ۴) لوزی

حل: برای طراحی در برش، زمانی یک مقطع اقتصادی‌تر است که مقاومت برشی آن بیشتر باشد. بنابراین مقاومت برشی مقاطع را با فرض مساحت یکسان با هم مقایسه می‌کنیم:

$$\begin{cases} (V_{max})_{\text{لوزی}} = \frac{8}{9}\tau_{all}A \\ (V_{max})_{\text{دایره}} = \frac{3}{4}\tau_{all}A \\ (V_{max})_{\text{مثلث}} = \frac{2}{3}\tau_{all}A \\ (V_{max})_{\text{مستطیل}} = \frac{2}{3}\tau_{all}A \end{cases} \Rightarrow (V_{max})_{\text{لوزی}} > (V_{max})_{\text{دایره}} > (V_{max})_{\text{مثلث}} = (V_{max})_{\text{مستطیل}}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲۴: مقطع یک تیر به شکل دایره و مقطع تیر دیگری به شکل مربع است. اگر مساحت مقطع هر دو تیر مساوی باشد، نسبت مقاومت برشی تیر اول به تیر دوم برابر است با:

۱) ۱ ۲) $\frac{4}{3}$ ۳) $\frac{8}{9}$ ۴) $\frac{9}{8}$

حل: با توجه به تعریف بیان شده برای مقاومت برشی در درسنامه و روابط محاسبه حداکثر تنش در مقاطع دایروی و مربعی داریم:

$$\tau_{max(1)} = \frac{4}{3}\frac{V_1}{A_1} \Rightarrow (V_1)_{max} = \frac{3}{4}A_1\tau_{all} \quad , \quad \tau_{max(2)} = \frac{3}{2}\frac{V_2}{A_2} \Rightarrow (V_2)_{max} = \frac{2}{3}A_2\tau_{all}$$

$$\Rightarrow \frac{\text{مقاومت برشی مقطع (۱)}}{\text{مقاومت برشی مقطع (۲)}} = \frac{(V_1)_{max}}{(V_2)_{max}} = \frac{\frac{3}{4}A_1}{\frac{2}{3}A_2} = \frac{9}{8}\boxed{\frac{A_1}{A_2}} = \frac{9}{8}$$

$\rightarrow A_1 = A_2$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲۵: اگر ارتفاع مقطع یک تیر را افزایش دهیم، کدام عبارت نادرست است؟

۱) مدول مقطع آن افزایش می‌یابد. ۲) شعاع ژیراسیون آن کاهش می‌یابد.
۳) مقاومت خمشی آن افزایش می‌یابد. ۴) مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد.

حل: با در نظر گرفتن مقطع مستطیلی به ارتفاع h و عرض b، گزینه‌ها را به ترتیب بررسی می‌کنیم:

گزینهٔ (۱) : مدول مقطع از رابطهٔ $S = \frac{bh^2}{6}$ به‌دست می‌آید. بنابراین با افزایش ارتفاع، این پارامتر افزایش می‌یابد.

گزینهٔ (۲): در مورد شعاع ژیراسیون داریم:

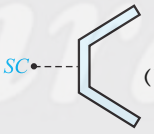
$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{bh^3}{12}}{bh}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

بنابراین با افزایش ارتفاع، شعاع ژیراسیون افزایش می‌یابد.

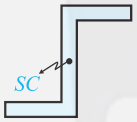
گزینهٔ (۳): مقاومت خمشی از رابطهٔ $M = S\,\sigma_{all}$ به‌دست می‌آید. بنابراین با افزایش ارتفاع، مقدار S و در نتیجه مقاومت خمشی افزایش می‌یابد.

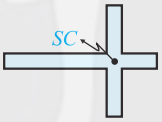
گزینهٔ (۴): مقاومت برشی از رابطهٔ $V = \frac{2}{3}A\,\tau_{all}$ به‌دست می‌آید. بنابراین با افزایش ارتفاع، مقدار A و در نتیجه مقاومت برشی افزایش می‌یابد. بنابراین عبارت گزینهٔ (۲) نادرست بوده و پاسخ سؤال است.

تمرین ۲۶: در کدام‌یک از مقاطع زیر محل مرکز برش به درستی نشان داده نشده است؟

(۱) 

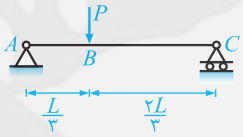
(۲)

(۳) 

(۴) 

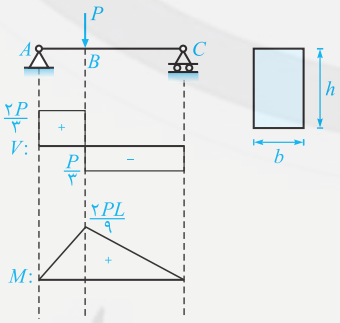
حل: با توجه به نکات درسنامه، مرکز برش مشخص شده در مقطع گزینهٔ (۲) نادرست است. بنابراین این گزینه پاسخ سؤال است. محل مرکز برش در سایر گزینه‌ها در درسنامه مشخص شده است.

تمرین ۲۷: در تیر زیر که مقطع آن مستطیلی است، تنش خمشی ماکزیمم ۲۰ برابر تنش برشی ماکزیمم است. نسبت طول تیر به ارتفاع آن $(\frac{L}{h})$ کدام است؟



(۱) ۱۰ (۲) ۱۵ (۳) ۲۰ (۴) ۲۵

حل: با توجه به محاسبات تنش برشی ماکزیمم و تنش خمشی ماکزیمم در این تیر داریم:



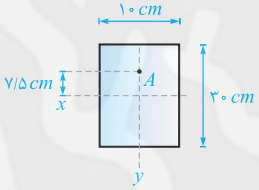
$$V_{max} = \frac{2P}{3}\ ,\ \tau_{max} = \frac{3}{2}\frac{V}{A} = \frac{3}{2}\frac{\frac{2P}{3}}{bh} = \frac{P}{bh}$$

$$M_{max} = \frac{2PL}{9}\ ,\ \sigma_{max} = \frac{M_{max}.C}{I} = \frac{\frac{2PL}{9}\times\frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{4PL}{3bh^2}$$

$$\text{دادهٔ سؤال: } \sigma_{max} = 20\tau_{max} \Rightarrow \frac{4PL}{3bh^2} = 20\frac{P}{bh} \Rightarrow \frac{L}{h} = 15$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

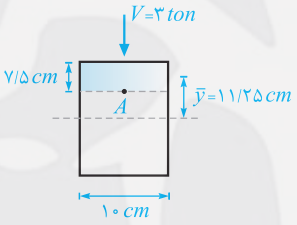
تمرین ۲۸: مقطع مستطیلی شکل تحت اثر لنگر خمشی $M_x = ۱۰\ ton.m$ و نیروی برشی $V_y = ۳\ ton$ قرار دارد. مقدار تنش برشی در نقطهٔ A برابر است با:



۱) $۱۱/۲۵\ kg/cm^۲$ ۲) $۷/۵\ kg/cm^۲$

۳) $۵/۶۲\ kg/cm^۲$ ۴) $۱۰/۷\ kg/cm^۲$

حل: ابتدا باید توجه شود که لنگر خمشی M_x تنها تنش‌های قائم کششی و فشاری در مقطع ایجاد می‌کند، در حالی‌که در صورت سؤال تنش برشی مدنظر قرار گرفته است. بنابراین لنگر M_x نقشی در ایجاد تنش برشی در نقطهٔ A ندارد و تنش برشی در نقطهٔ A به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

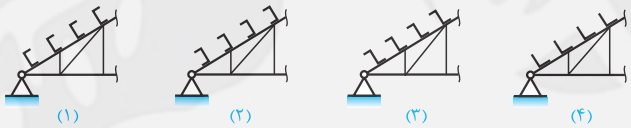


$$\begin{cases} Q = A\bar{y} = (۷/۵ \times ۱۰) \times (\frac{۳۰}{۲} - \frac{۷/۵}{۲}) = ۸۴۳/۷۵\ cm^۳ \\ I = \frac{b h^۳}{۱۲} = \frac{۱۰ \times ۳۰^۳}{۱۲} = ۲۲۵۰۰\ cm^۴ \\ b = ۱۰\ cm \end{cases}$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{VQ}{Ib} = \frac{۳۰۰۰ \times ۸۴۳/۷۵}{۲۲۵۰۰ \times ۱۰} = ۱۱/۲۵\ kg/cm^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۹: کدام گزینه برای اجرای لایه‌های یک خرپا صحیح است؟ (قوهٔ قضائیه - ۸۱)



۱) لایه از نوع ناودانی و سمت داخل ناودانی به طرف رأس خرپا

۲) لایه از نوع ناودانی و جان به سمت رأس خرپا

۳) لایه از نوع Z و بال پایین به سمت رأس خرپا

۴) لایه از نوع نبشی و بال پایین به سمت رأس خرپا

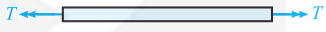
حل: ابتدا به نحوهٔ انتقال بارهای سقف به مقطع Z شکل در دو حالت زیر توجه کنید:

همانطورکه مشاهده می‌کنید در حالت (۱) نیروی P ناشی از بارگذاری سقف تقریباً از مرکز برش مقطع Z عبور می‌کند و در نتیجه مقطع تنها تحت نیروی برشی قرار دارد. اما در حالت (۲) که امتداد نیروی P با مرکز برش مقطع فاصله دارد.

با انتقال نیروی P به مرکز برش، در مقطع علاوه بر نیروی برشی، لنگر پیچشی هم ایجاد خواهد شد که تنش‌های بیشتری را ایجاد خواهد کرد. بنابراین حالت ایده‌آل آن است که مشابه حالت (۱) انتهای آزاد بال بالایی تمام لاپه‌ها باید به سمت لبهٔ بالای سقف باشد. همین استدلال را می‌توان برای مقطع ناودانی هم انجام داد. در حالت کلی در بارگذاری بر روی لاپه‌ها، بهتر است وضعیت بارگذاری به‌گونه‌ای باشد که بار قائم از مرکز برش عبور کرده تا در عضو پیچش ایجاد نشود. به همین جهت در شیب‌های کم از مقطع I شکل، در شیب‌های متوسط از مقطع Z شکل و در شیب‌های نسبتاً زیاد از ناودانی استفاده می‌شود.

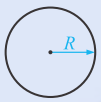
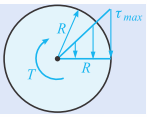
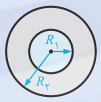
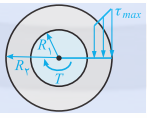
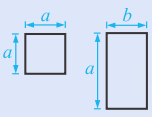
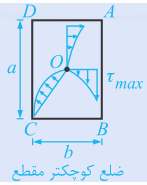
در شیب ۱۵ درصد، می‌توان از مقاطع Z شکل و ناودانی مطابق موارد (ب) و (ج) استفاده کرد. از طرفی در حالت کلی استفاده از نبشی به دلیل نداشتن بال در دو طرف جان مناسب نیست. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

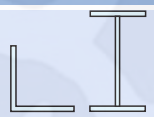
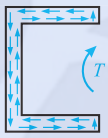
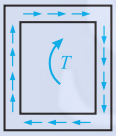
بحث ۷: پیچش در مقاطع



هنگامی‌که یک عضو تحت پیچش قرار می‌گیرد، در المان‌های آن تنش برشی ایجاد خواهد شد. در این قسمت، مقاطع تحت پیچش و روابط آن را در جدول مشاهده خواهید کرد.

جدول ۷: روابط پیچش

نام مقطع		شکل مقطع	توزیع تنش	τ_{max} (تنش برشی ماکزیمم)	J (ممان اینرسی پیچشی)	T_{max} (مقاومت پیچشی)
مقاطع دایره‌ای	توپر			$\frac{TR}{J}$	$\frac{\pi R^4}{2}$	$\frac{J}{R}\tau_{all}$
	توخالی			$\frac{TR_2}{J}$	$\frac{\pi}{2}(R_2^4 - R_1^4)$	$\frac{J}{R_2}\tau_{all}$
مقطع مستطیلی	مستطیل و مربع		 ضلع کوچکتر مقطع	$\frac{T}{c_1 ab^2}$	$c_2 ab^3$	$c_1 ab^2 \tau_{all}$

نام مقطع			شکل مقطع	توزیع تنش	τ_{max} (تنش برشی ماکزیمم)	J (ممان اینرسی پیچشی)	T_{max} (مقاومت پیچشی)
مقاطع جدار نازک	جدار نازک باز	ضخامت ثابت			$\frac{Tt}{J}$	$\sum \frac{1}{3} a_i t^3$	$\frac{J}{t}\tau_{all}$
		ضخامت متغیر			$\frac{Tt_{max}}{J}$	$\sum \frac{1}{3} a_i t_i^3$	$\frac{J}{t_{max}}\tau_{all}$
	جدار نازک بسته	ضخامت ثابت			$\frac{T}{2A_m t}$	$\frac{4A_m^2}{\sum \frac{L_i}{t}}$	$2A_m t \tau_{all}$
		ضخامت متغیر			$\frac{T}{2A_m t_{min}}$	$\frac{4A_m^2}{\sum \frac{L_i}{t_i}}$	$2A_m t_{min} \tau_{all}$

در مورد جدول و روابط بیان شده در آن می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) در روابط بیان شده T مقدار لنگر پیچشی وارد بر مقطع می‌باشد که از معادلات تعادل به‌دست می‌آید.

۲) پارامتر J ممان اینرسی پیچشی نام دارد و معیاری برای سنجش مقاومت یک مقطع در برابر پیچش محسوب می‌شود. به عبارتی دیگر مقطعی که ممان اینرسی پیچشی بیشتری دارد، تمایل به پیچش کمتری داشته و تنش برشی کمتری در آن ایجاد خواهد شد.

۳) مقاومت پیچشی یک مقطع (T_{max})، حداکثر لنگر پیچشی است که مقطع می‌تواند تحمل کند، بدون اینکه تنش برشی ایجاد شده در آن، از مقدار تنش برشی مجاز یعنی τ_{all} تجاوز کند. برای محاسبهٔ مقاومت پیچشی کافی است مقدار τ_{max} و τ_{all} را با یکدیگر مساوی قرار دهید و از روی آن مقدار T را به‌دست آورید.

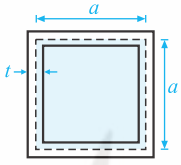
۴) در مقاطع دایره‌ای (توپر، توخالی و جدار نازک) حداکثر تنش برشی روی محیط دایره و در دورترین نقطه نسبت به مرکز رخ می‌دهد.

۵) در مقاطع مستطیلی تنش برشی در وسط مقطع و چهار گوشهٔ آن برابر صفر است و تنش برشی حداکثر در وسط ضلع بزرگتر رخ می‌دهد.

۶) در مقاطع مستطیلی مقادیر c_1 و c_2 در محاسبهٔ تنش برشی، به ابعاد مقطع بستگی دارد (به‌طور مثال برای مربع $(a=b)$ $c_1=0/2$ و $c_2=0/14$ می‌باشد).

۷) در مقاطع جدار نازک باز با توجه به رابطه تنش، تنش برشی حداکثر در ضخیم‌ترین قطعه رخ می‌دهد.

۸) در رابطه محاسبه تنش در مقاطع جدار نازک بسته A_m مساحت سطح واقع در داخل منحنی بسته‌ای است که از وسط جداره‌های مقطع عبور می‌کند، به‌طور مثال در مقطع مربع جدار نازک، مساحت A_m عبارت است از:



$$A_m = a \times a = a^2 \quad , \quad J = \frac{4(a^2)^2}{\frac{4a}{t}} = a^3 t$$

با توجه به این رابطه مقطعی که مساحت داخلی بزرگتری داشته باشد تنش کمتری در آن ایجاد خواهد شد.

۹ در مقاطع جدار نازک بسته تحت اثر لنگر پیچشی T، با توجه به رابطهٔ ارائه شده تنش برشی ماکزیمم در نازک‌ترین قطعه رخ می‌دهد (برعکس مقاطع جدار نازک باز تحت پیچش).

۱۰ در رابطه J برای مقاطع جدار نازک بسته، $\Sigma \frac{L_i}{t_i}$ برابر با مجموع نسبت طول خط‌چین (L_i) به ضخامت هر قسمت (t_i) می‌باشد. به‌طور مثال برای مقطع مربع J برابر a^3t می‌باشد.

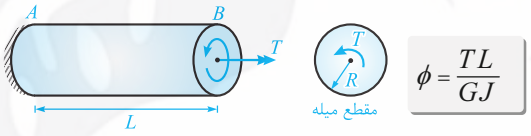
۱۱ در صورت یکسان بودن مساحت دایره و مستطیل، تنش برشی در مستطیل بزرگتر از دایره بوده و دایره مقطع مقاوم‌تری در برابر پیچش می‌باشد. اصطلاحاً مقاطع مستطیلی و مربعی دچار اعوجاج خواهند شد.

بررسی چند نکته

۱ **صلبیت پیچشی (GJ)**: به حاصلضرب GJ در مقاطع مختلف صلبیت پیچشی گفته می‌شود. در بحث‌های قبلی و این بحث با مفهوم G (مدول برشی) و J (ممان اینرسی پیچشی) آشنا شدید. در واقع عامل تعیین‌کننده برای مقاومت یک مقطع در برابر پیچش صلبیت پیچشی می‌باشد. بنابراین مقطعی که صلبیت پیچشی بیشتری داشته باشد پیچش کمتری خواهد داشت و تنش‌های کمتری در آن ایجاد خواهد شد.

۲ **سختی پیچشی $(\frac{GJ}{L})$**: برای یک میله به طول L اگر صلبیت پیچشی را بر طول عضو تقسیم کنیم سختی پیچشی به‌دست خواهد آمد.

۳ **زاویهٔ پیچشی (ϕ)**: در اثر اعمال لنگر پیچشی به مقاطع، المان‌های آن دچار تغییر شکل و اعوجاج خواهند شد و ابتدا و انتهای عضو نسبت به هم دوران خواهند کرد. این تغییر زاویه را می‌توان از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:



$$\phi = \frac{TL}{GJ}$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید هرچه صلبیت پیچشی عضو (GJ) بیشتر باشد، تغییر شکل‌های زاویه‌ای آن تحت پیچش کمتر خواهد بود.

نمونه سؤالات بحث (۷)

تمرین ۳۰: با سطح مقطع یکسان، کدام مقطع برای تحمل پیچش مقاوم‌تر است؟

۱)
۲)
۳)
۴)

حل: مقاطع گزینه‌های (۱)، (۳) و (۴) به دلیل داشتن زاویه و گوشه در برابر پیچش دچار اعوجاج خواهند شد و پایداری خود را از دست خواهند داد. در حالی‌که در مقطع دایره‌ای این موضوع برقرار نخواهد بود و این مقطع مقاومت بیشتری دارد.

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۳۱: در یک مقطع جدار نازک بسته تنش برشی ماکزیمم در محل ..... ضخامت و در یک مقطع جدار نازک باز تنش برشی ماکزیمم در محل ..... ضخامت ایجاد می‌شود.

۱) بیشترین ، بیشترین ۲) کمترین ، کمترین ۳) بیشترین ، کمترین ۴) کمترین ، بیشترین

حل: با توجه به نکات بیان شده در درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۲: برای کاهش زاویهٔ پیچش در یک عضو سازه‌ای، کدام‌یک از راهکارهای زیر مناسب نیست؟

۱) کاهش مقدار لنگر پیچشی ۲) کاهش طول عضو

۳) کاهش ابعاد مقطع ۴) هر سه مورد مناسب هستند.

حل: یک بار دیگر به رابطهٔ محاسبهٔ زاویهٔ پیچش در عضو نگاه کنید: $\phi = \frac{TL}{GJ}$

با توجه به رابطه با کاهش لنگر پیچشی (T) و طول (L)، زاویهٔ پیچش کاهش می‌یابد. اما با کاهش ابعاد مقطع مقدار ممان اینرسی پیچشی (J) کاهش یافته و با توجه به قرارگیری این پارامتر در مخرج کسر، زاویهٔ پیچش افزایش می‌یابد. بنابراین گزینهٔ (۳) راهکار مناسبی نیست و پاسخ سؤال است.

تمرین ۳۳: در میلهٔ مطابق شکل زیر، که تحت اثر لنگر پیچشی $T = ۱۰۰kN.m$ قرار دارد. مقدار پیچش در نقطهٔ C چقدر است؟ (قوه قضائیه - ۸۷)

۱) $T_C = ۰$

۲) $T_C = ۶۶/۶kN.m$

۳) مقدار T_C متناسب با محل نقطه C قابل محاسبه است.

۴) $T_C = ۱۰۰kN.m$

حل: این میله مانند میله‌ای یکسر گیردار است که در انتهای آزاد آن لنگر پیچشی به مقدار $۱۰۰kN.m$ وارد شده است.

$$\sum T_A = ۰ \Rightarrow T_A = ۱۰۰kN.m$$

در این میله لنگر پیچشی در سرتاسر میله برابر با $T = ۱۰۰kN.m$ می‌باشد.

$$T_A = T_B = T_C = ۱۰۰kN.m$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

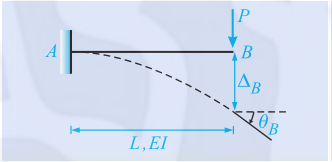
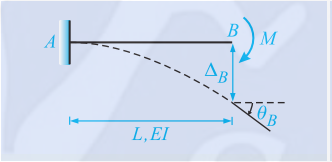
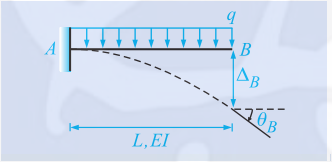
بحث ۸: تغییر شکل در سازه

محاسبهٔ تغییر شکل‌های یک سازه ناشی از بارگذاری‌های مختلف همواره مهم‌ترین موضوع در تحلیل سازه‌ها بوده و روش‌های زیادی برای آن ارائه شده است. نتایج مهم این روش‌ها را می‌توان برای تیرهای معروف در قالب تیرهای معین و نامعین به‌صورت جداول زیر ارائه کرد. در این جداول Δ تغییر مکان و θ دوران یک نقطهٔ خاص می‌باشد. همچنین در تیرهای نامعین برخی از عکس‌العمل تکیه‌گاهی نیز مشخص شده است.

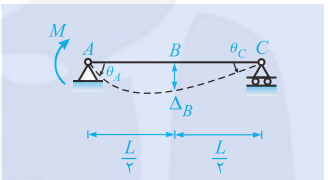
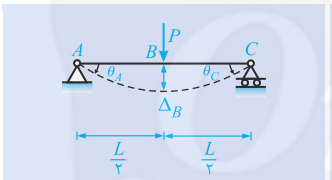
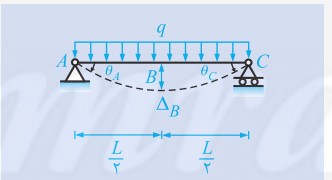
۸-۱- تیرهای معین معروف

شامل تیرهای طره (کنسول یا یکسر گیردار) و تیر دو سر مفصل می‌باشد که روابط آنها را در جدول مشاهده می‌کنید.

جدول ۸: روابط تیر طره

		
$\theta_B = \frac{PL^2}{2EI}$, $\Delta_B = \frac{PL^3}{3EI}$	$\theta_B = \frac{ML}{EI}$, $\Delta_B = \frac{ML^2}{2EI}$	$\theta_B = \frac{qL^3}{6EI}$, $\Delta_B = \frac{qL^4}{8EI}$

جدول ۹: روابط تیر دو سر مفصل

		
$\theta_A = \frac{ML}{3EI}$, $\theta_C = \frac{ML}{6EI}$ $\Delta_B = \frac{ML^2}{16EI}$	$\theta_A = \theta_C = \frac{PL^2}{16EI}$ $\Delta_B = \frac{PL^3}{48EI}$	$\theta_A = \theta_C = \frac{qL^3}{24EI}$ $\Delta_B = \frac{5qL^4}{384EI}$

تذکر ۱: در تیر طره شیب در تکیه‌گاه برابر صفر است ($\theta_A = 0$) و تغییر مکان حداکثر (Δ_{max}) در انتهای تیر (نقطهٔ B) رخ می‌دهد. همچنین در تیر دو سر مفصل تحت بار گسترده و یا نیروی متمرکز در وسط دهانه، شیب در وسط تیر برابر صفر است ($\theta_B = 0$) و تغییر مکان حداکثر (Δ_{max}) در وسط دهانه رخ می‌دهد.

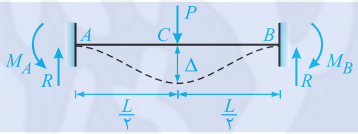
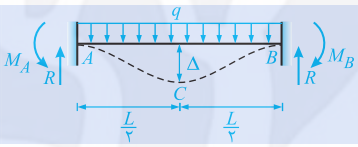
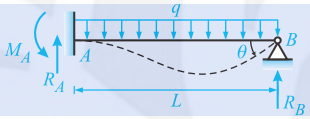
تذکر ۲: پیشنهاد می‌شود تغییر شکل‌های تیرهای طره و دو سر مفصل را تحت بار گسترده یکنواخت به خاطر بسپارید.

نکته: در تیرهای مطرح شده، اگر دو یا چند بارگذاری (مثلاً بار گسترده و بار متمرکز) با هم روی تیر اعمال شوند، تغییر شکل نهایی از مجموع دو تغییر شکل به‌دست می‌آید.

۸-۲- تیرهای نامعین معروف

شامل تیر دو سرگیردار تحت بار گستردهٔ یکنواخت و نیروی متمرکز در وسط دهانه و تیر یکسر گیردار یکسر مفصل تحت بار گستردهٔ یکنواخت می‌باشد.

جدول ۱۰: روابط تیرهای نامعین

۱		$R=\frac{P}{۲}\ ,\ M_A=M_B=\frac{PL}{۸}\ ,\ M_C=\frac{PL}{۸}$ $\Delta=\frac{PL^۳}{۱۹۲EI}\ ,\ \theta_A=\theta_B=۰$
۲		$R=\frac{qL}{۲}\ ,\ M_A=M_B=\frac{qL^۲}{۱۲}\ ,\ M_C=\frac{qL^۲}{۲۴}$ $\Delta=\frac{qL^۴}{۳۸۴EI}\ ,\ \theta_A=\theta_B=۰$
۳		$M_A=\frac{qL^۲}{۸}\ ,\ \theta=\frac{qL^۳}{۴۸EI}\ ,\ R_A=\frac{۵qL}{۸}\ ,\ R_B=\frac{۳qL}{۸}$

تذکر ۱: مشابه قسمت قبل شیب در تکیه‌گاه گیردار برابر صفر است و در تیرهای (۱) و (۲) تغییر مکان حداکثر در وسط تیر رخ می‌دهد. در تیر شمارهٔ (۳) تغییر مکان حداکثر به تکیه‌گاه مفصلی نزدیک‌تر است.

تذکر ۲: تیرهای (۱) و (۲) جزو تیرهای معروف‌تر هستند و روابط تیر شمارهٔ (۳) چندان مورد توجه نبوده است. پیشنهاد می‌کنیم روابط تیرهای (۱) و (۲) را به‌خاطر بسپارید.

نمونه سؤالات بحث (۸)

تمرین ۳۴: چنانچه طول و مقطع تیر و همچنین شدت بار گسترده وارد بر تیر ثابت باشد، کدام‌یک از تیرهای زیر تغییر شکل (تغییر مکان) بیشتری خواهند داشت؟ (دادگستری - ۷۳)

۱) تیر دو سر مفصل
۲) تیر طره (یکسرگیردار)
۳) تیر دو سرگیردار
۴) همه با هم برابرند.

حل: با توجه به روابط جدول برای هر یک از تیرها داریم:

$$\begin{cases} (۱)\ \text{تیر دو سر مفصل}: \Delta_{max}=\frac{۵qL^۴}{۳۸۴EI} \\ (۲)\ \text{تیر طره (یکسرگیردار)}: \Delta_{max}=\frac{qL^۴}{۸EI} \\ (۳)\ \text{تیر دو سرگیردار}: \Delta_{max}=\frac{qL^۴}{۳۸۴EI} \end{cases} \Rightarrow \Delta_۲>\Delta_۱>\Delta_۳$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تذکر: می‌توان گفت هر تیری که آزادی عمل بیشتری داشته باشد تغییر شکل‌های بزرگتری دارد. تیر طره از یک طرف بدون تکیه‌گاه است و به راحتی تغییر شکل می‌دهد، در حالی‌که در تیر دو سر مفصل دو طرف تکیه‌گاه وجود دارد. همچنین گیردار بودن تکیه‌گاه‌های تیر دو سرگیردار باعث جلوگیری از تغییر شکل‌های بیشتر نسبت به تیر دو سر مفصل خواهد شد.

تمرین ۳۵: **تیر A بر روی دو تکیه‌گاه ساده به طول L متر تحت اثر بار کل یکنواخت ۵۰۰ کیلوگرم بر متر در تمام طول تیر قرار دارد. اگر تیر B با دو تکیه‌گاه ساده به طول $2L$ متر تحت اثر بار یکنواخت ۲۵۰ کیلوگرم بر متر در تمام طول تیر قرار گرفته باشد:** (دادگستری - ۷۵)

۱) تغییر مکان ماکزیمم تیرهای A و B برابر است.

۲) تغییر مکان ماکزیمم تیر B دو برابر تیر A است.

۳) تغییر مکان ماکزیمم تیر B چهار برابر تیر A است.

۴) تغییر مکان ماکزیمم تیر B هشت برابر تیر A است.

حل: با توجه به روابط بیان شده برای تیر دو سر مفصل در حالت مقایسه و با فرض سطح مقطع و جنس یکسان داریم:

$$\Delta_{max}=\frac{5qL^4}{384EI} \Rightarrow \frac{\Delta_B}{\Delta_A}=\frac{q_B}{q_A}\times\left(\frac{L_B}{L_A}\right)^4=\frac{250}{500}\times\left(\frac{2L}{L}\right)^4=\frac{1}{2}\times 16=8$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۶: **تغییر مکان الاستیک محور تیرها با فرض کوچک بودن شیب آنها از حل معادلهٔ دیفرانسیل به‌دست می‌آید. برای حل معادلهٔ دیفرانسیل $\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{M}{EI}$ شرایط مرزی ارائه شده در کدام گزینه صحیح است؟ (M و V به‌ترتیب ممان و برش می‌باشند.)** (قوهٔ قضائیه - ۸۱)

۱) برای تکیه‌گاه گیردار $y=0$, $\frac{dy}{dx}=0$, $V\neq 0$, $M\neq 0$

۲) در انتهای آزاد تیرهای کنسول $y\neq 0$, $\frac{dy}{dx}=0$, $V=0$, $M=0$

۳) در تکیه‌گاه‌های لولایی $y=0$, $\frac{dy}{dx}\neq 0$, $V=0$, $M=0$

۴) در صورتی‌که I در طول تیر متغیر باشد، شرایط مرزی تیرها را بایستی از طریق آزمایش به‌دست آورد.

حل: با توجه به توضیحات درسنامه در تکیه‌گاه گیردار تغییر مکان (y) و شیب ($\theta=\frac{dy}{dx}$) برابر صفر و نیروی برشی (V) و لنگر خمشی (M) مخالف صفر است.

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۷: **گیردار بودن تکیه‌گاه‌های تیر سبب:** (قوهٔ قضائیه - ۸۷)

۱) افزایش مقاومت خمشی و کاهش تغییر شکل تیر می‌شود.

۲) افزایش مقاومت خمشی و افزایش تغییر شکل تیر می‌شود.

۳) افزایش مقاومت برشی و مقاومت خمشی تیر می‌شود.

۴) افزایش تغییر شکل تیر و کاهش مقاومت برشی تیر می‌شود.

حل: با توجه به تعاریف ارائه شده، مقاومت خمشی حداکثر لنگر قابل تحمل به مقطع می‌باشد. در مقایسهٔ دو تیر دو سر مفصل و دو سرگیردار تحت بار گستردهٔ یکنواخت با مقطع و طول یکسان برای نیروی برشی (V)، لنگر خمشی (M) و تغییر شکل (Δ) داریم:

تیر دو سرگیردار:
$$\begin{cases} V_{max}=\dfrac{qL}{۲} \\ M_{max}=\dfrac{qL^{۲}}{۱۲} \\ \Delta_{max}=\dfrac{qL^{۴}}{۳۸۴\,EI} \end{cases}$$

تیر دو سر مفصل:
$$\begin{cases} V_{max}=\dfrac{qL}{۲} \\ M_{max}=\dfrac{qL^{۲}}{۸} \\ \Delta_{max}=\dfrac{۵qL^{۴}}{۳۸۴\,EI} \end{cases}$$

از روابط فوق، می‌توان نتیجه گرفت مقاومت برشی دو تیر یکسان است (چرا؟). همچنین مقاومت خمشی تیر دو سرگیردار بیشتر از تیر دو سر مفصل است، چون در شرایط یکسان، لنگر خمشی حداکثر آن کمتر است. به عبارتی دیگر با اعمال بارگذاری یکسان (q) روی هر دو تیر، مصالح تیر دو سرگیردار تنش کمتری را تحمل می‌کنند، پس می‌توان بارگذاری بیشتری به آن وارد کرد. در مقایسهٔ تغییر شکل دو تیر نیز مشاهده می‌کنید که تغییر مکان حداکثر تیر دو سر مفصل ۵ برابر تیر دو سرگیردار است. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۳۸: دو تیر با تکیه‌گاه‌های ساده و صلبیت خمشی (EI) یکسان تحت بار گستردهٔ یکنواخت q قرار دارند. طول دهانه تیر اول ۵ متر و طول دهانه تیر دوم ۵/۵ متر می‌باشد. نسبت حداکثر تغییر شکل تیر دومی به حداکثر تغییر شکل تیر اولی به کدام یک از مقادیر زیر نزدیک‌تر است؟

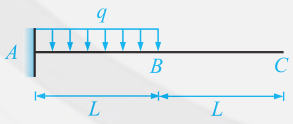
۱) ۱/۳۳ ۲) ۱/۱۰ ۳) ۱/۲۱ ۴) ۱/۴۶

حل: با توجه به یکسان بودن مقادیر q و EI در دو تیر داریم:

$$\Delta=\frac{۵qL^{۴}}{۳۸۳\,EI} \Rightarrow \frac{\Delta_{۲}}{\Delta_{۱}}=\left(\frac{L_{۲}}{L_{۱}}\right)^{۴}=\left(\frac{۵/۵}{۵}\right)^{۴}=۱/۴۶$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۳۹: در تیر زیر، خیز نقطهٔ C از انتهای آزاد تیر چقدر است؟

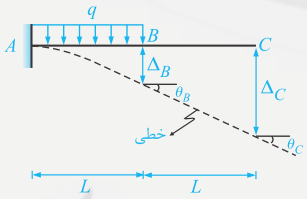


$(EI=cte)$

۱) $\dfrac{qL^{۴}}{۸\,EI}$ ۲) $\dfrac{qL^{۴}}{۶\,EI}$

۳) $\dfrac{۵qL^{۴}}{۲۴\,EI}$ ۴) $\dfrac{۷qL^{۴}}{۲۴\,EI}$

حل: در این تیر قسمت فاقد بارگذاری BC به تیر کنسولی AB اضافه شده و منحنی تغییر شکل در این طول به صورت خطی است بنابراین می‌توان نوشت:

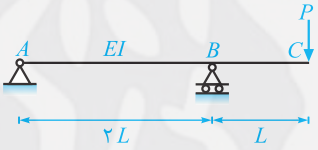


$$\downarrow \Delta_B=\frac{q(L)^{۴}}{۸EI}=\frac{qL^{۴}}{۸EI} \quad , \quad \theta_B=\frac{q(L)^{۳}}{۶EI}$$

$$\downarrow \Delta_C=\Delta_B+\theta_B\times L=\frac{qL^{۴}}{۸EI}+\frac{qL^{۳}}{۶EI}\times L=\frac{۷qL^{۴}}{۲۴EI}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۰: مقدار جابه‌جایی قائم نقطه C در تیر شکل مقابل چقدر است؟

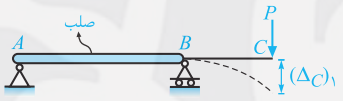


۱) $\frac{PL^۳}{EI}$ ۲) $\frac{PL^۳}{۲EI}$

۳) $\frac{PL^۳}{۳EI}$ ۴) $\frac{PL^۳}{۴EI}$

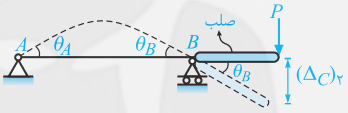
حل: تیر ABC از دو قسمت انعطاف‌پذیر تشکیل شده است: ۱) قسمت AB ۲) قسمت BC

در مرحله اول قسمت AB را صلب فرض می‌کنیم و تغییر مکان نقطه C را در اثر انعطاف‌پذیری قسمت BC به‌دست می‌آوریم. در این حالت قسمت BC مانند تیر طره عمل می‌کند و تغییر مکان نقطه C برابر است با:



$$(\Delta_C)_۱ = \frac{PL^۳}{۳EI}$$

در مرحله دوم، قسمت BC را صلب فرض می‌کنیم، در این صورت تغییر مکان نقطه C در اثر تغییر شیب در نقطه B خواهد بود، که این تغییر شیب به دلیل انعطاف‌پذیری قسمت AB می‌باشد. بنابراین داریم:



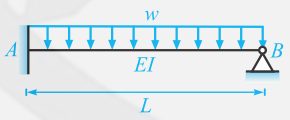
$$\theta_B = \frac{(PL)(۲L)}{۳EI} = \frac{۲PL^۲}{۳EI} \quad , \quad (\Delta_C)_۲ = \theta_B \times L = \frac{۲PL^۳}{۳EI}$$

در نهایت تغییر مکان نقطه C از مجموع تغییر مکان در مرحله اول و دوم به‌دست می‌آید:

$$\Delta_C = (\Delta_C)_۱ + (\Delta_C)_۲ = \frac{PL^۳}{۳EI} + \frac{۲PL^۳}{۳EI} = \frac{PL^۳}{EI}$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

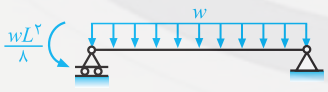
تمرین ۴۱: تغییر مکان وسط تیر AB ، کدام است؟



۱) $\frac{wL^۴}{۱۹۲EI}$ ۲) $\frac{wL^۴}{۱۴۴EI}$

۳) $\frac{wL^۴}{۹۶EI}$ ۴) $\frac{wL^۴}{۴۸EI}$

حل: تیر موردنظر نامعین است (چرا؟) بنابراین می‌توانیم برای تحلیل آن با استفاده از جدول تیرهای نامعین، لنگر تکیه‌گاه گیردار را به‌دست آوریم. در این صورت تیر به‌شکل مقابل تبدیل خواهد شد.



این تیر یک تیر دو سر مفصل است که برای محاسبه تغییرمکان وسط آن داریم:

$$\Delta_{\text{وسط}} = \underbrace{\Delta_۱}_{\text{ناشی از بار گسترده به سمت پایین}} + \underbrace{\Delta_۲}_{\text{ناشی از لنگر متمرکز به سمت بالا}} = \frac{۵wL^۴}{۳۸۴EI} - \frac{(\frac{wL^۲}{۸})\times(L^۲)}{۱۶EI} = \frac{wL^۴}{۱۹۲EI}$$

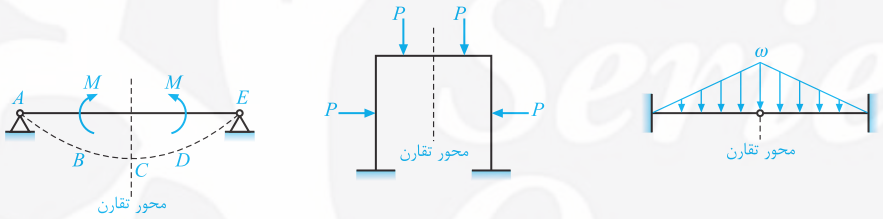
بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

بحث ۹: تقارن در سازه

به سازه‌ای که از نظر هندسه سازه (طول اعضاء و زوایا)، خواص مقاومت مصالحی اعضاء (EI، EA و ...) و شرایط تکیه‌گاهی نسبت به یک محور یا یک نقطه تقارن داشته باشد، متقارن می‌گویند. تقارن در سازه دارای خواصی است که به تحلیل آن کمک می‌کند. به‌عبارتی دیگر تحلیل سازه ساده‌تر خواهد شد. سازه‌های متقارن باتوجه به بارگذاری‌شان به چند دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند که، در ادامهٔ این بحث به دو حالت مهم آن خواهیم پرداخت.

۹-۱- سازه متقارن محوری با بارگذاری متقارن

در این سازه بارگذاری وارده نسبت به محور تقارن در دو طرف یکسان است. به مثال‌های زیر توجه کنید:



نکات مهم:

۱) در این سازه‌ها مقدار شیب و نیروی برشی (در صورت تعریف شدن) در محل محور تقارن صفر است.

$$V_C = \theta_C = 0$$

۲) در این سازه‌ها مقدار شیب و نیروی برشی در نقاط متقارن نسبت به محور تقارن قرینه یکدیگرند.

$$\begin{cases} \theta_B = -\theta_D \\ V_B = -V_D \end{cases}$$

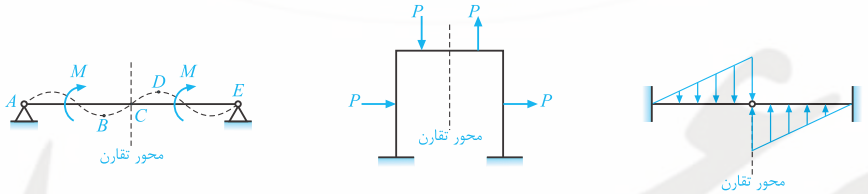
۳) در این سازه‌ها مقدار لنگر خمشی و خیز در نقاط متقارن نسبت به محور تقارن، یکسان هستند.

$$\begin{cases} \Delta_B = \Delta_D \\ M_B = M_D \end{cases}$$

۴) در مورد قاب‌های متقارن محوری با بارگذاری متقارن، نیروی محوری نسبت به محور تقارن یکسان و جابه‌جایی افقی نقاط نسبت به محور تقارن قرینه می‌باشد. اما باید دقت کرد تغییر مکان افقی محل تقاطع محور تقارن و سازه لزوماً صفر است.

۹-۲- سازه متقارن محوری با بارگذاری پاد متقارن

در این سازه تصویر هر بار نسبت به محور تقارن، با علامت قرینه و هم‌اندازه در همان فاصله و در طرف دیگر موجود می‌باشد. به مثال‌های زیر توجه کنید:



نکات مهم:

۱) در این سازه‌ها مقدار خیز قائم و لنگر خمشی (در صورت تعریف شدن) در محل محور تقارن صفر است.

$$\Delta_C = M_C = ۰$$

۲) در این سازه‌ها مقدار خیز قائم و لنگر خمشی در نقاط متقارن نسبت به محور تقارن قرینه یکدیگرند.

$$\begin{cases} \Delta_B = -\Delta_D \\ M_B = -M_D \end{cases}$$

۳) در این سازه‌ها مقدار شیب و نیروی برشی در نقاط متقارن نسبت به محور تقارن یکسان است.

$$\begin{cases} \theta_B = \theta_D \\ V_B = V_D \end{cases}$$

۴) در مورد قاب‌های متقارن محوری با بارگذاری پاد متقارن، نیروی محوری نسبت به محور تقارن قرینه و جابه‌جایی افقی نقاط نسبت به محور تقارن یکسان و هم‌جهت می‌باشد. اما باید دقت کرد که تغییر مکان قائم نقطه محل تقاطع محور تقارن و سازه صفر می‌باشد.

نمونه سؤالات بحث (۹)

تمرین ۴۲: به‌طور کلی هر بارگذاری غیرمشخص قابل تبدیل به مجموع دو بارگذاری متقارن و متقارن معکوس می‌باشد. با استفاده از تقارن هندسی و اعمال بارگذاری متقارن و متقارن معکوس کدام گزینه صحیح است؟ (قوه قضائیه - ۸۱)

۱) در یک سازهٔ متقارن تحت بارگذاری متقارن با توجه به شرط ایستایی، همیشه نیروی برشی در محل محور تقارن مساوی صفر است.

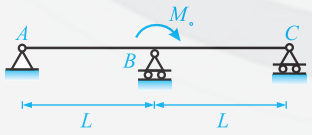
۲) در یک سازهٔ متقارن تحت بارگذاری متقارن معکوس ایستایی دیکته می‌کند که نیروی برشی و لنگر خمشی در محور تقارن صفر بشود.

۳) در یک سازهٔ متقارن با تعداد دهانهٔ فرد، برای بارگذاری متقارن می‌توان فقط نیمی از سازه را با توجه به اعمال سختی عضو روی محور تقارن مساوی نصف سختی آن عضو در حالت اولیه برای تحلیل بکار برد.

۴) در یک سازهٔ متقارن با تعداد دهانهٔ زوج، برای بارگذاری متقارن معکوس، اکثراً نیمی از سازه را با توجه به اعمال سختی عضو روی محور تقارن، مساوی دو سوم از سختی آن عضو در حالت اولیه برای تحلیل استفاده می‌کنند.

● حل: با توجه به نکات درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

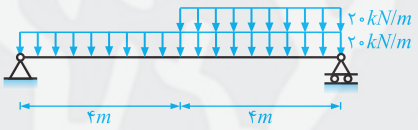
تمرین ۴۳: عکس‌العمل تکیه‌گاه B کدام است؟ (قوه قضائیه - ۸۷)



۱) صفر
۲) $\frac{M_\circ}{L}$
۳) $\frac{۲M_\circ}{L}$
۴) $\frac{M_\circ}{۲L}$

● حل: تیر نشان داده شده متقارن با بارگذاری پادمتقارن است. بنابراین براساس نکات درسنامه مقدار خیز قائم در محل محور تقارن (نقطهٔ B) برابر صفر است. باتوجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت در تکیه‌گاه B هیچ نیرویی ایجاد نخواهد شد. بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۴: لنگر خمشی در وسط تیر ساده برحسب $kN.m$ چقدر می‌باشد؟



۱) ۲۴۰ ۲) ۳۲۰
۳) ۱۶۰ ۴) ۴۸۰

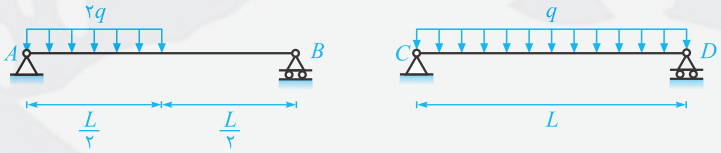
حل: سازه را به مجموع دو سازه با بارگذاری متقارن و پادمتقارن (تیر شمارهٔ (۲)) زیر تبدیل می‌کنیم. توجه کنید که در وسط سازهٔ با بارگذاری پادمتقارن، لنگر خمشی صفر است.

$$\begin{cases} (۱)\ \text{تیر}: (M_{\text{وسط}})_۱ = \dfrac{\frac{۳}{۲}q \times L^۲}{۸} = \dfrac{۳}{۱۶}qL^۲ \\ (۲)\ \text{تیر}: (M_{\text{وسط}})_۲ = ۰ \quad (\text{بارگذاری پاد متقارن}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow M = M_۱ + M_۲ = \frac{۳}{۱۶}qL^۲ = \frac{۳}{۱۶} \times ۲۰ \times ۸^۲ = ۲۴۰\, kN.m$$

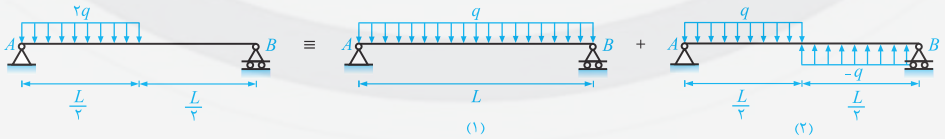
بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

تمرین ۴۵: چنانچه تغییر شکل وسط دهانه تیر AB برابر $\delta_۱$ و تغییر شکل وسط دهانه تیر CD برابر $\delta_۲$ باشد، گزینه صحیح را انتخاب کنید. (سختی خمشی هر دو تیر یکسان است).



۱) $\delta_۱ < \delta_۲$
۲) $\delta_۱ = \delta_۲$
۳) $\delta_۱ > \delta_۲$
۴) $\delta_۱ = ۰/۵\,\delta_۲$

حل: براساس اصل جمع آثار قوا بار وارده بر تیر AB را می‌توان به‌صورت زیر به دو قسمت تجزیه نمود.



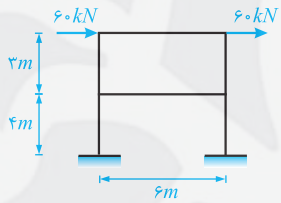
در شکل فوق، تیر شماره (۲) پادمتقارن است، پس جابه‌جایی در وسط این تیر برابر صفر می‌باشد و درنتیجه جابه‌جایی در وسط تیر AB مساوی جابه‌جایی در وسط تیر شماره (۱) است. با توجه به اینکه تیر شماره (۱) معادل تیر CD است، پس می‌توان نتیجه گرفت که جابه‌جایی در وسط تیر AB مساوی جابه‌جایی در وسط تیر CD است.

$$\delta_{AB} = \Delta_1 + \Delta_2$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است. $\Rightarrow \delta_{AB} = \Delta_1 = \delta_{CD}$ $\Rightarrow \Delta_2 = 0$ سازه پادمتقارن

$$\Delta_1 = \delta_{CD}$$

تمرین ۴۶: تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول سازهٔ دو بُعدی شکل زیر نشان می‌دهد که بیشترین بار محوری در اعضای سازه برابر $15\,kN$ است. ممان اینرسی اعضای افقی برابر I_b، اعضای قائم برابر I_c بوده و مصالح تمام اعضا یکسان است. در مورد بیشترین لنگر خمشی در بحرانی‌ترین عضو سازه در تحلیل الاستیک مرتبهٔ اول، کدام‌یک از گزینه‌های زیر صحیح است؟ از وزن اعضا و تغییر شکل‌های محوری و برشی صرف‌نظر شود.



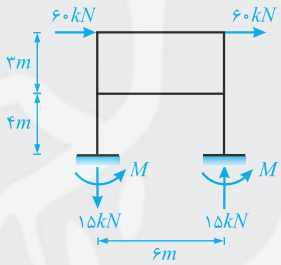
۱) $M_{max} = 840\,kN.m$

۲) $M_{max} = 300\,kN.m$

۳) $M_{max} = 420\,kN.m$

۴) $M_{max} = 375\,kN.m$

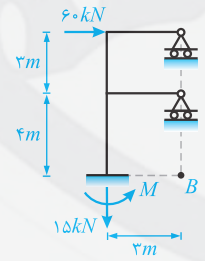
حل: سازه نشان داده شده یک سازهٔ متقارن با بارگذاری پادمتقارن است و با کمک خواص تقارن می‌توان آن را تحلیل کرد. بدین منظور با دو روش به بررسی این سؤال می‌پردازیم:



۱) استفاده از خواص تقارن روی کل سازه: با توجه به تقارن، لنگرهای خمشی و نیروی محوری پای تکیه‌گاه‌ها با هم برابر است و می‌توان با کمک معادلات تعادل مقدار لنگر خمشی را به صورت زیر به‌دست آورد:

$$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow 60\times7 + 60\times7 + M + M - 15\times6 = 0$$

$$\Rightarrow M = 375\,kN.m$$



۲) با کمک خواص تقارن ابتدا سازه را نصف کرده و سپس از معادلات تعادل استفاده می‌کنیم:

$$\Sigma M_B = 0 \Rightarrow 60\times7 + M - 15\times3 = 0 \Rightarrow M = 375\,kN.m$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین بیشتر

مهندس عزیز: پس از مطالعه این فصل، جهت بررسی سؤالات مرتبط با آن در آزمون‌های سال‌های ۸۸ به بعد به جدول انتهای کتاب مراجعه نمایید در این جدول شمارهٔ سؤالات مرتبط با این فصل در آزمون‌های مختلف مشخص شده است. جهت تمرین و تسلط بیشتر و آشنایی با سبک و سیاق طرح سؤالات در سال‌های اخیر به بررسی سؤالات بپردازید.

مهندس عزیز: در این بخش، سؤالات هر یک از آزمون‌های انتهای کتاب در جلد بعدی، براساس تفکیک فصل‌های مختلف این جلد مشخص شده است و شما می‌توانید بعد از بررسی هر فصل از این کتاب با کمک جدول تکرار زیر و تکنیک «جِت» به سؤالات همان فصل در آزمون‌های کارشناسی رسمی دسترسی پیدا کرده و با بررسی آن‌ها علاوه بر تسلط بر مفاهیم، با سبک و سیاق طرح سؤال در آزمون‌های اخیر نیز بیشتر آشنا شوید. توجه داشته باشید چنانچه با سؤالی مواجه شدید که مطلب مرتبط با آن در فصل کتاب موجود نباشد، در همان آزمون توضیحات تکمیلی جهت آموزش ارائه شده است.

بنابراین برای استفاده از این جدول ابتدا از ردیف بالا از بین ستون‌های مشخص شده، عنوان فصل مورد نظر را انتخاب کرده و سپس از ردیف‌های بعدی، آزمون دلخواه را انتخاب نموده، شمارهٔ سؤالات را از جدول استخراج کرده و به بررسی آن‌ها بپردازید.

جدول تکرار سؤالات آزمون‌های کارشناسی رسمی

فصل / آزمون	(۱) بتن	(۲) مصالح	(۳) زلزله	(۴) بارگذاری	(۵) فولاد	(۶) جوش	(۷) تحلیل
دادگستری - ۸۸	۱ تا ۸، ۴۲، ۴۴	۲۴ تا ۲۹، ۳۲، ۴۳، ۴۹، ۵۰	-	۱۵	۱۰، ۱۳، ۴۰	۱۱، ۱۲، ۱۴	۹، ۱۶
قوه قضائیه - ۸۸	۱ تا ۷، ۲۷، ۲۸، ۳۲، ۳۵، ۳۹، ۴۰	۲۴، ۳۷، ۳۸	۱۲، ۱۳، ۱۶، ۲۱	-	۱۰، ۱۴، ۱۸، ۳۱	۹، ۲۰	۸، ۱۱، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۳۰، ۳۴
دادگستری - ۹۰	۱۹ تا ۲۸	۷، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۶، ۱۷	۵۱، ۵۲، ۵۳	-	۳۲، ۳۳	۲۹ تا ۳۱، ۳۴، ۳۵، ۳۶	-
قوه قضائیه - ۹۰	۱۱ تا ۱۴، ۳۹	۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۴	۲، ۶، ۲۸، ۴۱، ۴۲، ۴۵	-	۱، ۳، ۴، ۵، ۷، ۹، ۱۰	۸	۱۵ تا ۲۱
مادهٔ ۲۷ - ۹۰	۳، ۴، ۷ تا ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۴	-	۲۷، ۲۸، ۳۰، ۳۱	-	۱۹، ۲۹، ۳۵، ۳۶	۱۱، ۱۸، ۳۴	۵، ۶، ۳۲
قوه قضائیه - ۹۳	۷، ۸، ۱۸، ۲۸، ۳۰ تا ۳۴	۱، ۳، ۴، ۵، ۹	۲۱، ۲۲، ۴۰	-	۱۴، ۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۷، ۳۹	۱۹	۶، ۱۷، ۲۵، ۳۵، ۳۶، ۳۸
دادگستری - ۹۵	۳، ۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۳۲، ۳۴، ۴۸، ۴۹، ۵۰	۱، ۲، ۴ تا ۷، ۹، ۴۱	۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۷	۱۰	۳۸، ۴۵، ۴۶، ۴۷	-	۳۳، ۳۵، ۳۶
قوه قضائیه - ۹۶	۸ تا ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۲۴ تا ۲۸، ۳۰، ۳۱، ۴۰، ۳۷، ۴۱، ۴۸، ۵۳، ۵۴، ۵۶، ۵۸، ۶۱	۱ تا ۴، ۷، ۱۱، ۱۶ تا ۱۹، ۴۵، ۵۱، ۶۳	۲۰، ۳۴، ۴۲، ۴۴، ۵۹	-	۵، ۲۲، ۲۳، ۲۹، ۴۳	۳۳، ۴۷، ۵۵	۶، ۱۳

ادامه جدول تکرار سؤالات آزمون‌های کارشناسی رسمی

فصل / آزمون	(۱) بتن	(۲) مصالح	(۳) زلزله	(۴) بارگذاری	(۵) فولاد	(۶) جوش	(۷) تحلیل
دادگستری - ۹۸	۱۰ تا ۱۲، ۱۶، ۱۹، ۲۸، ۳۵، ۳۸، ۳۹، ۴۷	۱۳	۷، ۲۱، ۲۶، ۲۷، ۳۱، ۳۲، ۴۰، ۴۳	۶	۹، ۱۷، ۳۶، ۴۸	۴۶، ۵۰	۲۵، ۳۷
قوه قضائیه - ۹۹	۱۹تا ۲۱، ۲۸ تا ۳۰، ۴۲، ۵۳، ۵۵	۲۳، ۳۷، ۴۰، ۴۱	۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۵، ۳۸	۱۸، ۲۴	۲۶، ۴۳	۲۵، ۳۶	-
قوه قضائیه - ۴۰۰	۲۱، ۲۵ تا ۲۹، ۳۸، ۴۱، ۵۴، ۵۵	۲۰، ۲۲، ۲۳، ۳۹، ۴۹، ۵۰	۳۴، ۳۵، ۳۶، ۴۰، ۴۳	-	۳۱	۴۲	-
دادگستری - ۴۰۰	۲، ۶، ۳۹	۴۳	۱، ۷، ۳۷	۳۶، ۳۸	۸، ۹، ۵۰	۱۰، ۱۶، ۴۹	۴، ۵، ۱۷، ۱۱ تا ۱۵
قوه قضائیه - ۴۰۲	۲۱، ۲۶ تا ۲۹، ۳۳، ۳۵، ۳۶	۳۴، ۵۱	۱۲ تا ۱۵، ۲۲	-	۳۰، ۳۲	۳۱	۵۳ تا ۵۵
دادگستری - ۴۰۲	۱۴ تا ۲۳	۴۱، ۴۲	۳۷، ۵۵	۳۵، ۳۶، ۵۴	۱۰، ۱۱، ۴۳، ۴۴، ۴۶	-	۸، ۹، ۱۲، ۱۳
قوه قضائیه - ۴۰۳	۱۴، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۳، ۴۷، ۵۰، ۵۴	۱۱، ۱۲، ۱۳، ۳۱، ۴۹	۳۴، ۳۵، ۴۴، ۴۶	-	۳۶، ۵۱	-	۵۵
دادگستری - ۴۰۳	۳، ۵، ۹، ۱۲ تا ۱۶، ۱۹ تا ۲۴، ۲۷	۳۸، ۳۹	۱۰، ۱۱	-	۶، ۱۸، ۲۶، ۲۸	۲۵	۱۷