طراحی سازه‌های فولادی ۱

براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان

ویرایش ۱۳۹۲

و

اقتباس شده از کتاب دکتر ایرانی

تالیف: سجاد کاظم پور

تاریخ انتشار: مهر ۹۶

فصل سوم: تحلیل قطعات کششی

مقدمه

قطعات کششی، در خرپاهای پلها و سقف‌ها، برجهای مشبک، در دستگاههای بادبندی و در موارد دیگری به عنوان میل مهار یافت می‌شوند. انتخاب مقطع مناسب برای چنین قطعه‌ای از مسائل بسیار ساده طراحی است. چون در قطعات کششی مسأله کمانش وجود ندارد. در طرح آنها کافی است که طراح نیروی ضریبداری راکه باید توسط قطعه تحمل شود به تنش طراحی تقسیم کند تا سطح مقطع مؤثر مورد نیاز به دست آید و بر اساس آن نیمرخ فولادی مناسب را انتخاب کند. این سادگی برای شروع آشنایی با نقطه‌نظرهای طراحی به روش LRFD مناسب است.

یکی از ساده‌ترین انتخابهای مقطع برای قطعات کششی میلگرد است ولی این نیمرخ معمولاً زمان اتصال به سازه، مشکل ایجاد می‌کند. درگذشته از این نیمرخ به وفور استفاده می‌شد ولی امروزه بندرت در بادبندی خرپاهای سبک و سازه‌های چوبی استفاده می‌شود. یکی از دلایلی که امروزه از میلگرد استفاده چندانی نمی‌شود این است که درگذشته به شکل نامناسبی از آن استفاده کرده‌اند، واضح است که اگر در طراحی و نصب آن نکات لازم رعایت شود می‌تواند مورد استفاده فراوانی قرار گیرد.

میلگردهای متعارف سختی خمشی اندکی دارند و به آن جهت براحتی تحت اثر وزن خود شکم می‌دهند و حداقل به شکل ظاهری سازه لطمه می‌زنند. میلگردهای رزوه شده در پلها اغلب پس از مدّتی شُل شده و شکم می‌دهند. یکی دیگر از معایب میلگردهای کششی مشکل بودن نصب آنها با اندازه دقیق مورد نیاز و مشکلات پس از نصب آنهاست.

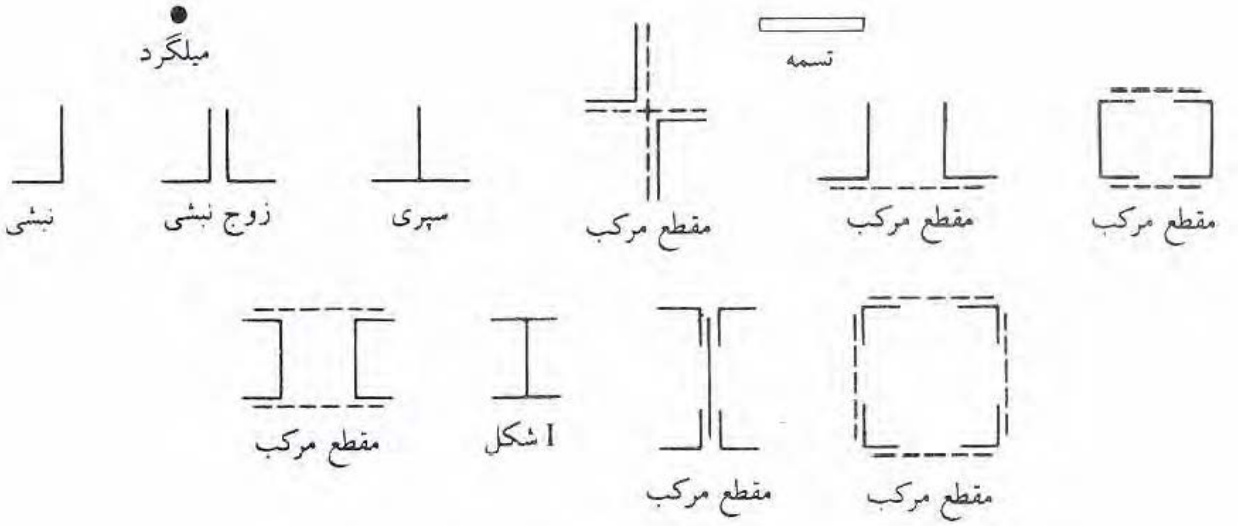
زمانی که از میلگردها برای بادبند استفاده می‌شود بهتر است در آنها تنش کششی اولیه ایجاد شود تا سبب جلوگیری از شکم دادن و نوسان بادبند گردد. برای ایجاد چنین تنشی قطعات کششی راکوتاه‌تر از آنچه مورد نیاز است می‌سازند و باکشش آن را نصب می‌کنند. متداول است که به ازاء هر متر طول میلگرد آن را ۰/۲۵ mm کوتاهتر بسازند، در این صورت تنش کششی اولیه در میلگرد برابر با:

$$f = \varepsilon E = \frac{0.25}{1000} \times (2 \times 10^6) = 500 \text{ kg/cm}^2\text{(bar)}$$

خواهد شد. روش دیگری که برای نصب مناسب میلگرد پیشنهاد می‌شود استفاده از بست قورباغه turn buckle است.

گرچه استفاده از تک نیمرخ درمقایسه با نیمرخهای مرکب قدری اقتصادی‌تر است. ولی طراحان هرگاه نتوانند از نیمرخ ساده به دلیل عدم سختی خمشی و یا سطح مقطع مناسب استفاده کنند از نیمرخهای مرکب استفاده می‌نمایند. اگر از نیمرخهای مرکب استفاده شود، باید به این نکتهٔ مهم دقت داشت که برای اجرای اتصالات در محل و یا رنگ زدن نیمرخ فضای کافی پیش‌بینی گردد.

در نیمرخهای مرکب اتصال محکم اجزا به یکدیگر توسط تسمه، لقمه در فواصل مورد نیاز و یا با استفاده از ورقهای سوراخ‌دار ممکن می‌گردد. نقش دیگر این اتصالات توزیع مناسب نیرو بین اجزا نیمرخ است و از طرف دیگر لاغری هر یک از اجزا در حد فاصل دو اتصال درمحدودهٔ لازم نگهداشته شده و امکان جابجایی سهلتر نیمرخ را مهیّا می‌سازد. به عنوان مثال اگر جابجایی تک نبشی به دلیل خم‌شدگی آن مشکل‌باشد، هرگاه چهار نبشی‌مطابق‌شکل (۳-۱) به‌یکدیگر متصل‌شوند به‌دلیل بالارفتن سختی‌خمشی آن به راحتی جابجا می‌شود. نباید تصوّر کرد که وجود پیوندها سبب بالارفتن سطح مقطع مؤثر قطعات می‌شود.



شکل ۳-۱: انواع قطعات کششی (خط‌چین‌ها معرف پیوند افقی هستند)

کابلهای فولادی از فولاد آلیاژی مخصوصی به‌کمک کارسرد (حدیده‌کاری) تا رسیدن به مقطع مورد نیاز تولید می‌شوند این نوع فولادها که استحکام کششی آنها در محدودهٔ 13800 تا $1700kg/cm^2$(bar) است، برای پلهای معلّق، سقفهای معلّق و آسانسور آسمانخراشها و موارد استعمال مشابه به‌کار می‌روند.

معمولاً هرگاه طرح کابل کششی مطرح باشد طراح از کاتالوگ سازنده استفاده می‌کند و از آن طریق تنش تسلیم فولاد و اندازه کابل مورد نیاز را برای نیروی وارده مشخص می‌کند، همچنین می‌تواند بست کابل یا سایر ابزار مورد نیاز را برای ایجاد اتصال کابل تعیین کند.

استحکام طراحی قطعات کششی

یک قطعه از فولاد نرم که در آن سوراخ پیچ و پرچی وجود ندارد به دلیل سختی مجدد کرنش نیرویی بیش از حاصل ضرب تنش تسلیم در سطح مقطع خود را تحمل می‌کند ولی یک چنین قطعه کششی در این حالت چنان تغییر شکل زیادی خواهد داد که عملاً آنرا غیرقابل مصرف می‌کند و حتی چنین تغییر شکلی می‌تواند سبب خرابی سازه‌ای گردد که این قطعه جزیی از آن محسوب می‌شود.

از طرف دیگر اگر این قطعه دارای سوراخ پیچ یا پرچ باشد امکان دارد از محل سوراخها و در مقطع خالص net section گسیخته گردد. در این حالت چنین نیرویی ممکن است بسیار کمتر از نیرویی باشد که سبب جاری شدن مقطع ناخالص قطعه می‌شود. می‌توان به راحتی درک کرد که قطعه درمحدودهٔ مقطع خالص خود بسیار کوتاه‌تر از بخشی از قطعه است که دارای مقطع ناخالص است لذا زمانی که قطعه در مقطع خالص خود سریعاً به گسیختگی می‌رسد تغییر شکل مقطع در زمان رسیدن تنش به تنش تسلیم در این بخش کوتاه از قطعه قابل صرفنظر خواهد بود.

باتوجه به آنچه گذشت در ضوابط LRFD رابطه (D1) استحکام طراحی یا $\phi_t P_n$ را کوچکترین مقدار به دست آمده از دو رابطه زیر می‌داند:

هرگاه حالت حدّی مربوط به تسلیم در مقطع ناخالص مطرح باشد (که سبب جلوگیری از تغییر شکل بیش از حدّ می‌شود).

$$P_u = \phi_t F_y A_g \qquad \phi_t = 0.9$$

هرگاه گسیختگی در مقطع خالص قطعه‌ای با سوراخ پیچ یا پرچ مطرح باشد.

$$P_u = \phi_t F_u A_e \qquad \phi = 0.75$$

در رابطهٔ اخیر F_u استحکام کششی فولاد و A_e سطح خالص مؤثر effective net area است که درمقطع سوراخ‌دار در برابر کشش مقاومت خواهد کرد. این مقطع به دلیل تمرکز تنش و سایر عواملی که ذکر شده است ممکن است کمتر از سطح خالص A_n باشد.

سطح خالص

وجود سوراخ سبب افزایش تنش در قطعهٔ کششی می‌شود حتی اگر سوراخ توسط پیچ یا پرچ پر شده باشد. (اگر از پیچ پرمقاومت استفاده شود مطلب فوق چندان صحیح نخواهد بود) سطح فولاد تحت تنش تقلیل یافته و در لبه سوراخها قدری تمرکز تنش به وجود خواهد آمد.

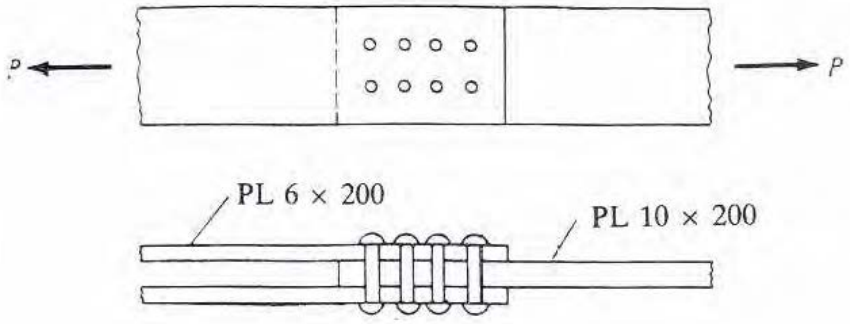
فرض است که تنش در سطح خالص به صورت یکنواخت توزیع می‌شود گرچه مطالعات فتوالاستیسیته نشان می‌دهد که افزایش تنش قابل توجهی که در اغلب زمانها چندین برابر تنش در قطعه بدون سوراخ می‌باشد در اطراف سوراخ به وجود می‌آید. در مصالح نرم هرگاه مقدار تنش بیش از تنش تسلیم باشد توزیع یکنواخت تنش در مقطع منطقی است زیرا تارهای اطراف سوراخ پس از جاری شدن دیگر تنش بیش از تسلیم را تحمل نمی‌کنند و لذا سبب توزیع مجدد و تعادل تنش می‌شوند لذا در بار نهایی می‌توان توزیع یکنواخت تنش را منطقی دانست. اهمیت شکل‌پذیری ductility قطعه در استحکام قطعات پیچی و پرچی توسط آزمایش به اثبات رسیده است. قطعات کششی ساخته شده از فولاد نرم (که دارای سوراخهای پیچی یا پرچی هستند) در حدود $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{6}$ قوی‌تر از قطعاتی بوده‌اند که با همان مقطع و همان استحکام کششی از فولاد ترد ساخته شده‌اند.

آنچه گفته شد تنها برای قطعات کششی تحت بار نسبتاً ایستا صادق است، اگر قطعه کششی عضوی از یک سازهٔ تحت بار خستگی‌آور باشد باید به نکاتی که سبب تقلیل تمرکز تنش در قطعه می‌گردد نظیر اجتناب از تغییر یکباره مقطع و حذف گوشه‌های تیز در مقطع توجه فوق‌العاده نمود.

لفظ «سطح مقطع خالص» و یا «سطح خالص» به سطحی اطلاق می‌شود که از کسر سطح سوراخها، تیزی‌ها و یا تضرّسها از سطح ناخالص مقطع به دست آید. در عمل معمولاً باید سطحی بیشتر از سطح موجود سوراخ را از مقطع ناخالص کسر کرد. به عنوان مثال در ساخت قطعه موردنظر معمولاً سوراخ را حدود 1.5mm بزرگتر از قطر پیچ می‌گیرند و علاوه بر آن عمل سوراخ‌زنی سبب خسارت دیدن حدود 1.5mm میلیمتر از جدار سوراخ می‌شود لذا سطح سوراخها به میزان 3mm بیشتر از قطر پیچها کسر می‌شود. سطحی که کسر می‌شود مستطیلی است که سطح آن برابر با حاصل‌ضرب قطر سوراخ در ضخامت ورق است.

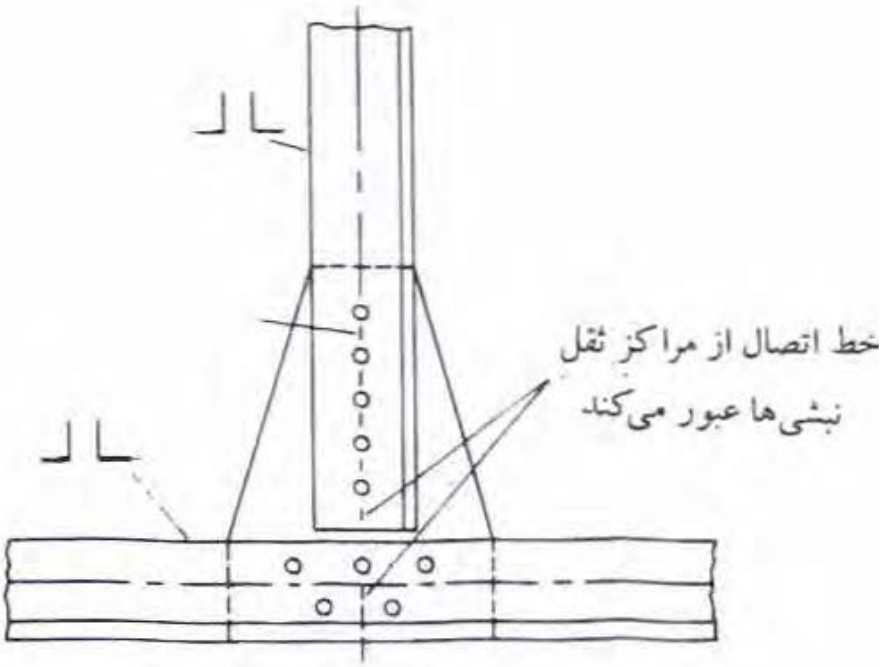
مثال ۳-۱:

سطح خالص تسمه $20cm \times 1$ نشان داده شده در شکل ۳-۲ را معین کنید. این تسمه در انتهای خود با دو ردیف پیچ $\frac{3}{4}$ in اتصال داده شده است.



شکل ۳-۲

اتصالات قطعات کششی باید بنحوی باشد که سبب ایجاد خروج از مرکزیت نشود اگر چنین باشد فرض می‌شود که توزیع تنش در مقطع خالص به صورت یکنواخت باشد. اگر اتصال دارای خروج از مرکزیت باشد، لنگرهای موجود سبب ایجاد تنشهای اضافی در اطراف اتصال خواهد شد.

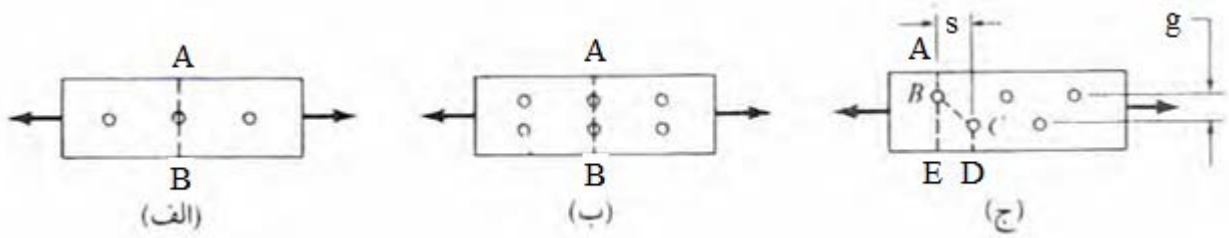


شکل ۳-۳

عملکرد پیچ‌های نامنظم

هرگاه بیش از یک ردیف سوراخ پیچ یا پرچ در قطعه کششی باشد ترجیح داده می‌شود که نظم آنها به‌نحوی باشد که در هر مقطعی که تحت تأثیر بار وارده قرار دارد بیشترین سطح مقطع خالص به دست آید. در بند قبل فرض شد که گسیختگی قطعه مشابه گسیختگی در مقطع AB در هر یک از دو شکل (۳-۴ الف) و یا (۳-۴ ب) باشد. در شکل (۳-۴ ج) قطعه‌ای نشان داده شده است که در آن امکان گسیختگی متفاوتی وجود دارد، در این قطعه امکان گسیختگی در مقطع $ABCD$ نیز وجود دارد مگر اینکه سوراخها از یکدیگر فاصلهٔ زیادی داشته باشند.

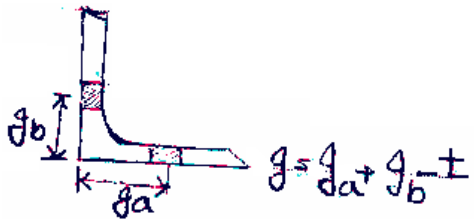
برای اینکه سطح خالص بحرانی را در شکل (۳-۴ ج) معیّن کنیم ممکن است هریک از دو مقطع AE با یک سوراخ و یا مقطع $ABCD$ را با دو سوراخ به این منظور بررسی کنیم. کمترین سطح مقطع معین شده در طول این دو مقطع، مقدار بحرانی را معین خواهد کرد. در طول خط مایل B تا C ترکیبی از تنش قائم و برشی عمل می‌کند و لذا سطح مقطع کوچکتری باید به کار رود. واضح است که استحکام مقطع در طول $ABCD$ مقداری بین استحکام مقطع خالص حاصل از حذف مقطع یک سوراخ از سطح مقطع قطعه و استحکام به دست آمده از حذف مقطع دو سوراخ از مقطع $ABCD$ خواهد بود.



شکل ۳-۴

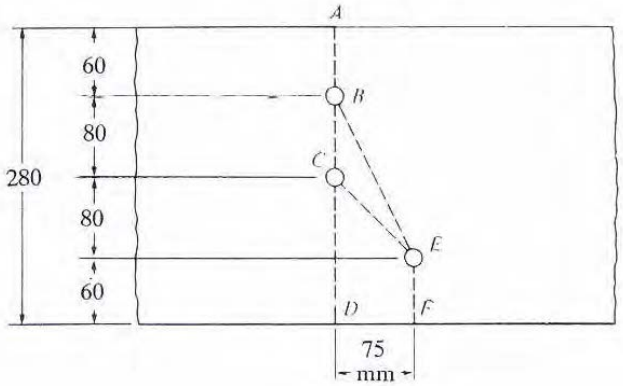
آئین‌نامه‌ها از یک رابطه بسیار ساده برای تعیین عرض خالص قطعه کششی در یک مقطع با خطوط مایل استفاده می‌کنند. در این روش ابتدا عرض ناخالص قطعه را بدون توجه به مسیر مورد بررسی معین می‌نمایند و از این عرض قطر سوراخهای واقع در مسیر راکم می‌کنند و به ازاء هر خط مایل بین دو سوراخ مقدار $s^2/4g$ را به آن می‌افزایند.

در مورد نبشی، در حالتی‌که که پیچ‌های اتصال در دو یال باشد:



مثال ۳-۲

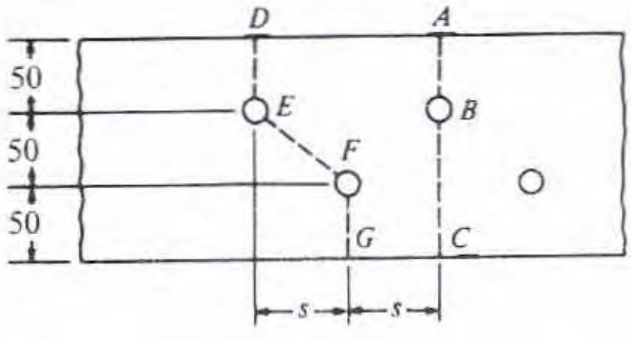
مطلوب است تعیین سطح مقطع خالص بحرانی ورقی به ضخامت 12mm که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است از مندرجات بند B2 ضوابط LRFD استفاده شود. سوراخها برای پیچهای به قطر $\frac{3}{4}$ in تعبیه شده‌اند.



شکل ۳-۵

مثال ۳-۳

برای دو ردیف پیچ نشان داده شده در شکل (۳-۶) فاصله افقی دو پیچ، s ، را طوری معین کنید که سطح خالص مسیر $DEFG$ و ABC برابر شوند. سوراخها برای پیچهای $\frac{3}{4}$ in تعبیه شده‌اند.



شکل ۳-۶

سطح خالص موثر

هرگاه قطعه‌ای به جز تسمه تحت کشش محوری قرار داشته باشد و کلیه اعضای تشکیل دهندهٔ قطعه با گره اتصال در تماس نباشند، تنش گسیختگی قطعه احتمالاً کمتر از استحکام کششی نمونه کششی قطعه خواهد بود. دلیل این اختلاف تمرکز تنش برشی (shear lag) در محدودهٔ اتصال است. در این حالت جریان تنش کششی از کل سطح مقطع قطعه به سطح مقطع اتصال یافتهٔ آن به‌صورت صد در صد نخواهد بود. بر طبق ضابطه بند B3 از LRFD سطح خالص مؤثر یک چنین قطعه از ضرب سطح خالص (درصورتی که دارای سوراخ باشد) یا سطح ناخالص قطعه (درصورتی که باجوش اتصال یافته باشد) در ضریب تقلیل U به دست می‌آید. استفاده از ضریب U، توزیع غیر یکنواخت تنش در قطعه را به‌صورت ساده در نظر می‌گیرد. ذیلاً روش تعیین U شرح داده می‌شود.

ضوابط LRFD در مورد قطعات کششی که تمام اجزاء آن اتصال ندارند به شرح زیر است:

کلیات : اگر نیروی کششی از طریق اتصالات مستقیماً به تک تک عناصر قطعه کششی منتقل شود، سطح خالص مؤثر قطعه A_e برابر با A_n خواهد بود.

قطعات با اتصال پیچی یا پرچی : اگر نیروی کششی از طریق پیچها یا پرچها به برخی از عناصر قطعه کششی (نه کلیه عناصر تشکیل دهندهٔ آن) منتقل شود مقدار A_e باید به کمک رابطهٔ زیر معین شود:

$$A_e = U A_n$$

مقدار محاسباتی U به شرح زیر خواهد بود مگر آنکه از طریق تئوری تأئید شده و یا آزمایش مقدار بیشتری معین گردد. از مقادیر U دیده می‌شود که هر قدر تعداد پیچها یا پرچها در هر ردیف از اتصال بیشتر می‌شود اثر تمرکز برشی shear lag کمتر می‌گردد.

الف - در مورد نیمرخهای I شکل و سپریهای تهیه شده از این نیمرخها به شرط آنکه در هر ردیف کمتر از سه پیچ یا پرچ نباشد و اتصالات از طریق بال نیمرخها بوده و نسبت عرض بال به ارتفاع نیمرخ کمتر از $\frac{2}{3}$ نگردد.

$$U = 0.90$$

ب - در مورد نیمرخهای I شکل و سپریهای ساخته شده از این نیمرخها هرگاه فاقد شرط‌بند (الف) باشند و در مورد سایر نیمرخها و نیمرخهای مرکب به شرط آنکه در هر ردیف از اتصال دارای حداقل سه پیچ یا پرچ در امتداد نیرو باشند.

$$U = 0.85$$

قطعات با اتصال جوشی:

۱- اگر بار کششی از طریق جوش به برخی از عناصر یک قطعهٔ کششی منتقل شود، سطح خالص مؤثر قطعه باید از ضرب ضریب تقلیل U در سطح ناخالص قطعه به دست آید.

$$A_e = U A_g$$

مقدار U همان مقادیر قبلی است با این اختلاف که مقدار آن برای دو پیچ یا پرچ در این حالت معنا ندارد، ضمناً برای حالاتی که جوش شکل عرضی و یا طولی دارد باید نکات ذکر شده در بندهای ۲ و ۳ را مراعات کرد.

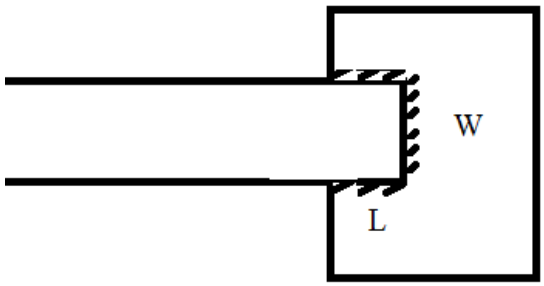
۲- اگر بار کششی تنها توسط جوش عرضی به نیمرخهای I شکل و سپریهای ساخته شده از این نیمرخها منتقل می‌شود، برای محاسبه A_e تنها باید سطح مقطع عناصری از نیمرخ را به حساب آورد که توسط جوش به آنها نیرو منتقل می‌شود.

۳- آزمایشات نشان می‌دهد که هرگاه تسمه‌ای توسط جوش گوشه (نواری) طولی اتصال یافته باشد امکان گسیختگی موضعی در لبه‌های تسمه به شرطی که جوشها از یکدیگر فاصله قابل توجهی داشته باشند وجود دارد. به این دلیل ضوابط LRFD برای چنین حالتی از اتصال الزام دارد که طول جوشها کمتر از عرض تسمه نباشد و سطح خالص مؤثر آن از رابطه UA_g که در آن مقدار U از جدول زیر استخراج خواهد شد معین گردد.

هرگاه $L > 2w$	$U = 1.0$
هرگاه $2w > L > 1.5w$	$U = 0.87$
هرگاه $1.5w > L > w$	$U = 0.75$

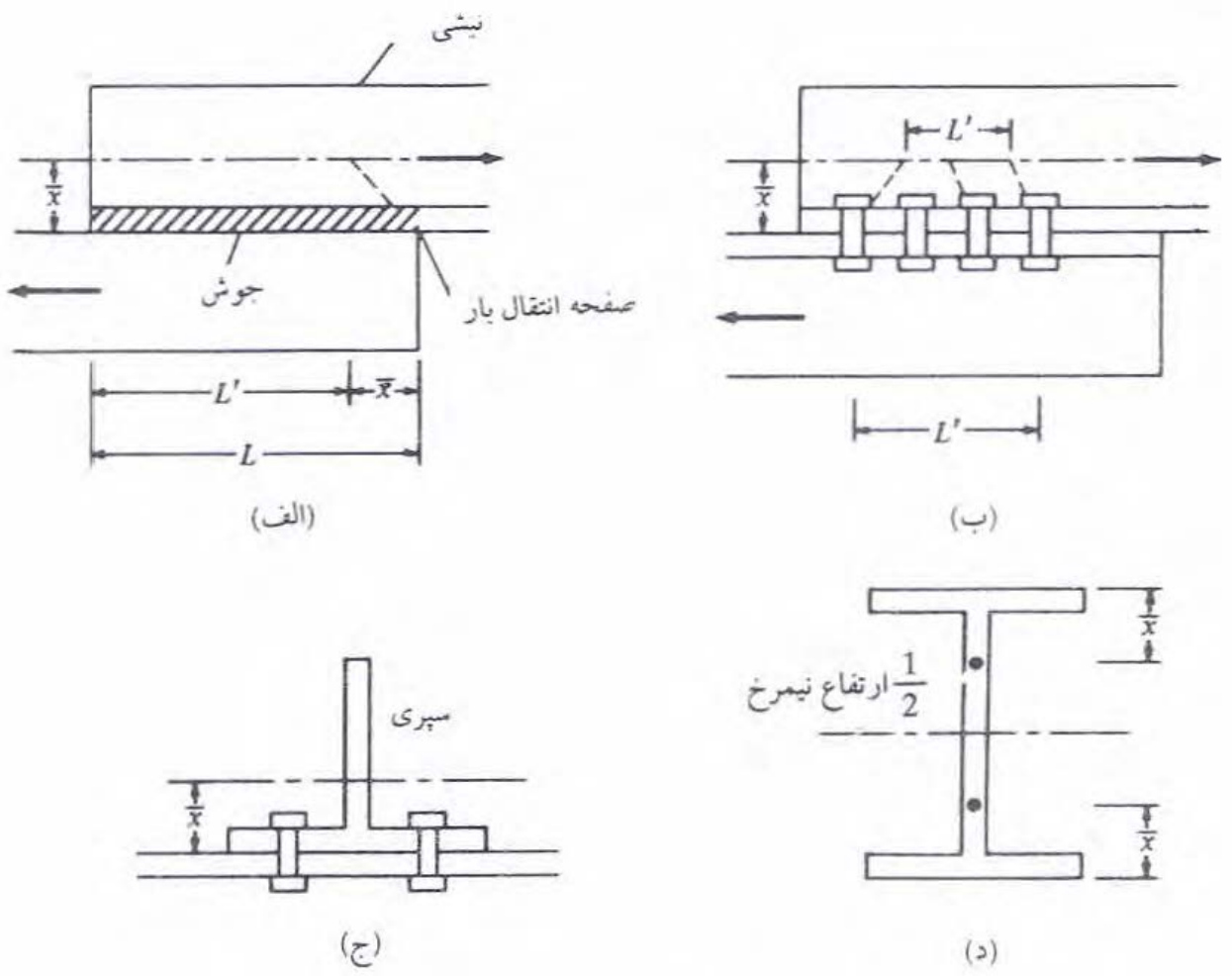
در این روابط L: طول جوش برحسب cm

w : عرض تسمه (فاصله بین دو جوش) برحسب cm



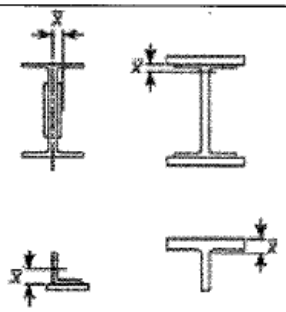
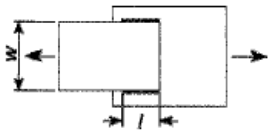
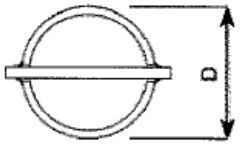
مقدار U در ضابطه B3 از LRFD از طریق رابطه تجربی $1 - \bar{x}/L$ که در آن L طول اتصال است معین شده است. این ضوابط در چنین اتصالاتی عملاً طول اتصال L را به اندازهٔ کوچکتر L' مؤثر می‌داند در این حالت مقدار U برابر با L'/L و یا $1 - \bar{x}/L$ خواهد شد. در شکل (۳- ۷) چند حالت از مقادیر $\bar{x}$ نشان داده شده است. مقادیری که برای U در آیین‌نامه آورده شده است مقدار حداقل به دست آمده از رابطه $1 - \bar{x}/L$ برای حالات مختلف است.

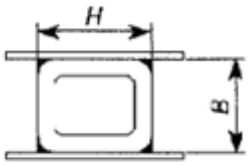
L در اتصالات پیچی فاصله مرکز تا مرکز اولین و آخرین پیچ در راستای اعمال نیروی کششی و در مورد اتصالات جوشی، طول جوش در راستای نیروی کششی می‌باشد.



شکل ۳-۷

جدول ۱۰-۲-۳-۱ ضریب تأخیر برش (U) برای اتصالات اعضای کششی

حالت	شرح	ضریب تأخیر برش، U	مثال
۱	کلیهٔ اعضای کششی که در آنها بار به وسیله پیچ، یا جوش مستقیماً به کلیه اجزای مقطع منتقل گردد (به غیر از حالت‌های ۳، ۴، ۵ و ۶)	$U = ۱$	
۲	کلیهٔ اعضای کششی (به غیر از تسمه‌ها و مقاطع قوطی و لوله‌ای) که در آنها بار به وسیله پیچ یا جوش طولی و یا ترکیبی از جوش طولی و عرضی توسط قسمتی از اجزای مقطع (و نه تمام آن) منتقل گردد.	$U = ۱ - \frac{\bar{x}}{l}$	
۳	کلیه اعضای کششی که در آنها بار فقط به وسیله جوش عرضی و توسط قسمتی از اجزای مقطع (و نه تمام آن) منتقل گردد.	$U = ۱$ A_n= سطح مقطع قسمت (یا قسمتهای) اتصال یافته	
۴	تسمه‌های کششی که با جوش‌های طولی در دو لبهٔ موازی (در انتهای قطعه) متصل‌اند. در این حالت طول جوش‌ها نباید از فاصلهٔ عمودی بین آن‌ها (پهنای تسمه) کمتر باشد.	$w \le l < ۱/۵w \dots U = ۰/۷۵$ $۱/۵w \le l < ۲w \dots U = ۰/۸۷$ $l \ge ۲w \dots U = ۱/۰$	
۵	در مقاطع لوله‌ای با یک ورق اتصال هم‌محور، که در آن طول جوش‌ها نباید از قطر لوله کمتر باشد.	$D \le l < ۱/۳D \dots U = ۱ - \frac{\bar{x}}{l}$ $l \ge ۱/۳D \dots U = ۱/۰$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
۶	در مقاطع قوطی شکل	چنانچه اتصال تنها به کمک یک ورق هم‌محور صورت گیرد که در آن طول جوش‌ها نباید از H کمتر باشد. ۱	$l \ge H \dots U = ۱ - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^۲ + ۲BH}{۴(B+H)}$

		چنانچه اتصال به کمک دو ورق اتصال و در دو وجه صورت گیرد که در آن طول جوش‌ها نباید از H کمتر باشد.	$l \geq H \quad ... \; U = ۱ - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^۲}{۴(B+H)}$	
۷	در نیمرخ‌های I نورد شده و سپری T بریده شده از آن‌ها و همچنین نیمرخ‌های دیگری نظیر بال پهن، استفاده از مقادیر بزرگتر از حالت ۲ جدول مجاز می‌باشد.	در اتصالات پیچی در صورتی که اتصال از طریق بال‌ها برقرارشده و حداقل سه وسیله اتصال در هر ردیف در امتداد تأثیر نیرو موجود باشد.	$b_f \geq \frac{۲}{۳}d \implies U = ۰/۹$ $b_f < \frac{۲}{۳}d \implies U = ۰/۸۵$	
		در اتصالات پیچی در صورتی که اتصال از طریق جان برقرار شده و حداقل چهار وسیله اتصال در هر ردیف در امتداد تأثیر نیرو موجود باشد.	$U = ۰/۷$	
۸	در نیمرخ‌های تک‌نبشی در صورتی که توسط یک بال متصل شده باشند، استفاده از مقادیر بزرگتر از حالت ۲ جدول مجاز می‌باشد.	چنانچه حداقل چهار وسیله اتصال در هر ردیف در امتداد تأثیر نیرو موجود باشد.	$U = ۰/۸$	
		چنانچه دو یا سه وسیله اتصال در هر ردیف در امتداد تأثیر نیرو موجود باشد.	$U = ۰/۶$	

در این جدول:

l= طول اتصال مساوی فاصله اولین و آخرین پیچ در اتصال پیچی و طول جوش در اتصال جوشی

w= پهنای ورق

$\bar{x}$= خروج از مرکزیت اتصال

B= پهنای کلی مقاطع قوطی شکل (عمود بر صفحهٔ اتصال)

H= ارتفاع کلی مقاطع قوطی شکل (در صفحهٔ اتصال)

$\bar{X}$: فاصله عمودی مرکز اتصال تا مرکز هندسی بخشی از عضو که نیروی آن توسط این اتصال منتقل می‌گردد.

مثال ۳-۴

مطلوب است محاسبه ظرفیت کشش یک نیمرخ بال پهن IPB 20 هرگاه این نیمرخ توسط دو ردیف پیچ به قطر $\frac{3}{4}$ in در هر بال خود به گره اتصال یافته باشد. فرض می‌شود که در هر ردیف حداقل سه پیچ وجود داشته باشد و پیچها روی مسیر زیگزاگی واقع شده باشند

ورق‌های اتصال در قطعات کششی

هرگاه ورق وصله‌ای به‌صورت قطعه‌ای با نیروی کششی محوری مطرح باشد استحکام آنها از رابطه زیر (بند J 5.2 از ضوابط LRFD) معین می‌گردد.

هرگاه تسلیم ورقها با اتصال جوشی، پیچی و یا پرچی مطرح باشد.

$$\phi_t R_n = \phi_t A_g F_y \quad \text{با} \quad \phi_t = 0.9$$

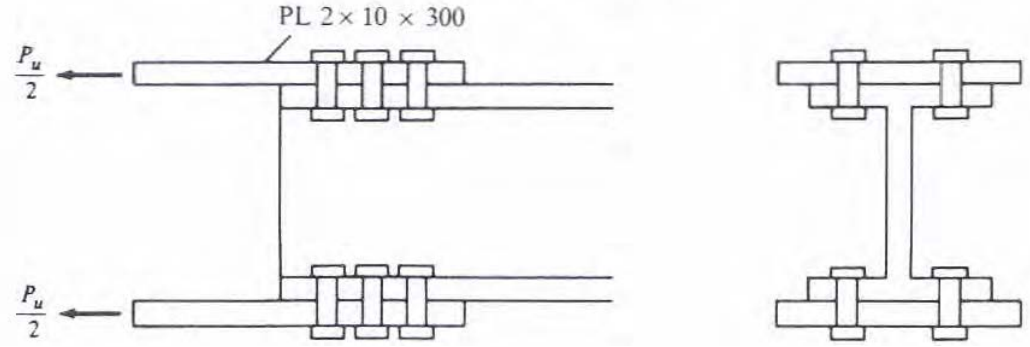
هرگاه گسیختگی ورقها با اتصال پیچی و یا پرچی مطرح باشد.

$$A_n \le 0.85 A_g \quad , \quad \phi_t = 0.75 \quad \text{با} \quad \phi_t R_n = \phi_t A_n F_u$$

در کنترل مقاومت قطعه در حالت گسیختگی، در صورت لزوم می‌بایست گسیختگی کششی در مقطع خالص موثر عضو در محل اتصال نیز بررسی گردد.

مثال ۳-۵

هرگاه قطعه کششی مذکور در شکل ۳-۶ توسط دو تسمه $PL\ 300 \times 10$ mm مطابق شکل (۳- ۸) اتصال یافته باشد و در اتصال از دو ردیف پیچ $\frac{3}{4}$ in در هر تسمه استفاده شده باشد مطلوب است تعیین نیروی کششی نهایی که این قطعه کششی قادر به تحمل آن خواهد بود.



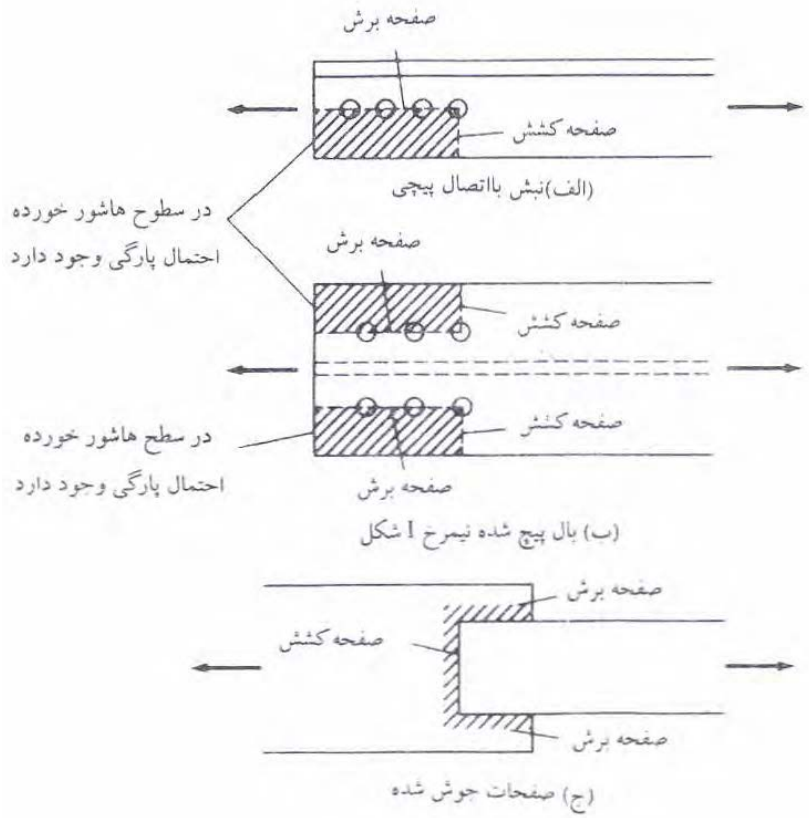
شکل ۳-۸

برش قالبی *Block Shear*

استحکام طراحی یک قطعه کششی همواره براساس روابط $\phi_t F_y A_g$ یا $\phi_t F_u A_e$ و یا استحکام پیچها و یا جوشهای اتصال دهندهٔ قطعه معین نمی‌شود بلکه ممکن است براساس استحکام حوزه برشی به‌صورتی که در ذیل شرح داده می‌شود معین گردد.

گسیختگی یک قطعه ممکن است مطابق آنچه در شکل (۳-۹) برای گسیختگیهای مختلف یک حوزه برشی نشان داده شده است به صورتی انجام گیرد که در سطحی از قطعه کشش و در سطح عمود بر آن برش حاکم باشد.

امکان اینکه در هر دو سطح (برشی و کششی) لحظه گسیختگی به صورت همزمان حادث گردد بسیار غیرمحتمل است، بلکه منطقی این است که تصوّر شود در لحظه شکست قطعه، در سطحی تنش به تنش تسلیم رسیده و در سطح دیگر به تنش گسیختگی برسد؛ لذا منطقی نخواهد بود که برای تعیین استحکام نهایی (شکست) قطعه استحکام گسیختگی در یک سطح را بر استحکام گسیختگی در سطح دیگر بیفزاییم.



شکل ۳-۹

$$R_n = ۰/۶F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq ۰/۶F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

که در آن:

A_{gv} = سطح مقطع کلی تحت برش

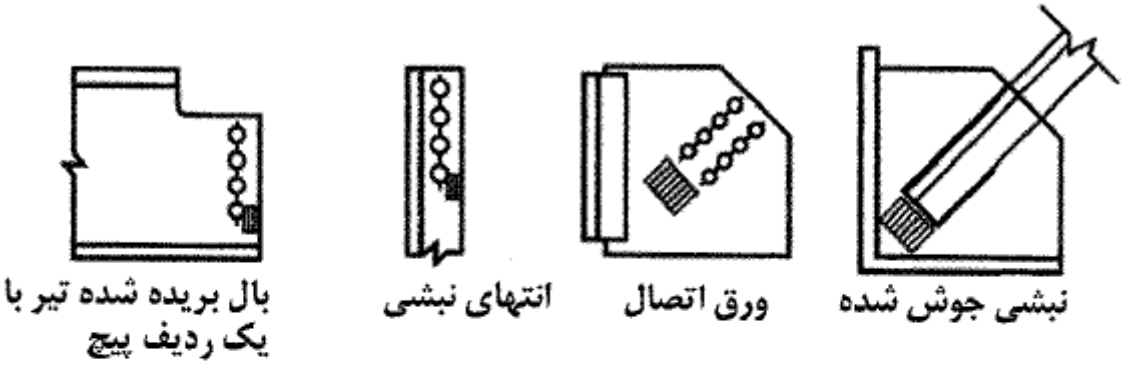
A_{nt} = سطح مقطع خالص تحت کشش

A_{nv} = سطح مقطع خالص تحت برش

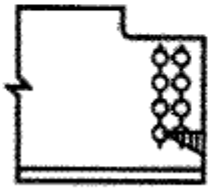
F_y = تنش تسلیم فولاد

F_u = تنش کششی نهایی فولاد

U_{bs} = ضریب توزیع تنش که برای توزیع یکنواخت تنش کششی در انتهای عضو مقدار آن مساوی یک و برای توزیع غیریکنواخت تنش کششی در انتهای عضو مقدار آن مساوی ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.



(a) حالت‌هایی که در آنها U_{bs}=۱/۰ در نظر گرفته می‌شود



بال بریده شده تیر با دو ردیف پیچ

(b) حالت‌هایی که در آنها U_{bs}=۰/۵ در نظر گرفته می‌شود

شکل ۳-۱۰: توزیع تنش کششی در برش قالبی

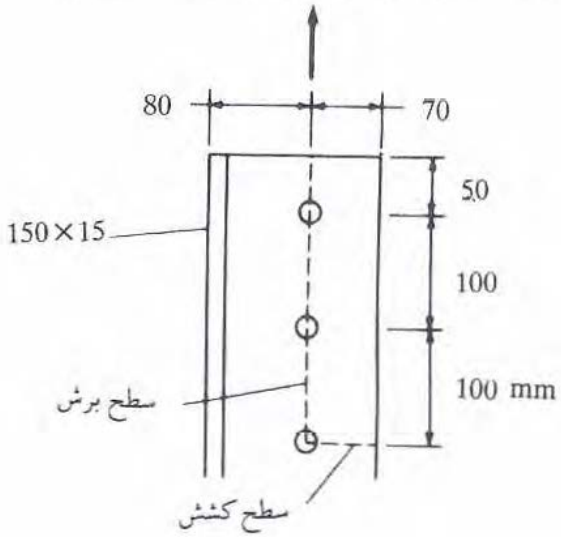
محدودیت لاغری در اعضای کششی

ضریب لاغری حداکثر اعضای کششی، $(L/r)_{max}$، نباید از ۳۰۰ تجاوز نماید. برای قلاب‌ها و میله مهارهای کششی که دارای پیش‌تنیدگی اولیه به مقدار کافی باشند، به طوری که پس از ایجاد کشش اولیه عضو به حالت مستقیم درآید، رعایت محدودیت لاغری ضروری نیست.

فلسفه چنین محدودیتی در قطعات کششی، اطمینان از سختی مناسب قطعه در برابر خیز جانبی و یا ارتعاش آن می‌باشد. اگرچه قطعات کششی تحت اثر کمانش واقع نمی‌شوند، ولی امکان دارد در زمان نصب و یا جمل و نقل آن و یا در اثر باد و نیروهای مشابه تحت فشار واقع گردند.

مثال ۳-۶

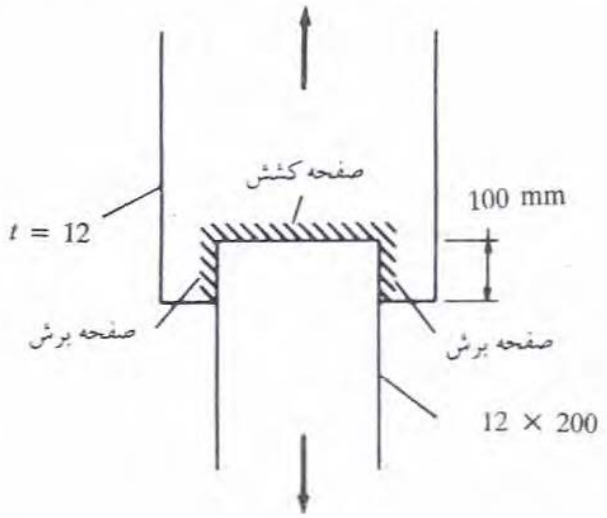
در شکل (۳-۱۱) یک نبشی از فولاد نرمه که توسط سه پیچ به قطر $\frac{3}{4}$ in اتصال یافته نشان داده شده است مطلوب است تعیین استحکام حوزه برشی و تعیین استحکام کششی قطعه.



شکل ۳-۱۱

مثال ۳-۷

مطلوب است تعیین استحکام حوزه برشی قطعه نشان داده شده در شکل (۳-۱۲)، نوع فولاد نرمه است،



شکل ۳-۱۲

طراحی (تعیین) مقطع قطعات کششی

در مسائل طراحی استحکام طراحی P_u کوچکترین مقدار از دو رابطه زیر خواهد بود:

الف - $\phi_t F_y A_g$ ب - $\phi_t F_u A_e$

الف - برای اینکه رابطه اول تأمین گردد باید سطح ناخالص حداقل برابر با مقدار زیر باشد:

$$A_{g\,\text{حداقل}} = \frac{P_u}{\phi_t F_y} \qquad (۱)$$

ب - برای اینکه رابطه دوم تأمین گردد باید سطح خالص مؤثر حداقل برابر با مقدار زیر باشد:

$$A_{e\,\text{حداقل}} = \frac{P_u}{\phi_t F_u}$$

و چون $A_e = UA_n$ است لذا باید سطح خالص حداقل برابر با مقدار زیر باشد.

$$A_{n\,\text{حداقل}} = \frac{A_{e\,\text{حداقل}}}{U} = \frac{P_u}{\phi_t F_u U}$$

از آنجاکه مقدار حداقل A_g در رابطه (الف) باید برابر با مجموع حداقل A_n و سطوح سوراخها باشد خواهیم داشت:

$$A_g \text{ حداقل} = \frac{P_u}{\phi_t F_u U} + \text{(سطوح سوراخها)} \qquad (۲)$$

برای حدس اولیه قطعه می‌توان بیشترین مقدار به دست آمده از دو رابطه (۱) و (۲) را برای A_g انتخاب کرد. بهتر است به خاطر داشته باشیم که حداکثر لاغری توصیه شده برای قطعات کششی ۳۰۰ است و

به این طریق می‌توان مقدار شعاع ژیراسیون r را بنحوی که لاغری قطعه را برابر با ۳۰۰ ارائه دهد معین کنیم بدیهی است مقطع انتخابی ما نمی‌تواند شعاع ژیراسیون حداقلی کمتر از مقدار r داشته باشد زیرا ضریب لاغری حداکثر توصیه شده ۳۰۰ است.

$$r \text{ حداقل} = \frac{L}{300} \qquad (۳)$$

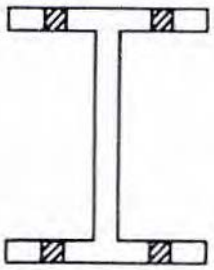
هرگاه میلگردی به عنوان قطعه کششی به کار رود می‌توان محل اتصال آن را جوش داد و یا رزوه کرده و توسط مهره محکم کرد. برطبق ضوابط LRFD تنش طراحی کششی میلگردهای رزوه شده برابر با $\phi\ 0.75\ F_u$ است که این تنش در سطح مقطع ناخالص A_D قطعه محاسبه خواهد شد، غرض از سطح ناخالص سطح مقطع بیرونی میلگرد است. به این ترتیب سطح مقطع مورد نیاز برای یک بار کششی موردنظر از رابطهٔ زیر محاسبه خواهد شد:

$$A_D = \frac{P_u}{\phi\ 0.75\ F_u} \qquad \text{با} \quad \phi = 0.75$$

نکته: توصیه می‌شود که قطر میلگرد کمتر از یک پانصدم طول آن نباشد.

مثال ۳-۸

مطلوبست طرح یک نیمرخ IPB به طول آزاد 9 m که بار کششی مرده $P_D = 60$ ton و بار کششی زنده $P_L = 35$ ton را تحمل کند. بالهای این نیمرخ توسط پیچهایی به قطر $\frac{7}{8}$ in و به تعداد حداقل ۳ پیچ در هر ردیف به تکیه گاه متصل خواهد شد

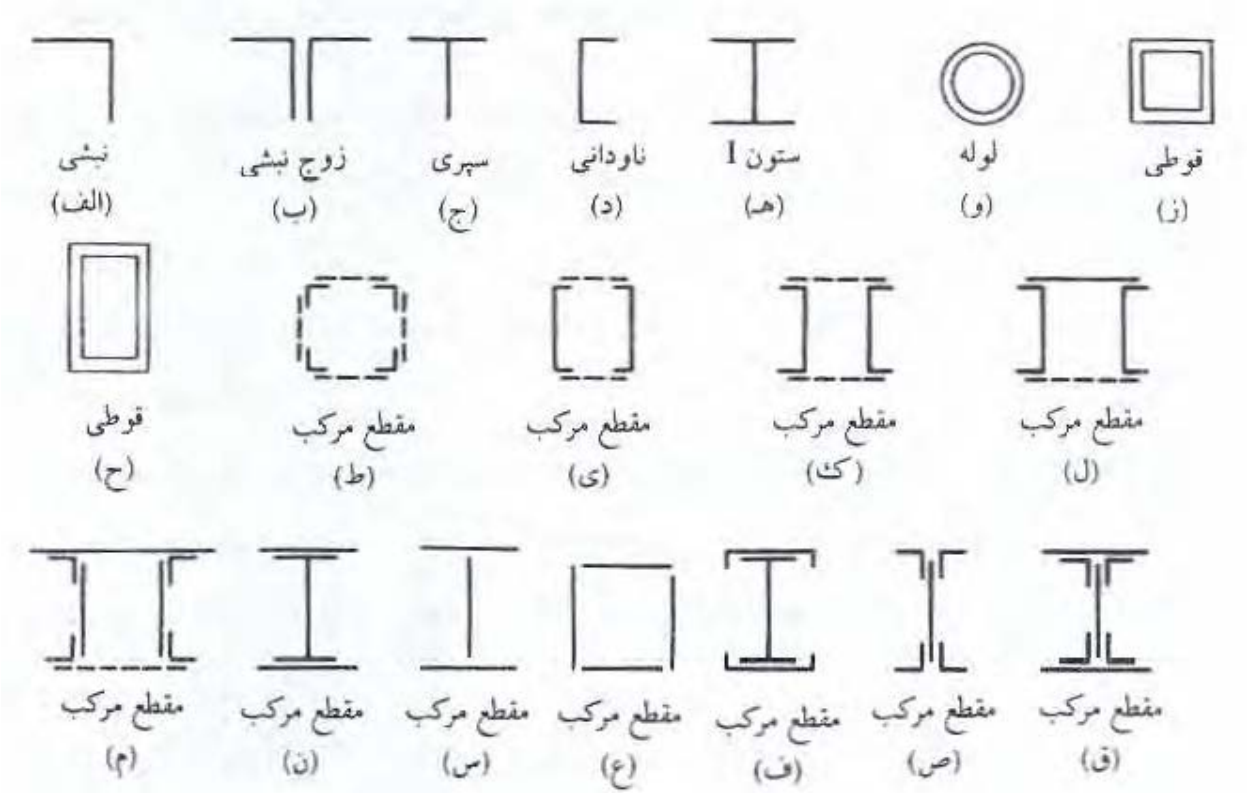


شکل ۳-۸

فصل چهارم: طراحی اعضای فشاری

مقدمه

نیمرخ‌های مناسب برای ستون‌ها



شکل ۴-۱: انواع قطعات فشاری متداول

کمانش ستون (*Buckling*) و تعیین ضریب طول موثر آن

ضریب لاغری (λ) K : ضریب طول موثر L : بزرگترین طول مهار نشده عضو حول محور کمانش r : شعاع ژیراسیون مقطع عضو	$\lambda = \frac{K.L}{r}$

نکته ۱: ضریب لاغری حول هر دو محور یک ستون قابل بررسی می‌باشد. طبیعتا ضریب لاغری بزرگتر، بحرانی‌تر خواهد بود.

نکته ۲: صفحه کمانش، صفحه‌ایست که عضو در آن کمانش می‌کند و محور کمانش عمود بر صفحه کمانش است.

نکته ۳: طبق الزام آئین‌نامه، ضریب لاغری قطعات فشاری نباید بیش از ۲۰۰ باشد.

ضریب طول موثر ستون‌هایی با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل

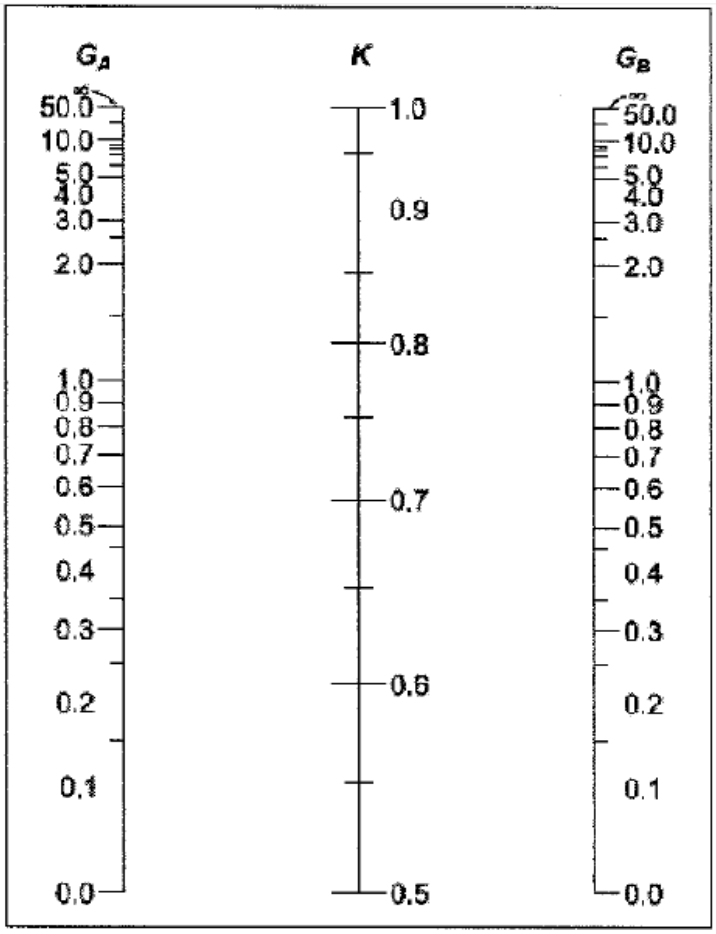
	(الف)	(ب)	(ج)	(د)	(هـ)	(و)
شکل کمانه کرده ستون خط‌چین نشان داده شده است						
مقدار نظری K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
مقادیر توصیه شده K برای طراحی سازه‌های فولادی	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
علائم شرایط حدّی	دوران و جابجایی غیرممکن دوران ممکن و جابجایی غیرممکن دوران غیرممکن و جابجایی آزاد دوران و جابجایی آزاد					

قاب‌های مهار شده و طول موثر 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. در این گونه قاب‌ها، ضریب طول موثر (K) برای اعضای فشاری باید برابر ۱/۰ در نظر گرفته شود مگر آن‌که تحلیل دقیق مقدار کمتری را تعیین نماید.

مطابق الزامات پیوست مبحث ۱۰ می‌توان ضریب طول موثر (K) اعضاء فشاری قاب‌های مهارشده را از رابطه پ-۱-۱ و یا نموگراف شکل پ-۱-۱ نیز محاسبه نمود.

$$\frac{G_A G_B}{۴}(\pi/K)^۲ + \left(\frac{G_A+G_B}{۲}\right)\left(۱ - \frac{\pi/K}{tg(\frac{\pi}{K})}\right) + \frac{۲tg(\frac{\pi}{۲K})}{(\pi/K)} - ۱ = ۰ \qquad (پ-۱-۱)$$



شکل پ-۱-۱ ضریب طول موثر (K) اعضای فشاری قاب‌های مهارشده برحسب G_A و G_B

که در آن G_A و G_B پارامترهای مبین دو انتهای A و B عضو فشاری بوده و عبارتند از:

$$G_A = \frac{\sum(\frac{EI}{L})\ \text{ستون‌های متصل به گره A}}{\sum(\frac{EI}{L})\ \text{تیرهای متصل به گره A}}$$

$$G_B = \frac{\sum(\frac{EI}{L})\ \text{ستون‌های متصل به گره B}}{\sum(\frac{EI}{L})\ \text{تیرهای متصل به گره B}}$$

E= مدول الاستیسیته فولاد

I= ممان اینرسی تیرها و ستون‌ها حول محور عمود بر صفحهٔ کمانش

L= طول اعضا

در محاسبهٔ G_A و G_B با استفاده از روابط باید ملاحظات زیر مورد توجه قرار گیرند:

(۱) برای انتهای گیردار ستون که ضریب G به صورت نظری صفر است، مقدار G برابر یک فرض شود.

(۲) برای انتهای مفصلی ستون که ضریب G به صورت نظری بی‌نهایت است، مقدار G برابر ۱۰ فرض شود.

(۳) هرگاه تیر متصل به عضو فشاری طره‌ای باشد، EI/L آن تیر مساوی صفر در نظر گرفته شود.

(۴) هرگاه انتهای نزدیک تیر متصل به عضو فشاری مفصلی باشد، EI/L آن تیر مساوی صفر در نظر گرفته شود.

(۵) هرگاه انتهای دور تیر متصل به عضو فشاری مفصلی باشد، EI/L آن تیر باید در ضریب ۱/۵ ضرب شود.

(۶) هرگاه انتهای دورتیر متصل به عضو فشاری به یک تکیه‌گاه گیردار متصل باشد، EI/L آن تیر باید در ضریب ۲ ضرب شود.

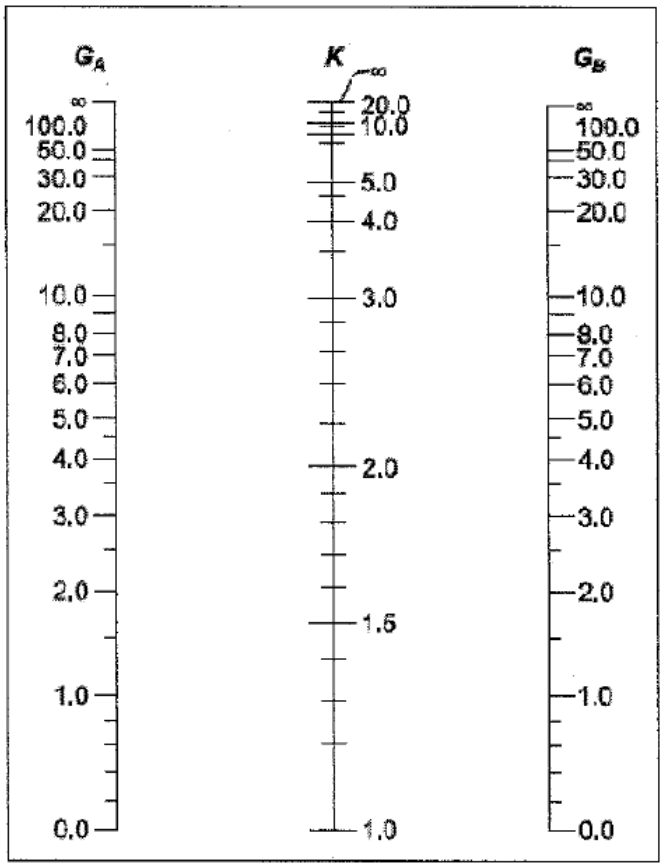
قاب‌های مهارنشده و طول موثر کمانشی اعضا

قاب‌های مهارنشده 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 به دست آید و هیچ‌گاه نباید کوچکتر از ۱/۰ در نظر گرفته شود. در این مبحث می‌توان ضریب طول موثر اعضای فشاری قاب‌های مهار نشده را از رابطهٔ تعیین نمود.

$$K = \sqrt{\frac{۱/۶G_AG_B + ۴(G_A+G_B)+۷/۵}{G_A+G_B+۷/۵}} \geq ۱/۰$$

یا

$$\frac{[G_AG_B(\pi/K)^۲-۳۶]}{۶(G_A+G_B)} - \frac{\pi/K}{tg(\frac{\pi}{K})} = ۰$$



شکل پ-۱-۲ ضریب طول موثر (K) اعضای فشاری قاب‌های مهارنشده برحسب G_A و G_B

در محاسبهٔ G_A و G_B با استفاده از روابط باید ملاحظات زیر مورد توجه قرار گیرند:

(۱) برای انتهای مربوط به تکیه‌گاه گیردار ستون که ضریب G به صورت نظری صفر است، مقدار G برابر یک فرض شود.

(۲) برای انتهای مربوط به تکیه‌گاه مفصلی ستون که ضریب G به صورت نظری بی‌نهایت است، مقدار G برابر ۱۰ فرض شود.

(۳) هرگاه تیر متصل به عضو فشاری طره‌ای باشد، $\frac{EI}{L}$ آن تیر مساوی صفر در نظر گرفته شود.

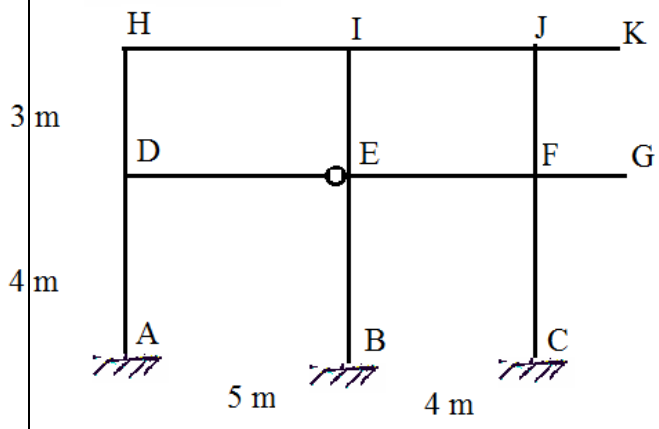
(۴) هرگاه انتهای نزدیک تیر متصل به عضو فشاری مفصلی باشد، $\frac{EI}{L}$ آن تیر مساوی صفر در نظر گرفته شود.

(۵) هرگاه انتهای دور تیر متصل به عضو فشاری مفصلی باشد، $\frac{EI}{L}$ آن تیر باید در ضریب ۰/۵ ضرب شود.

(۶) هرگاه انتهای دور تیر متصل به عضو فشاری به تکیه‌گاه با دوران مقید لیکن انتقال جانبی آزاد متصل باشد، $\frac{EI}{L}$ آن تیر باید در ضریب $\frac{۲}{۳}$ ضرب شود.

مثال ۴-۱

در قاب شکل زیر، ضریب طول موثر ستون‌ها را محاسبه نمائید.



ستون ها { طبقه اول IPB300
طبقه دوم IPB240
تیرها IPE200

طبقه‌بندی مقاطع فولادی از منظر کمانش موضعی

طبقه‌بندی مقاطع فولادی از منظر کمانش موضعی برای فشار محوری

برای فشار محوری، مقاطع فولادی به دو گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

- مقاطع با اجزای غیرلاغر
- مقاطع با اجزای لاغر

مقاطع با اجزای غیرلاغر به مقاطعی گفته می‌شوند که در آنها نسبت پهنا به ضخامت اجزای فشاری تشکیل دهندهٔ مقطع عضو از λ_r مشخص شده در جداول ۴-۱و ۴-۲ تجاوز ننماید.

چنانچه نسبت پهنا به ضخامت هر یک از اجزای فشاری تشکیل دهندهٔ مقطع عضو از λ_r مشخص شده در جداول ۴-۱و ۴-۲ تجاوز نماید، در این صورت مقطع با اجزای لاغر محسوب می‌گردد.

تبصره: مطابق مقررات مبحث ۱۰، استفاده از مقاطع فولادی با اجزای لاغر در اعضایی که تحت اثر فشار محوری قرار دارند، مجاز نمی‌باشد.

طبقه بندی مقاطع فولادی از منظر کمانش موضعی برای خمش

برای خمش، مقاطع فولادی به سه گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

- مقاطع فشرده
- مقاطع غیر فشرده
- مقاطع با اجزای لاغر

الف) مقاطع فشرده به مقاطعی گفته می‌شوند که در آنها اولاً بال‌ها به طور سرتاسری و پیوسته به جان یا جان‌ها متصل باشند، ثانیاً نسبت پهنا به ضخامت اجزای فشاری تشکیل دهندهٔ مقطع عضو از λ_p مشخص شده در جداول ۴-۳ و ۴-۴ تجاوز ننماید.

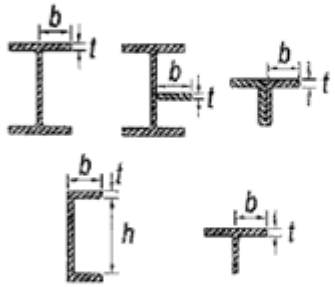
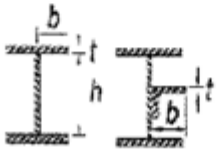
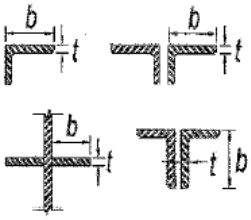
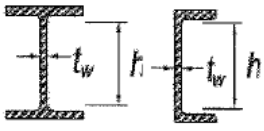
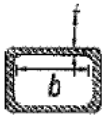
ب) مقاطع غیرفشرده به مقاطعی گفته می‌شوند که در آنها نسبت پهنا به ضخامت یک یا چند جزء فشاری از مقطع عضو از λ_p مشخص شده در جداول ۴-۳ و ۴-۴ تجاوز نموده ولی از λ_r مشخص شده در جداول ۴-۳ و ۴-۴ کوچکتر باشد.

پ) مقاطع با اجزای لاغر به مقاطعی گفته می‌شوند که در آنها نسبت پهنا به ضخامت حداقل یکی

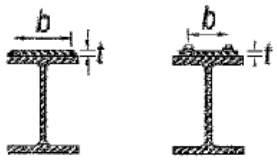
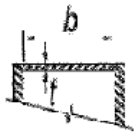
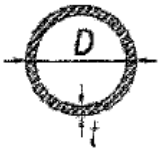
از اجزای فشاری تشکیل‌دهندهٔ مقطع عضو از λ_r مشخص شده در جداول ۴۰-۳ و ۴-۴ بزرگتر باشد.

تبصره: مطابق مقررات این مبحث، از به کار بردن مقاطع فولادی با اجزای فشاری لاغر در اعضایی که تحت تأثیر تنش فشاری ناشی از خمش قرار دارند، باید خودداری شود، مگر برای جان تیرورق‌ها که در این صورت الزامات بخش‌های مربوطه باید تأمین گردد.

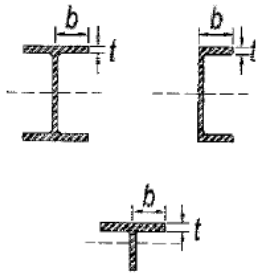
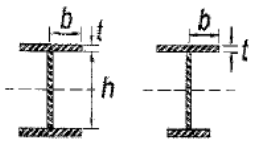
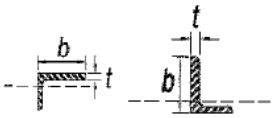
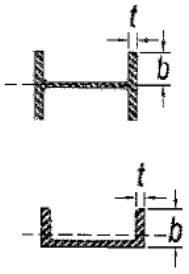
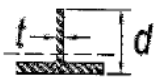
جدول ۴-۱ نسبت‌های پهنا به ضخامت اجزای فشاری تقویت نشده در اعضای تحت اثر فشار محوری

حالت	شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت، λ_r (لاغر/غیرلاغر)	مثال‌های نمونه
۱	بال‌های مقاطع I شکل نورد شده، ورق‌های بیرون‌زده از مقاطع I شکل نورد شده، ساق‌های برجستهٔ جفت نبشی با اتصال پیوسته، بال‌های مقاطع ناودانی و بال‌های مقاطع سپری	b/t	$0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [a]	
۲	بال‌های مقاطع I شکل ساخته شده از ورق و ورق‌ها یا ساق‌های نبشی بیرون زده از مقاطع I شکل ساخته شده از ورق	b/t	$0.64\sqrt{\frac{E.Kc}{Fy}}$	
۳	ساق‌های نبشی‌های تک، ساق‌های نبشی‌های دوبل دارای جداکننده (لقمه) و سایر اجزای تقویت نشده	b/t	$0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۴	تیغه (جان) مقاطع سپری	d/t	$0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۵	جان مقاطع I شکل با دو محور تقارن و جان مقاطع ناودانی	h/t_w	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۶	بال‌های مقاطع توخالی مستطیلی شکل (HSS) و جعبه‌ای با ضخامت یکنواخت	b/t	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

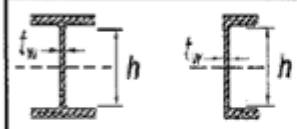
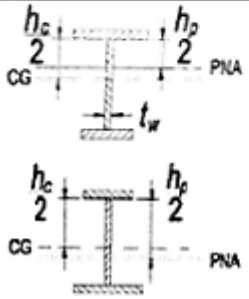
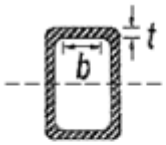
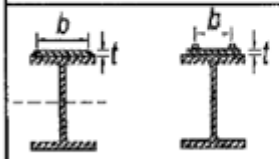
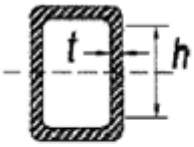
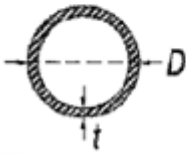
جدول ۴-۲ نسبت‌های پهنا به ضخامت اجزای فشاری تقویت شده در اعضای تحت اثر فشار محوری

حالت	شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت، λ_r (لاغر/غیرلاغر)	مثال‌های نمونه
۷	ورق‌های پوششی و ورق‌های دیافراگم در حد فاصل خطوط جوش یا پیچ	b/t	$1/40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۸	سایر اجزای فشاری تقویت شده	b/t	$1/49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۹	مقاطع توخالی دایره‌ای شکل	D/t	$0/11\frac{E}{F_y}$	

جدول ۴-۳ نسبت‌های پهنا به ضخامت اجزای فشاری تقویت نشده در اعضای تحت اثر خمش

حالت	شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت		مثال‌های نمونه
			λ_p (غیرفشرده/ فشرده)	λ_r (لاغر/ غیرفشرده)	
۱۰	بال‌های مقاطع I شکل نورد شده، ناودانی‌ها و سپری‌ها	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۱	بال‌های مقاطع I شکل ساخته شده از ورق با یک یا دو محور تقارن	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95\sqrt{\frac{K_c E}{F_L}}$ [b], [c]	
۱۲	ساق‌های نبشی‌های تک	b/t	$0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۳	بال‌های کلیه مقاطع I شکل و ناودانی تحت اثر خمش حول محور ضعیف	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۴	تیغه (جان) مقاطع سپری	d/t	$0.84\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

جدول ۴-۴ نسبت‌های پهنا به ضخامت اجزای فشاری تقویت شده در اعضای تحت اثر خمش

حالت	شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت		مثال‌های نمونه
			λ_p (غیرفشرده/ فشرده)	λ_r لاغر / غیرفشرده	
۱۵	جان مقاطع I شکل با دو محور تقارن و جان مقاطع ناودانی	h/t_w	$۳/۷۶\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$۵/۷۰\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۶	جان مقاطع I شکل با یک محور تقارن	h_c/t_w	$\frac{\frac{h_c}{h_p}\sqrt{\frac{E}{F_y}}}{(۰/۵۷\frac{M_p}{M_y}-۰/۰۹)^۲} \le \lambda_r$ [d]	$۵/۷۰\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۷	بال‌های مقاطع توخالی مستطیلی شکل (HSS) و جعبه‌ای با ضخامت یکنواخت	b/t	$۱/۱۲\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$۱/۴۰\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۸	ورق‌های پوششی و ورق‌های دیافراگم در حد فاصل خطوط جوش یا پیچ	b/t	$۱/۱۲\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$۱/۴۰\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۱۹	جان‌های مقاطع توخالی مستطیل شکل (HSS) و جعبه‌ای	h/t	$۲/۴۲\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$۵/۷۰\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
۲۰	مقاطع توخالی دایره‌ای شکل	D/t	$۰/۰۷\frac{E}{F_y}$	$۰/۳۱\frac{E}{F_y}$	

یادداشت‌ها:

[a]

E = مدول الاستیسیته فولاد

F_y = تنش تسلیم فولاد

[b] مقدار K_c از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد.

$$۰/۳۵ \le K_c = \frac{۴}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \le ۰/۷۶$$

[c] برای خمش حول محور قوی در مقاطع I شکل ساخته شده از ورق با جان فشرده و غیرفشرده مقدار F_L از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد.

- برای $\frac{S_{xt}}{S_{xc}} \ge ۰/۷$ $\quad F_L = ۰/۷F_y$
- برای $\frac{S_{xt}}{S_{xc}} < ۰/۷$ $\quad F_L = \frac{S_{xt}}{S_{xc}}F_y \ge ۰/۵F_y$

که در آن:

S_{xt} = اساس مقطع الاستیک نسبت به بال کششی

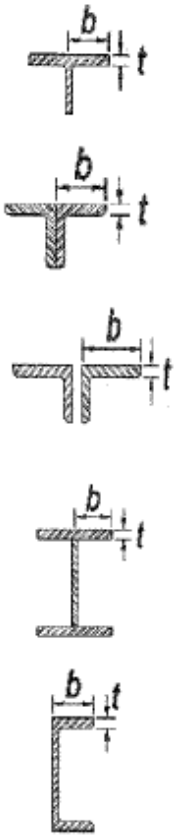
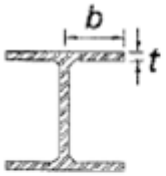
S_{xc} = اساس مقطع الاستیک نسبت به بال فشاری

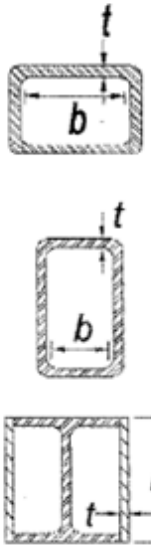
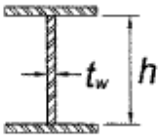
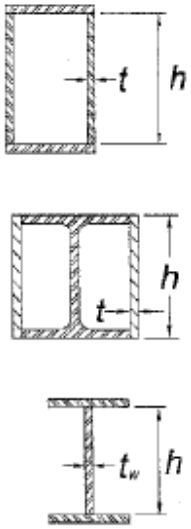
[d]

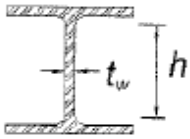
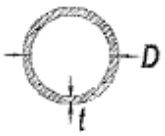
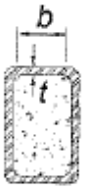
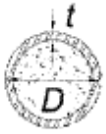
M_y = لنگر تسلیم دورترین تار

M_p = لنگر خمشی پلاستیک

جدول ۱۰-۳-۴-۱ محدودیت نسبت پهنا به ضخامت در اجزای فشاری اعضای با شکل‌پذیری متوسط و زیاد

	حالت	شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت		مثال‌های نمونه
				λ_{md} اعضای با شکل‌پذیری متوسط	λ_{hd} اعضای با شکل‌پذیری زیاد	
اجزای با یک لبه متکی	۱	بال‌های مقاطع I شکل نوردشده و ساخته‌شده از ورق، ناودانی‌ها، سپری‌ها، ساق نبشی‌های تک و نبشی‌های دوبل با فاصله و ساق برجسته نبشی‌های دوبل به هم چسبیده	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.3\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	۲	بال‌های مقاطع شمع‌های H شکل	b/t	کاربرد ندارد.	$0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	۳	تیغه (جان) مقاطع سپری	d_1/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.3\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [۱]	

اجزای با دو لبه متکی	۴	بال‌های متقاطع توخالی مستطیلی شکل (HSS) بال‌های مقاطع قوطی شکل ساخته‌شده از ورق ورق‌های کناری مقاطع I شکل قوطی‌شده وقتی به عنوان مهاربند به کار می‌رود.	b/t b/t h/t	$0.64\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [۳]	$0.55\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [۲]	
	۵	جان مقاطع I شکل نوردشده و ساخته‌شده از ورق وقتی به عنوان مهاربند به کار می‌روند.	h/t_w	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	۶	جان مقاطع I شکل نورد شده و ساخته شده از ورق وقتی به عنوان تیر یا ستون به کار می‌روند. ورق‌های کناری مقاطع I شکل قوطی شده وقتی به عنوان تیر یا ستون مورد استفاده قرار می‌گیرند. جان مقاطع I شکل قوطی شکل ساخته شده از ورق هرگاه به عنوان تیر یا ستون مورد استفاده قرار می‌گیرند.	h/t_w h/t h/t	برای $C_a \le 0.125$ $3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}}(1-2.75C_a)$ برای $C_a > 0.125$ $1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}(2.33-C_a) \ge 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ که در آن: $C_a=\frac{P_u}{\phi_c P_y}$	برای $C_a \le 0.125$ $2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}(1-0.93C_a)$ برای $C_a > 0.125$ $0.77\sqrt{\frac{E}{F_y}}(2.93-C_a) \ge 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ که در آن: $C_a=\frac{P_u}{\phi_c P_y}$	

	۷	جان مقاطع شمع‌های H شکل	h/t_w	کاربرد ندارد.	$0.94\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	۸	جان مقاطع لوله‌ای	D/t	$0.044\frac{E}{F_y}$ [۴]	$0.038\frac{E}{F_y}$	
	۹	بال‌ها و جان‌های مقاطع قوطی‌شکل پرشده با بتن	b/t	$2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	۱۰	جداره‌های مقاطع توخالی دایره‌ای شکل پرشده با بتن	D/t	$0.15\frac{E}{F_y}$	$0.076\frac{E}{F_y}$	

یادداشت:

[۱] *برای مقاطع سپری محدودیت نسبت پهنا به ضخامت برای اعضای با شکل‌پذیری زیاد می‌تواند تا* $0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ *افزایش یابد مشروط بر اینکه، کمانش عضو فشاری حول صفحهٔ جان‌سپری باشد و در اتصال انتهای عضو، انتقال بار محوری فقط از طریق وجه بیرونی بال سپری صورت گرفته باشد.*

[۲] *در مقاطع I شکل قوطی‌شده و مقاطع قوطی‌شکل ساخته‌شده از ورق اگر به عنوان ستون مورد استفاده قرار گیرند، محدودیت نسبت پهنا به ضخامت دراعضای با شکل‌پذیری زیاد می‌تواند به* $0.6\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ *محدود شود.*

[۳] *نسبت پهنا به ضخامت در بال‌های مقاطع توخالی مستطیلی شکل (HSS) و بال‌های مقاطع قوطی‌شکل ساخته شده از ورق در صورتی‌که به عنوان تیر یا ستون مورد استفاده قرار گیرند، می‌تواند به* $1.12\sqrt{E/F_y}$ *محدود شود.*

[۴] *در صورتی‌که مقاطع توخالی دایره‌ای شکل به عنوان تیر یا ستون مورد استفاده قرار گیرند، نسبت قطر به ضخامت در اعضای با شکل‌پذیری متوسط می‌تواند به* $0.07E/F_y$ *محدود شود.*

روابط طراحی ستون‌ها

$$P_u = \phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g \qquad \phi_c = 0.85$$

از ضوابط LRFD یک رابطه برای مقدار F_{cr} در حوزه کمانش ارتجاعی و رابطه دیگری در حوزه کمانش غیرارتجاعی وجود دارد

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi}\sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

در هر دو رابطه F_{cr}، اثرات تنشهای پس‌ماند و عیوب ساخت قطعه (کاملاً مستقیم نبودن آن) ملحوظ شده است. رابطه مربوط به کمانش غیرارتجاعی براساس نتایج آزمایشات حاصل شده و یک رابطه تجربی است.

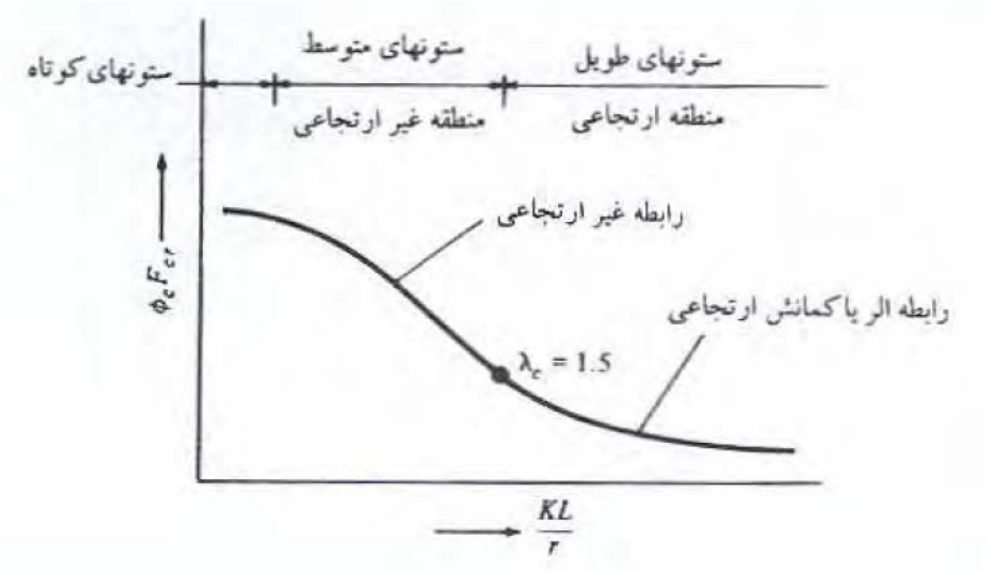
هرگاه $\lambda_c \le 1.5$ در ضوابط LRFD (رابطه E 2-2)

$$F_{cr} = \left(0.658^{\lambda_c^2}\right) F_y$$

رابطه دیگر رابطه آشنای کمانش اُلر است که به منظور ملحوظ کردن عیوب ساخت قطعه در ضریب ۰/۸۷۷ ضرب شده است.

هرگاه $\lambda_c > 1.50$ در ضوابط LRFD (رابطه E 2-3)

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y$$

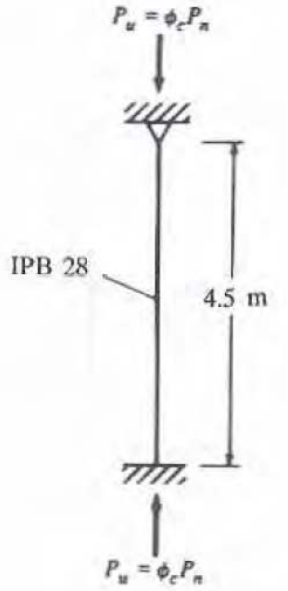


جدول ۴-۱ تنش طراحی $\phi_c F_{cr}$ برای فولاد نرمه با $F_y = ۲۳۳۳ \text{ kg/cm}^2$

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
0	1983	1983	1983	1982	1981	1981	1980	1978	1977	1975	0
10	1973	1971	1969	1967	1964	1961	1958	1955	1952	1948	10
20	1944	1940	1936	1932	1927	1923	1918	1913	1908	1902	20
30	1897	1891	1885	1879	1873	1866	1860	1853	1846	1839	30
40	1832	1825	1817	1810	1802	1794	1786	1778	1769	1761	40
50	1752	1744	1735	1726	1717	1707	1698	1689	1679	1669	50
60	1660	1650	1640	1630	1619	1609	1599	1588	1578	1567	60
70	1556	1545	1534	1524	1512	1501	1490	1479	1468	1456	70
80	1445	1433	1422	1410	1399	1387	1375	1364	1352	1340	80
90	1328	1317	1305	1293	1281	1269	1257	1245	1233	1221	90
100	1209	1197	1185	1173	1161	1149	1137	1126	1114	1102	100
110	1090	1078	1066	1054	1043	1031	1019	1007	996	984	110
120	973	961	950	938	927	915	904	893	882	871	120
130	860	848	838	827	816	805	794	784	773	762	130
140	751	740	730	720	710	700	690	681	672	663	140
150	654	645	637	629	620	612	605	597	589	582	150
160	575	568	561	554	547	540	534	528	521	515	160
170	509	503	497	492	486	480	475	470	464	459	170
180	454	449	444	439	435	430	425	421	416	412	180
190	408	403	399	395	391	387	383	379	375	372	190
200	368	364	361	357	354	350	347	343	340	337	200

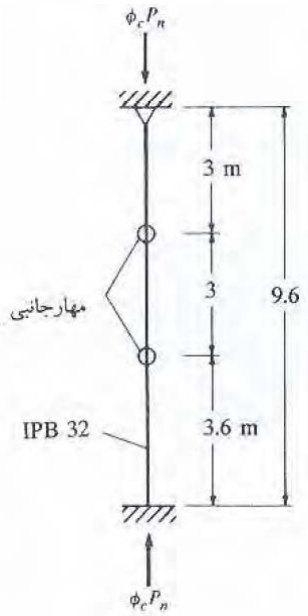
مثال ۴-۲

با مراجعه به شکل زیر مطلوبست تعیین استحکام طراحی $(P_u = \phi_c P_n)$ ستون یک سر مفصل و یک سرگیردار زیر نوع فولاد ستون نرمه $(F_y = 2333 \text{ bar})$ و بار وارده محوری است.



مثال ۴-۳

مطلوبست تعیین استحکام طراحی $\phi_c P_n$ ستون شکل زیر، این ستون از IPB 32 بوده و در جهت ضعیف خود به دلیل ارتفاع بالای ستون در دو مقطع مطابق شکل مهار جانبی دارد. امکان دوران نیمرخ در محل مهار ممکن بوده ولی امکان جابجایی افقی نیمرخ در مقاطع مهار شده وجود ندارد.



در این فصل به طراحی ستونهای مختلف تحت اثر نیروی محوری پرداخته می‌شود. این ستونها گاهی از یک نیمرخ، نیمرخ I شکل با تسمه‌های تقویت و گاهی از نیمرخ مرکبی از دو ناودانی تشکیل شده است و یا از نیمرخهای مرکبی که در صفحات موازی با محورهای x و y خود دارای قیدهای اتصال با اشکال مختلف هستند. در این فصل از کمانش خمشی پیچشی نیمرخها نیز صحبت شده است.

طراحی ستونها یک عمل سعی و خطاست. مقدار تنش طراحی $\phi_c F_{cr}$ تا نوع ستون معین نشده باشد معلوم نمی‌شود و برعکس. پس از انتخاب یک نیمرخ مقدار r آن معین شده و از طریق آن می‌توان تنش طراحی ستون را معین کرد.

روش دیگر چنین است که طراح تنش طراحی را انتخاب می‌کند و از تقسیم آن بر بار ضریب‌دار ستون سطح مقطع اولیه ستون معین و مقطع ستون انتخاب می‌شود، و سپس تنش طراحی محاسبه می‌گردد و از محاسبه استحکام طراحی قطعه صحت انتخاب نیمرخ معین می‌گردد و در صورتی که نیاز به تعویض مقطع باشد نیمرخ دیگری انتخاب می‌شود. ممکن است تصور شود که انتخاب مناسب تنش طراحی اولیه نیاز به‌معلومات و تجربه کافی در مورد قطعات فشاری داشته باشد. در صورتی که اگر مطالب گفته شده به شکل دقیقی بازنگری شود و به آنچه در بندهای بعد ذکر می‌شود توجه گردد چنین عملی مشکل نخواهد بود.

ضریب لاغری مؤثر (KL/r) ستونهای متداول با طولهای 3 m تا 4.5 m معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰ است؛ اگر برای (KL/r) مقداری در محدودهٔ فوق انتخاب شود می‌توان مقدار قابل قبولی برای تخمین اولیه تنش طراحی بدست آورد.

برای حدس اولیه اگر طول ستون بلندتر از 3 m تا 4.5 m باشد می‌توان از ضریب لاغری کمی بزرگتر از ۴۰ تا ۶۰ انتخاب کرد. اگر بار ضریب‌دار ستون بالا باشد قدر مسلم باید برای ستون مقطعی بزرگ با شعاع ژیراسیون بزرگ انتخاب کرد و لذا KL/r کوچک خواهد شد، برای قطعات مهار شده و تحت بار کم در سعی و خطای اولیه می‌توان از لاغری بالا شاید بیشتر از ۱۰۰ استفاده کرد.

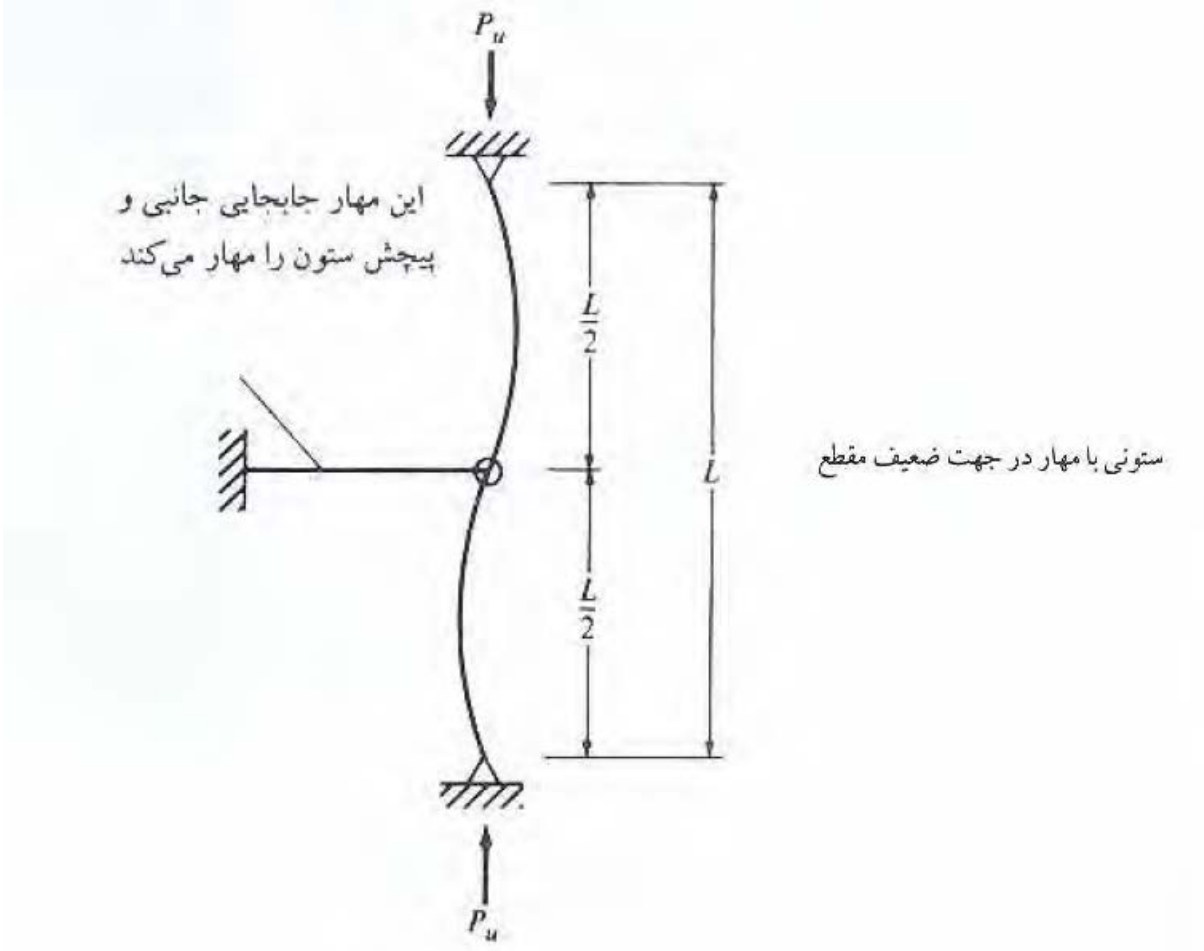
مثال ۴-۴

برای بار سرویس $P_D = 45$ ton و $P_L = 70$ ton و $KL = 3$ m یک نیمرخ مناسب از نوع IBP انتخاب کنید

مثال ۴-۵

سبکترین نیمرخ IPB را برای ستونی با شرایط زیر معین کنید

$P_u = 200$ ton $\quad K_x L_x = 6.0$ m $\quad K_y L_y = 3.0$ m



ستونی با مهار در جهت ضعیف مقطع

ضوابط اتصال ستون‌های مرکب با اتصال مستقیم

ضوابط متعددی برای ستونهای مرکب در بخش E 4 ضوابط LRFD آورده شده است. هرگاه چنین ستونهایی در تماس با یکدیگر باشند و بر کف ستون و یا سطوح صاف قرار گیرند باید آنها را در انتهای خود توسط پیچ یا جوش بهم متصل کنند. اگر از جوش استفاده شود، طول جوش باید حداقل برابر با عرض حداکثر قطعه باشد و اگر از پیچ استفاده شود فواصل مرکز به مرکز پیچها در جهت طول قطعه نباید از چهار برابر قطر پیچ بیشتر بوده و طول اتصال نباید از $1\frac{1}{2}$ برابر بزرگترین عرض قطعه کوچکتر باشد.

اتصالات پیچی، پرچی و جوشی باید برای انتقال تنشهای محاسباتی کافی باشند و در صورت لزوم باید فواصل عوامل اتصال را نزدیکتر از آنچه گفته شد به منظور تأمین استحکام لازم کاهش داد.

هرگاه ستون مرکب دارای تسمه باشد حداکثر فواصل عوامل اتصال توسط ضوابط LRFD معین شده است در این حالت فواصل انقطاع جوشها و یا فواصل پیچها و پرچها در امتداد طولی نباید بیشتر از $\frac{1055}{\sqrt{F_y}}$ (F_y برحسب kg/cm^2) برابر نازکترین ورق و کمتر از 30 cm باشد و اگر در طول اتصال، پیچها، پرچها و یا جوشها روبروی هم نباشند فواصل آزاد فوق‌الذکر نباید بیشتر از $\frac{1575}{\sqrt{F_y}}$ برابر نازکترین ورق و کمتر از 45cm گرفته شود.

در مباحث بعدی حرف a فاصله آزاد عوامل اتصال و r_i شعاع ژایرسیون حداقل نیمرخهای تشکیل دهندهٔ ستون است. برطبق نتایج آزمایشات اگر نسبت a/r_i کوچکتر یا برابر با ۵۰ باشد عملکرد کلیه عناصر قطعه به صورت قطعه‌ای واحد ممکن خواهد بود و در صورتی که این مقدار بزرگتر از ۵۰ باشد برطبق ضوابط LRFD برای تعیین تنش طراحی ستون بجای لاغری $(KL/r)_0$ که قطعه را با عملکرد واحدی معین می‌کند باید از لاغری $(KL/r)_m$ تصحیح شده به صورت زیر استفاده شود.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{q}{r_i} - 50\right)^2}$$ (رابطه $E4$-2 ضوابط LRFD)

رابطهٔ فوق تنها باید به جهتی اعمال شود که در کمانش حول آن محور عوامل اتصال تحمل برش کنند.

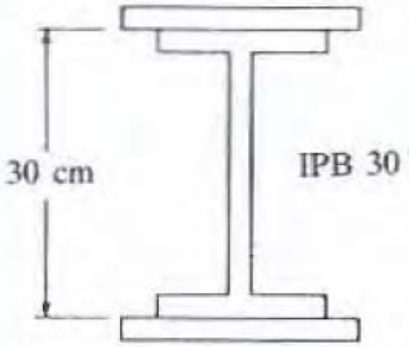
باید یادآور شد که اگر فواصل عوامل اتصال بنوعی باشد که عنصری از ستون قبل از کمانش کلی ستون به کمانش افتد استحکام طراحی ستون تقلیل خواهد یافت. از چنین اتفاقی زمانی می‌توان جلوگیری کرد که نسبت a/r_i کمتر یا برابر با نسبت تعیین کننده که در عمل کوچکترین مقدار از دو لاغری $(KL/r)_x$ و $(KL/r)_y$ خواهد بود نگهداشته شود.

در حالتی که عناصر ستون مرکب توسط پیچهای با اتصال برشی به یکدیگر متصل شده باشند (رابطه $E4$-2 برای حالاتی است که عناصر ستون توسط پیچهایی با اتصال اصطکاکی و یا جوش بهم متصل شده باشند) برطبق ضوابط LRFD باید از رابطه زیر برای لاغری تصحیح شده ستون استفاده کرد.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{q}{r_i}\right)^2}$$ (رابطه E4-1 ضوابط LRFD)

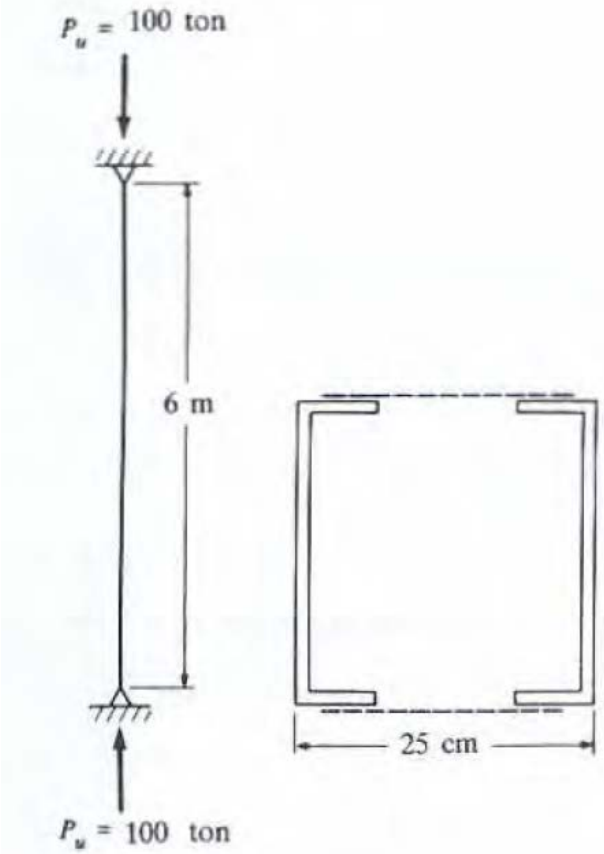
مثال ۴-۶

مطلوبست طرح ستونی برای بار $P_u = 400$ ton هرگاه $KL = 4.2$ m و الزام به استفاده از IPB 30 داشته باشیم. برای طرح ستون از دو تسمه مطابق شکل زیر بمنظور تقویت نیمرخ استفاده نمایند، اتصال تسمه سرتاسری را به نیمرخ بنوعی فرض کنید که بتوان $a/r_i \le 50$ دانست



مثال ۴-۷

برای ستون شکل زیر از دو ناودانی استفاده می‌شود، فاصله پشت به پشت ناودانی‌ها 25 cm می‌باشد.



کمانش خمشی–پیچشی قطعات فشاری

قطعات تحت فشار محوری به صورت نظری به یکی از سه نوع زیر کمانه می‌نمایند: کمانش خمشی، کمانش پیچشی و یا کمانش خمشی پیچشی.

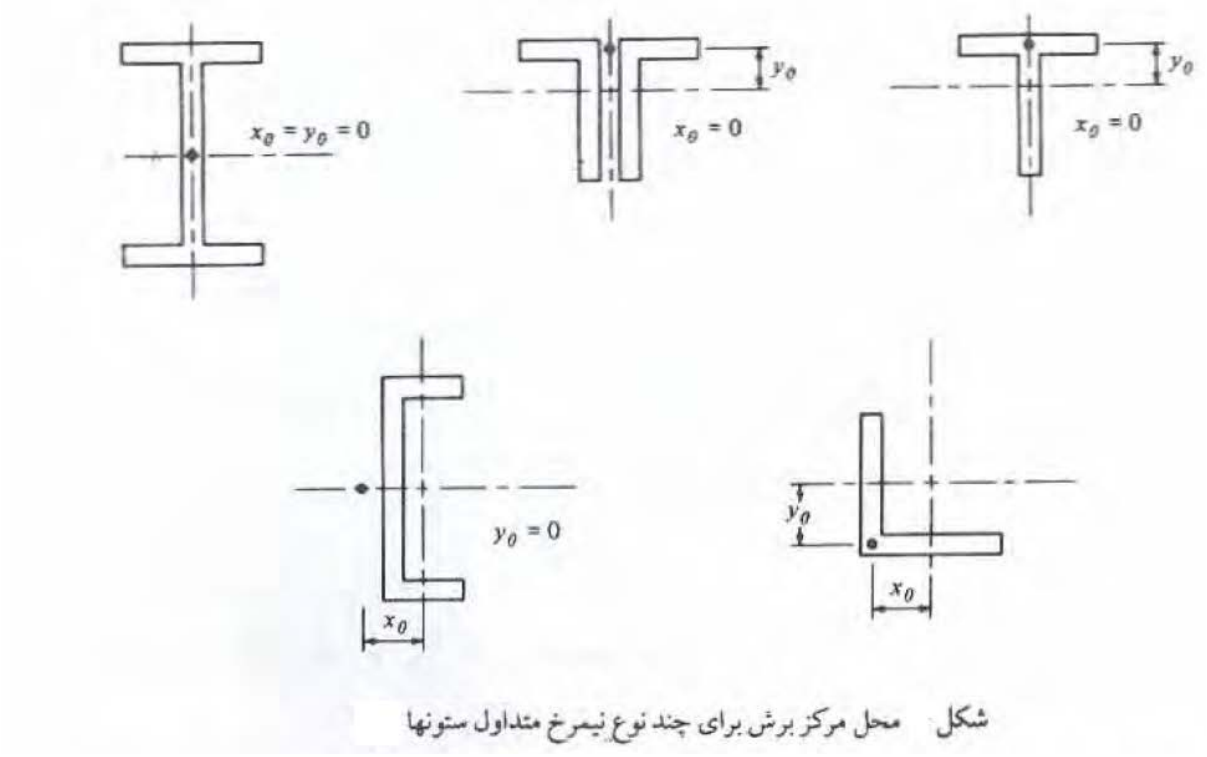
از کمانش خمشی که کمانش اُلر نیز نامیده می‌شود تا کنون بحث گردیده است، در این حالت مقدار حداکثر لاغری ستون برای کمانش حول محور اصلی معین شده و براساس آن $\phi_c F_{cr}$ محاسبه می‌شود. ستونهایی که دارای دو محور تقارن می‌باشند (نظیر نیمرخهای I شکل) تنها تحت کمانش خمشی و کمانش پیچشی قرار دارند.

چون کمانش پیچشی می‌تواند بسیار پیچیده باشد بهتر است از وقوع آن جلوگیری شود. اگر در آرایش اجزاء مقطع دقت شود و از مهارهای لازم به منظور جلوگیری از جابجایی جانبی و پیچشی مقطع استفاده گردد و از تکیه گاههای لازم در دو انتها و در وسط مقطع استفاده شود قدر مسلم کمانش خمشی تعیین کننده خواهد بود.

نیمرخهای باز نظیر نیمرخهای I شکل و ناودانی دارای استحکام پیچشی اندکی هستند و برعکس آنها نیمرخهای قوطی شکل استحکام پیچشی بسیار بالایی دارند و لذا اگر احتمال کمانش پیچشی وجود داشته باشد توصیه می‌شود از نیمرخهای قوطی استفاده گردد و یا اینکه به کمک ورقهایی نیمرخهای باز به‌نیمرخی بسته تبدیل شود (نظیر ⌶)، روش دیگری که از پیچش نیمرخ جلوگیری می‌کند کوتاه کردن طول قطعاتی است که در معرض پیچش قرار دارند.

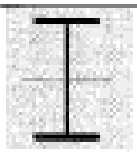
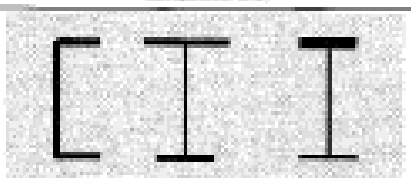
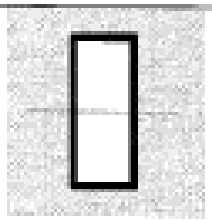
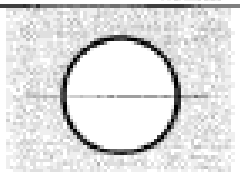
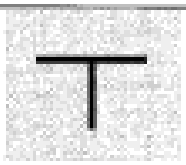
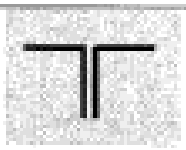
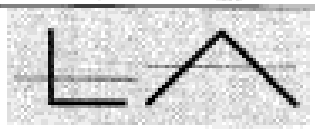
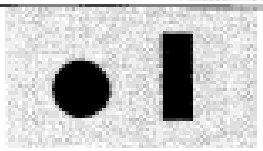
در قطعات فشاری با یک محور تقارن نظیر سپریها و مقاطع مرکب از دو نبشی، امکان کمانش اُلر حول محورهای x و یا y وجود دارد و اگر قطعه از یک نبشی با دو ساق مساوی باشد کمانش حول محور اصلی عمود بر محور تقارن نیز ممکن است. در هر صورت برای چنین قطعاتی کمانش خمشی - پیچشی از امکانات مسلم کمانش می‌باشد (در مورد تک نبشی با دو ساق نامساوی کمانش خمشی - پیچشی کنترل کننده است).

معمولاً برای ستونهای ساختمانها از نیمرخهای I شکل استفاده می‌شود، در این حالت اگر امتداد بار جانبی ستون از مرکز برش shear center نیمرخ عبور کند امکان وقوع پیچش وجود نخواهد داشت. مرکز برش نقطه‌ای از مقطع است که هرگاه برآیند بارهای جانبی از آن نقطه عبور کند امکان پیچش نیمرخ وجود ندارد. مرکز برش نیمرخهای با دو محور تقارن بر مرکز ثقل قطعه منطبق است که البته چنین وضعی برای قطعات با یک محور تقارن نظیر ناودانی و نبشی وجود ندارد. محل مرکز برش برای چند نیمرخ در شکل نشان داده شده است. در این شکل محل مرکز برش نسبت به مرکز ثقل با x_0 و y_0 معین شده است. از این مقادیر در روابط مربوط به خمش پیچشی در قسمتهای بعدی این بخش استفاده خواهد شد.



شکل محل مرکز برش برای چند نوع نیمرخ متداول ستونها

جدول ۱۰-۲-۴-۱ حالت یا حالت‌های حدی حاکم بر طراحی اعضای فشاری برای مقاطع مختلف بدون اجزای لاغر

حالت	نوع مقطع	شکل مقطع	حالت یا حالت‌های حدی حاکم بر طراحی
۱	• مقطع I شکل با دو محور تقارن		• کمانش خمشی • کمانش پیچشی
۲	• مقطع I شکل با یک محور تقارن • مقاطع ناودانی		• کمانش خمشی • کمانش خمشی-پیچشی
۳	• مقاطع صلیبی • مقاطع مرکب		• کمانش خمشی • کمانش پیچشی
۴	• مقاطع توخالی مستطیلی شکل		• کمانش خمشی
۵	• مقاطع توخالی دایره‌ای شکل		• کمانش خمشی
۶	• مقاطع سپری		• کمانش خمشی • کمانش خمشی- پیچشی
۷	• مقاطع مرکب از دو نیمرخ نبشی پشت به پشت		• کمانش خمشی • کمانش خمشی- پیچشی
۸	• مقاطع نبشی تک		• الزامات بند ۱۰-۲-۴-۶
۹	• مقاطع توپر		• کمانش خمشی
۱۰	• مقاطع بدون محور تقارن غیر از نبشی‌های تک		• کمانش خمشی- پیچشی

همانطورکه در جدول ۱۰-۲-۴-۱ نیز عنوان شده است، الزامات این بند برای تعیین مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری با مقاطع دارای یک محور تقارن و نامتقارن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در اعضای فشاری با مقاطع دارای دو محور تقارن که در آنها طول آزاد مهار نشده در برابر پیچش از طول آزاد مهارنشده در برابر خمش تجاوز نماید، نیز باید الزامات این بند مورد کنترل قرار گیرد.

مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری با مقاطع بدون اجزای لاغر بر اساس کمانش پیچشی و کمانش خمشی- پیچشی باید با استفاده از روابط زیر تعیین شود.

$$P_n = F_{cr} A_g \qquad (۴-۴-۲-۱۰)$$

که در آن تنش بحرانی، F_{cr}، به شرح زیر تعیین می‌شود.

الف) برای اعضای فشاری با مقطع سپری و نبشی جفت بر اساس حالت حدی کمانش خمشی- پیچشی

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry}F_{crz}H}{(F_{cry}+F_{crz})^2}}\right] \qquad (۵-۴-۲-۱۰)$$

در رابطه فوق، F_{cry}، طبق الزامات بند ۱۰-۲-۴-۴ برای کمانش خمشی حول محور تقارن y با استفاده از روابط E2-2 یا E2-3 صفحه ۳۰ جزوه با ضریب لاغری $\frac{KL}{r} = (\frac{KL}{r})_y$ ، برای مقاطع سپری با ضریب لاغری $\frac{KL}{r} = (\frac{KL}{r})_m$ و برای مقاطع جفت نبشی (مطابق الزامات مقاطع ساخته شده) محاسبه گردیده و F_{crz} از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A_g \bar{r}_o^2} \qquad (۶-۴-۲-۱۰)$$

ب) برای سایر مقاطع، F_{cr} باید بر اساس روابط E2-2 یا E2-3 صفحه ۳۰ جزوه و تنش کمانش الاستیک (F_e) بر اساس حالت‌های حدی کمانش پیچشی یا کمانش خمشی- پیچشی به شرح زیر تعیین شود.

ب-۱) برای مقاطع دارای دو محور تقارن و بر اساس حالت حدی کمانش پیچشی.

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ\right]\left(\frac{1}{I_x + I_y}\right) \qquad (۷-۴-۲-۱۰)$$

ب-۲) برای مقاطع با یک محور تقارن که محور تقارن آنها y نامگذاری شده است، بر اساس حالت حدی کمانش خمشی- پیچشی

$$F_e = \left(\frac{F_{ey}+F_{ez}}{2H}\right)\left[1-\sqrt{1-\frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey}+F_{ez})^2}}\right] \qquad (۸-۴-۲-۱۰)$$

ب-۳) برای مقاطع نامتقارن، بر اساس حالت حدی کمانشی خمشی–پیچشی F_e عبارت است از کوچکترین ریشه معادله درجه سوم زیر:

$$(F_e-F_{ex})(F_e-F_{ey})(F_e-F_{ez})-F_e^2(F_e-F_{ey})\left(\frac{x_O}{\bar{r}_o}\right)^2-F_e^2(F_e-F_{ex})\left(\frac{y_O}{\bar{r}_o}\right)^2=0 \qquad (۹-۴-۲-۱۰)$$

در روابط فوق:

A_g = سطح مقطع کلی عضو

C_w = ثابت تابیدگی

I_x و I_y = ممان اینرسی حول محورهای اصلی

K_x و K_y = ضریب طول موثر برای کمانش خمشی حول محورهای اصلی x و y

K_z = ضریب طول موثر برای کمانش پیچشی

J = ثابت پیچشی

G = مدول الاستیسیته برشی $G=\frac{1}{2/6}E$ (با فرض $\nu=0/3$)

x_o و y_o = مختصات مرکز برش نسبت به مرکز سطح، ($x_o=0$ برای نبشی جفت و نیمرخ سپری با محور تقارن y)

r_x ، r_y = شعاع ژیراسیون حول محورهای اصلی x و y

$\bar{r}_o$= شعاع ژیراسیون قطبی نسبت به مرکز برش مطابق رابطهٔ زیر:

$$\bar{r}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x+I_y}{A_g} \qquad (۱۰-۴-۲-۱۰)$$

H = ضریبی است که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$H = 1-\frac{x_o^2+y_o^2}{\bar{r}_o^2} \qquad (۱۱-۴-۲-۱۰)$$

F_{ex}= تنش کمانشی خمشی الاستیک حول محور اصلی x که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{ex}=\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L}{r_x}\right)^2} \qquad (۱۲-۴-۲-۱۰)$$

F_{ey}= تنش کمانشی خمشی الاستیک حول محور اصلی y که از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$F_{ey}=\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L}{r_y}\right)^2} \qquad (۱۳-۴-۲-۱۰)$$

F_{ez}= تنش کمانشی پیچشی الاستیک طبق رابطهٔ زیر:

$$F_{ez}=\left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2}+GJ\right]\frac{1}{A_g \bar{r}_o^2} \qquad (۱۴-۴-۲-۱۰)$$

یادداشت: برای مقاطع I شکل با تقارن دو محوره، C_w را می‌توان مساوی $I_y h_o^2/4$ در نظر گرفت که در آن h_o فاصلهٔ مرکز به مرکز بال‌ها می‌باشد. برای مقاطع سپری و نبشی جفت در محاسبه F_{ez} می‌توان از جملات حاوی C_w صرفنظر نموده و x_o را مساوی صفر در نظر گرفت.

۱۰-۲-۴-۶ اعضای با مقطع نبشی تک

مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری نبشی تک، P_n، باید بر اساس الزامات کمانش خمشی و با اصلاحات لاغری ارائه شده در بندهای الف و ب تعیین شود. به علاوه، در صورتی‌که شرایط زیر برقرار باشد، می‌توان از برون محوری نیروی فشاری در طراحی صرفنظر نمود.

(۱) نیروی اعمال شده به نبشی از طریق یک ساق و در انتهای همان ساق اعمال گردد.

(۲) اتصال دو انتهای عضو به کمک جوش و یا حداقل دو پیچ انجام شود.

(۳) هیچ‌گونه بارگذاری عرضی میانی بر عضو اعمال نگردد.

الف) برای نبشی‌ها با ساق‌های مساوی یا نامساوی که از طریق ساق بلندتر متصل شده‌اند و به صورت اعضای تک و یا اعضای جان خرپاهای صفحه‌ای که با اعضای مجاور خود به یک سمت ورق اتصال یا یال، متصل شده‌اند، لاغری اصلاح شده با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

برای $\frac{L}{r_x} \leq ۸۰$:

$$\frac{KL}{r} = ۷۲ + ۰/۷۵ \frac{L}{r_x} \qquad (۱۵-۴-۲-۱۰)$$

برای $\frac{L}{r_x} > ۸۰$:

$$\frac{KL}{r} = ۳۲ + ۱/۲۵ \frac{L}{r_x} \leq ۲۰۰ \qquad (۱۶-۴-۲-۱۰)$$

تبصره: برای نبشی‌ها با ساق نامساوی با نسبت ساق کوچکتر از ۱/۷ که از طریق ساق کوچکتر متصل شده‌اند، $\frac{KL}{r}$ به دست آمده از روابط ۱۰-۲-۴-۱۵ و ۱۰-۲-۴-۱۶ باید با جمله $۴[(b_l/b_s)^۲-۱]$ افزایش یابد، لیکن $\frac{KL}{r}$ به دست آمده نباید کمتر از $۰/۹۵L/r_z$ در نظر گرفته شود.

ب) برای نبشی‌های با ساق‌های مساوی یا نامساوی که از طریق ساق‌های بلندتر متصل شده‌اند و عضوی از جان خرپای جعبه‌ای یا فضایی می‌باشند که با اعضای مجاورشان به یک طرف ورق اتصال یا بال‌ها متصل شده‌اند، لاغری اصلاح شده از روابط زیر به دست می‌آید.

برای $\frac{L}{r_x} \leq ۷۵$:

$$\frac{KL}{r} = ۶۰ + ۰/۸ \frac{L}{r_x} \qquad (۱۷-۴-۲-۱۰)$$

برای $\frac{L}{r_x} > ۷۵$:

$$\frac{KL}{r} = ۴۵ + \frac{L}{r_x} \leq ۲۰۰ \qquad (۱۸-۴-۲-۱۰)$$

تبصره: برای نبشی‌های با ساق‌های نامساوی با نسبت ساق کوچکتر از ۱/۷ که از طریق ساق کوچکتر متصل شده‌اند، $\frac{KL}{r}$ به دست آمده از روابط ۱۰-۲-۴-۱۷ و ۱۰-۲-۴-۱۸ باید جملهٔ $۶[(b_l/b_s)^2-۱]$ **اضافه شود.** لیکن $\frac{KL}{r}$ به دست آمده نباید کمتر از $۰/۸۲L/r_z$ در نظر گرفته شود.

در روابط فوق:

L = طول عضو بین محل تقاطع محور اعضا

b_l = پهنای ساق بزرگتر نبشی

b_s = پهنای ساق کوچکتر نبشی

r_x = شعاع ژیراسیون حول محور مرکزی موازی با ساق متصل شده

r_z = شعاع ژیراسیون حول محور اصلی ضعیف نبشی

تبصره: نبشی‌های تک با شرایط انتهایی متفاوت با حالت‌های مشخص شده در بندهای الف و ب، با نسبت ساق‌های بزرگتر از ۱/۷ یا با بارگذاری عرضی، باید برای ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی مطابق بخش ۱۰-۲-۷ مورد محاسبه و طراحی قرار گیرند.

۱۰-۲-۴-۷ اعضای ساخته شده

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. مقاومت فشاری اسمی و محدودیت‌های ابعادی اینگونه مقاطع مطابق با الزامات بندهای ۱۰-۲-۴-۷-۱ و ۱۰-۲-۴-۷-۲ می‌باشد.

۱۰-۲-۴-۷-۱ مقاومت فشاری اسمی

الف) در اعضای فشاری ساخته شده که در آنها اتصال قطعات متصل کنندهٔ میانی به اجزای مختلف مقطع به صورت پیچی و با عملکرد اتکائی می‌باشد، ضریب لاغری نسبت به محور عمود بر صفحهٔ بست (محور بدون مصالح مقطع ساخته شده) باید از رابطهٔ زیر تعیین شود.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \qquad (۱۰-۲-۴-۱۹)$$

ب) در اعضای فشاری ساخته‌شده که در آنها اتصال قطعات میانی متصل‌کننده به اجزای مختلف مقطع به صورت جوشی و یا پیچی با عملکرد اصطکاکی می‌باشد، ضریب لاغری نسبت به محور بدون مصالح مقطع ساخته شده (محور عمود بر صفحهٔ بست در اعضای فشاری ساخته شده با بست)، باید از رابطهٔ زیر تعیین شود.

$$\frac{a}{r_i} \le ۴۰ \quad \rightarrow \quad \left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_o \qquad (۲۰-۴-۲-۱۰)$$

$$\frac{a}{r_i} > ۴۰ \quad \rightarrow \quad \left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^{۲} + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^{۲}} \qquad (۲۱-۴-۲-۱۰)$$

در روابط فوق:

$\left(\frac{KL}{r}\right)_m$ = ضریب لاغری اصلاح شدهٔ عضو فشاری ساخته شده نسبت به محور بدون مصالح مقطع ساخته‌شده

$\left(\frac{KL}{r}\right)_o$ = ضریب لاغری مقطع ساخته شده نسبت به محور بدون مصالح مقطع ساخته‌شده

K_i = ۰/۵ برای مقطع نبشی پشت به پشت

= ۰/۷۵ برای مقطع ناودانی پشت به پشت

= ۰/۸۶ برای سایر مقاطع

a = فاصلهٔ بین متصل‌کننده‌ها

r_i = شعاع ژیراسیون حداقل هر یک از اجزا

۱۰-۲-۴-۷-۲ محدودیت‌های ابعادی

محدودیت‌های ابعادی اجزای اعضای فشاری ساخته‌شده به شرح زیر می‌باشند.

الف) هر یک از اجزای اعضای فشاری ساخته‌شده باید در فاصلهٔ a به یکدیگر متصل باشند، به نحوی‌که ضریب لاغری موثر هر یک از اجزا در فاصلهٔ a، Ka/r_i، از $\frac{۳}{۴}$ ضریب لاغری تعیین‌کننده کل عضو ساخته‌شده تجاوز نکند؛ که در آن r_i شعاع ژیراسیون حداقل هر جزء می‌باشد.

ب) اتصالات متصل‌کننده‌های میانی می‌توانند از نوع جوشی و یا پیچی با عملکرد اتکائی یا اصطکاکی باشند، لیکن اتصالات متصل‌کننده‌های انتهایی باید از نوع جوشی یا پیچی با عملکرد اصطکاکی باشند.

پ) در انتهای اعضای فشاری ساخته شده، در محل فشار مستقیم بر کف‌ستون‌ها و یا در محل سطوح صاف و تنظیم شده در درز وصله‌ها، تمامی اجزاء متصل به یکدیگر باید در فاصلهٔ ۱/۵

برابر بُعد حداکثر مقطع ساخته‌شده با پیچ‌هایی که فاصلهٔ محور به محور آنها از یکدیگر حداکثر ۴ برابر قطرشان باشد، به یکدیگر متصل شوند. اگر وسیلهٔ اتصال جوش باشد، تمامی اجزای متصل به یکدیگر باید در طولی بزرگتر یا مساوی بُعد حداکثر مقطع ساخته‌شده، با جوش پیوسته به یکدیگر متصل شوند.

ت) چنانچه عضو فشاری ساخته‌شده، از نیمرخ‌ها و ورق‌های سراسری تشکیل شده باشد در ناحیهٔ میانی، فواصل طولی محور به محور بین پیچ‌ها یا فاصلهٔ آزاد بین نوارهای جوش منقطع باید به نحوی اختیار شود که مقاومت لازم تأمین گردد. حداکثر فاصلهٔ طولی بین پیچ‌ها در ناحیهٔ میانی، برای حالتی‌که قطعات رنگ‌شده و در مقابل خوردگی حفاظت شده باشند نباید از ۲۴ برابر ضخامت نازکترین قطعهٔ متصل شونده و همچنین از ۳۰۰ میلی‌متر بیشتر شود. اگر اتصال دو ورق یا ورق و نیمرخ به وسیلهٔ جوش صورت گرفته باشد و اعضا در مقابل خوردگی حفاظت شده باشند، حداکثر فاصلهٔ خالص بین جوش‌های منقطع نباید از مقادیر زیر تجاوز کند.

(۱) $0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ برابر ضخامت ورق خارجی و حداکثر ۳۰۰ میلی‌متر برای حالتی‌که اتصالات در خطوط اتصال مجاور در حالت پس و پیش نباشند (روبروی هم باشند).

(۲) $1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ برابر ضخامت ورق خارجی و حداکثر ۴۵۰ میلی‌متر برای حالتی که اتصالات در خطوط اتصال مجاور به حالت پس و پیش قرار گیرند.

ث) چانچه عضو فشاری از نیمرخ‌ها و ورق‌های سوراخ‌دار تشکیل شده باشند، در صورتی‌که ضوابط زیر رعایت شده باشند، بخشی از پهنای این ورق‌ها (پهنای کلی ورق سوراخ‌دار منهای عرض سوراخ) به همراه سطح مقطع نیمرخ‌ها می‌تواند به عنوان سطح مقطع خالص جهت کمک به تأمین مقاومت موجود در نظر گرفته شود.

(۱) نسبت پهنای کلی ورق سوراخ به ضخامت آن از $1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ کمتر باشد.

(۲) نسبت طول سوراخ (در راستای تنش) به عرض سوراخ از ۲ تجاوز نکند.

(۳) فاصله خالص بین سوراخ‌ها در راستای تنش از فاصلهٔ عرضی متصل‌کننده‌ها کمتر نباشد.

(۴) شعاع پیرامون سوراخ‌ها در تمامی نقاط حداقل ۴۰ میلی‌متر باشد.

ج) چنانچه عضو فشاری از نیمرخ‌ها و بست‌های مورب تشکیل شده باشند، ضوابط زیر باید رعایت شوند:

(۱) بست‌های مورب در انتهای عضو فشاری، باید به ورق بست انتهایی ختم شوند. در قسمت‌های میانی عضو در صورتی‌که نظم بست‌های مورب به هم خورده باشد، باید ورق‌های اتصال به تیر تعبیه گردد. طول ورق‌های بست انتهایی (در امتداد طولی عضو) باید حداقل برابر فاصله مراکز هندسی نیمرخ‌های تشکیل‌دهندهٔ عضو فشاری باشد و طول ورق‌های اتصال به تیر باید فضای کافی برای برقراری اتصال را داشته باشد.

ضخامت ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر باید طوری اختیار شوند که مقاومت کافی در برابر نیروهای منتقل شده از طرف عضو فشاری به کف‌ستون و از طرف تیر و مهاربندی به ستون را دارا باشند. در هر حال ضخامت ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر نباید از 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 می‌باشد.

پهنای ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال باید حداقل برابر فاصلهٔ بین مراکز هندسی نیمرخ‌های تشکیل‌دهندهٔ عضو فشاری باشد. چنانچه اتصال این ورق‌ها به اجزای عضو فشاری از نوع پیچی باشد، فاصلهٔ عرضی (عمود بر محور طولی عضو فشاری) وسایل اتصال باید حداقل برابر فاصلهٔ بین مراکز هندسی نیمرخ‌های تشکیل‌دهنده عضو فشاری باشد.

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 تجاوز کند. در هر ورق انتهایی و ورق اتصال به تیر، باید حداقل ۳ عدد پیچ تعبیه شود. در هر حال، تعداد و قطر پیچ‌ها باید طوری اختیار شوند که مقاومت کافی در برابر نیروی منتقل‌شده از طرف عضو فشاری به کف ستون و از طرف تیر و مهاربندی به ستون را دارا باشند.

اگر وسیله اتصال ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال به تیر از نوع جوشی باشد، دور تا دور این ورق‌ها باید به عضو فشاری جوش شود. ضخامت جوش به عضو فشاری باید طوری اختیار شود که مقاومت کافی در برابر نیروی منتقل شده به عضو فشاری را دارا باشد.

(۲) بست‌های مورب را می‌توان از تسمه، نبشی، ناودانی یا مقطع مناسب دیگر انتخاب کرد. همانند اجزای کلیهٔ اعضای فشاری ساخته‌شده، بست‌های مورب را باید طوری قرار داد که ضریب

لاغری موثر هر یک از اجزا عضو فشاری در فاصلهٔ بین اتصال بست‌های مورب به عضو فشاری الزامات بند (الف) از محدودیت‌های ابعادی اعضای فشاری ساخته‌شده (مرکب) را تأمین نماید.

(۳) مشخصات هندسی بست‌های مورب شامل طول، مقطع و وسایل اتصال دو انتهای آنها به عضو فشاری، باید به گونه‌ای انتخاب شوند که منجر به تأمین مقاومت برشی عمود بر محور طولی عضو فشاری معادل ۲ درصد مقاومت فشاری موجود عضو فشاری و نیروی برشی ستون به موازات صفحه بست‌ها به علت نیروهای خارجی شوند.

(۴) طول کمانش برای محاسبهٔ ضریب لاغری بست‌های مورب، در بست‌های تکی برابر فاصله بین مرکز هندسی اتصالات (پیچ یا جوش) دو انتهای آنها به عضو فشاری و در بست‌های مورب ضربدری ۷۰ درصد این فاصله به حساب می‌آید.

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

(۶) 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.

(۷) اگر فاصله بین مرکز هندسی اتصالات دو انتهای بست بیش از ۴۰۰ میلی‌متر باشد، ارجح است که بست‌ها به صورت ضربدری در نظر گرفته شوند و یا از نیمرخ مناسب (مانند نبشی) طراحی گردند.

چ) چنانچه عضو فشاری ساخته شده از نیمرخ‌ها و بست‌های موازی تشکیل شده باشند، ضوابط زیر باید رعایت شوند.

(۱) همانند اجزای کلیهٔ اعضای فشاری، فاصلهٔ بست‌ها از یکدیگر باید به اندازه‌ای باشند که ضریب لاغری موثر هر یک از اجزای عضو فشاری ساخته‌شده در فاصله بین مرکز به مرکز دو بست متوالی الزامات بند (الف) از محدودیت‌های ابعادی اعضای فشاری ساخته‌شده را تأمین نماید.

(۲) استفاده از تسمه، نبشی یا هر مقطع مناسب دیگر به عنوان بست مجاز است، مشروط بر آنکه کلیهٔ محدودیت‌های عنوان شده در موردهای (۱ تا ۵) از بند (ج) همین قسمت در آنها رعایت شده باشد.

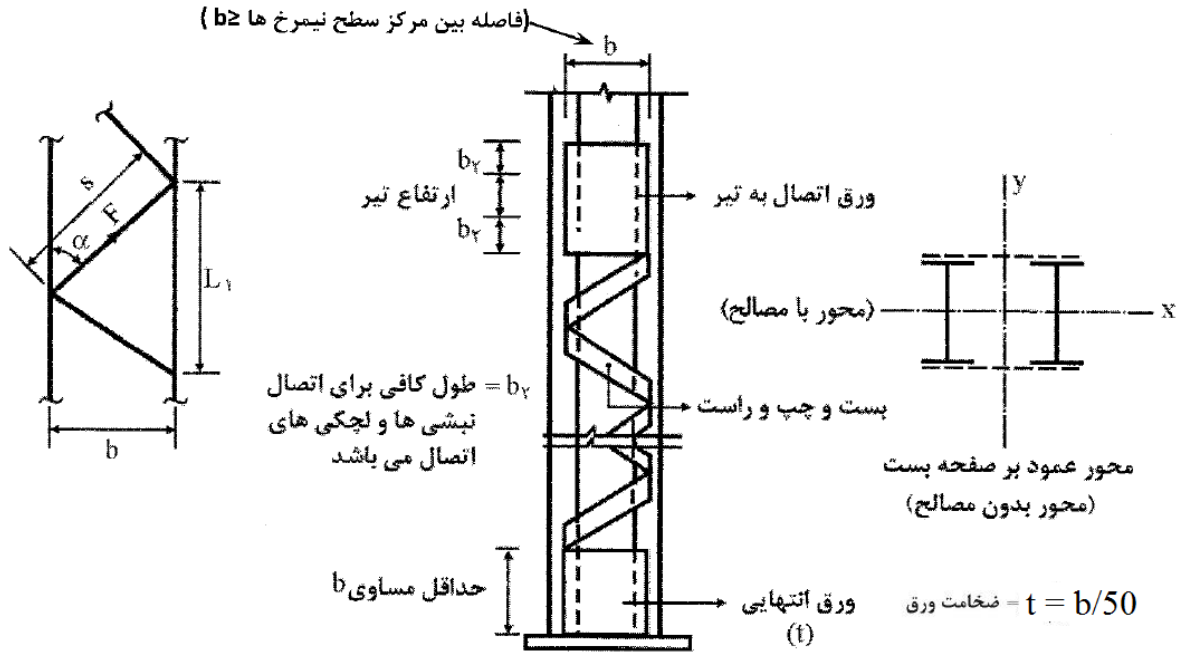
(۳) مشخصات هندسی بست‌های موازی شامل طول، مقطع و وسایل اتصال دو انتهای آنها به عضو فشاری، باید به گونه‌ای اختیار شود که منجر به تأمین مقاومت برشی عمود بر محور طولی

عضو فشاری و به موازات صفحهٔ بست‌ها معادل ۲ درصد مقاومت فشاری موجود عضو فشاری و نیروی برشی ستون به موازات صفحهٔ بست‌ها به علت نیروهای خارجی شوند.

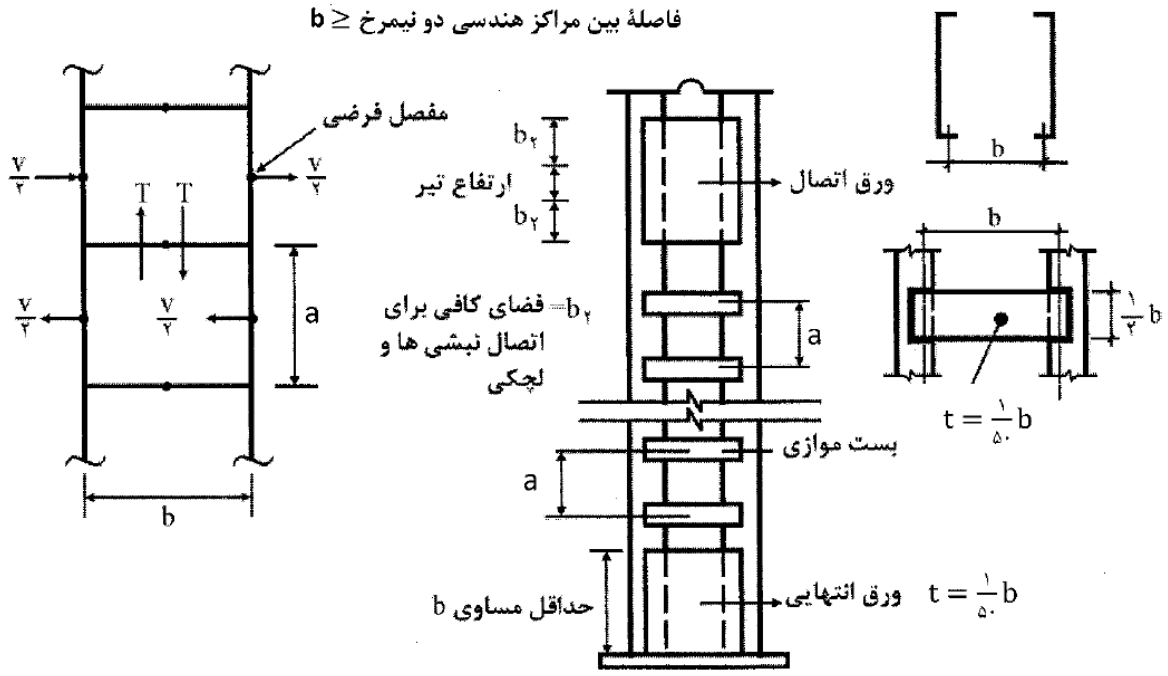
(۴) بست‌های موازی در انتهای عضو فشاری مورب و نیز در محل اتصال تیر به ستون باید محدودیت‌های عنوان‌شده در مورد (۱) از بند (ج) در خصوص ورق‌های انتهایی و ورق‌های اتصال را تأمین نماید.

(۵) طول بست‌های میانی نباید از $\frac{b}{2}$ کمتر باشد.

طراحی بست مورب



طراحی بست موازی

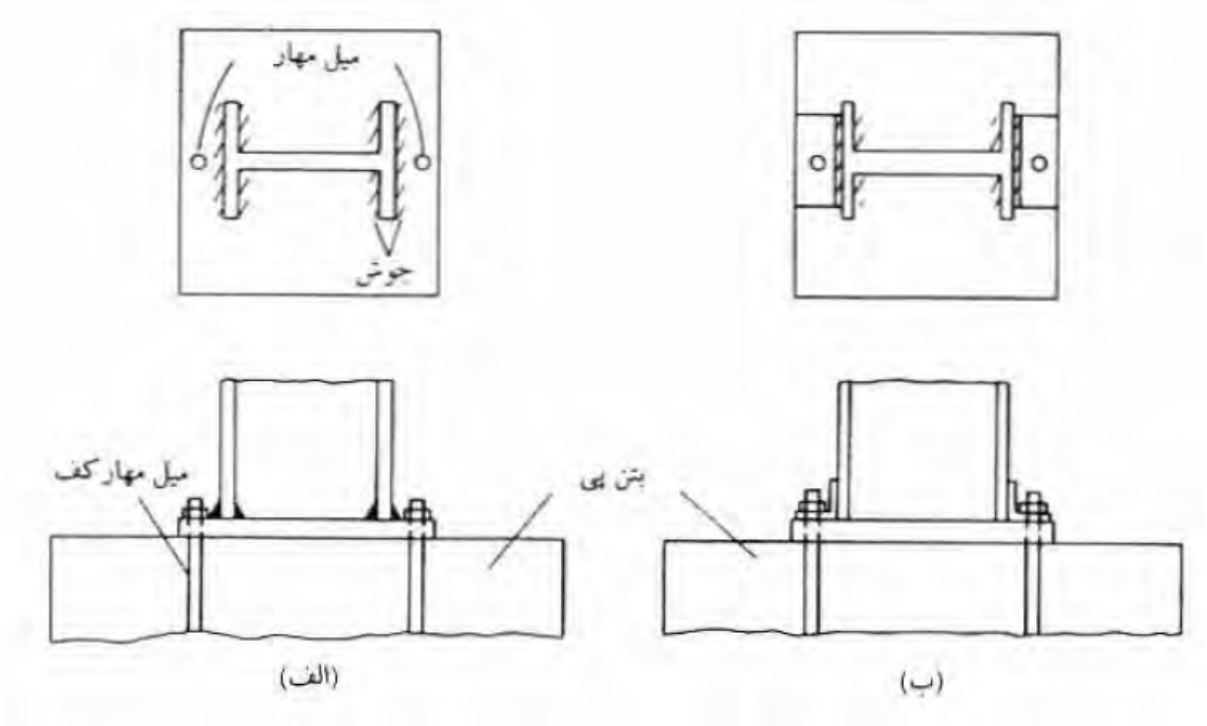


طراحی کف ستون‌ها برای بارهای محوری

تنش طراحی فشاری در پی‌های بتنی و یا سایر انواع پی‌ها بسیار کمتر از تنش طراحی در ستونهای فولادی است. هرگاه ستون فولادی روی پی بتنی قرار می‌گیرد باید بار ستون بنوعی توزیع گردد که تنش در پی از حدّ لازم تجاوز نکند. بارها از ستون به کمک صفحات فولادی که کف ستون نامیده می‌شوند در سطح نسبتاً وسیعی روی پی توزیع می‌شوند (باید توجه شود که پی نیز به شکلی مشابه بار را روی خاک بنوعی توزیع می‌کند که تنش در خاک زیر پی از حد لازم تجاوز نکند).

کف ستون را می‌توان مستقیماً به ستون جوش کرد و یا به کمک نبشی و یا صفحه تقویتی جوش شده و یا پیچ شده به پایین ستون متصل نمود.

در ستونهای کوچک معمولاً این نوع کف ستونها را در کارخانه به ستون جوش کرده و به کارگاه حمل می‌کنند ولی در ستونهای بزرگتر کف ستونها و ستونها جداگانه به محل منتقل شده و در تراز لازم اجرا می‌شوند و سپس به کمک میل مهارها anchor bolts که از نبشی‌های اتصال و کف ستون می‌گذرند، ستون به پی متصل می‌شود باید اضافه کرد که اجرای نبشی‌های اتصال در کارخانه انجام می‌گیرد چنین اجرایی در شکل زیر نشان داده شده است. برخی از طراحان ترجیح می‌دهند نبشی‌های اتصال (lug angles) را روی بالها و جان ستون توأماً به کار گیرند.

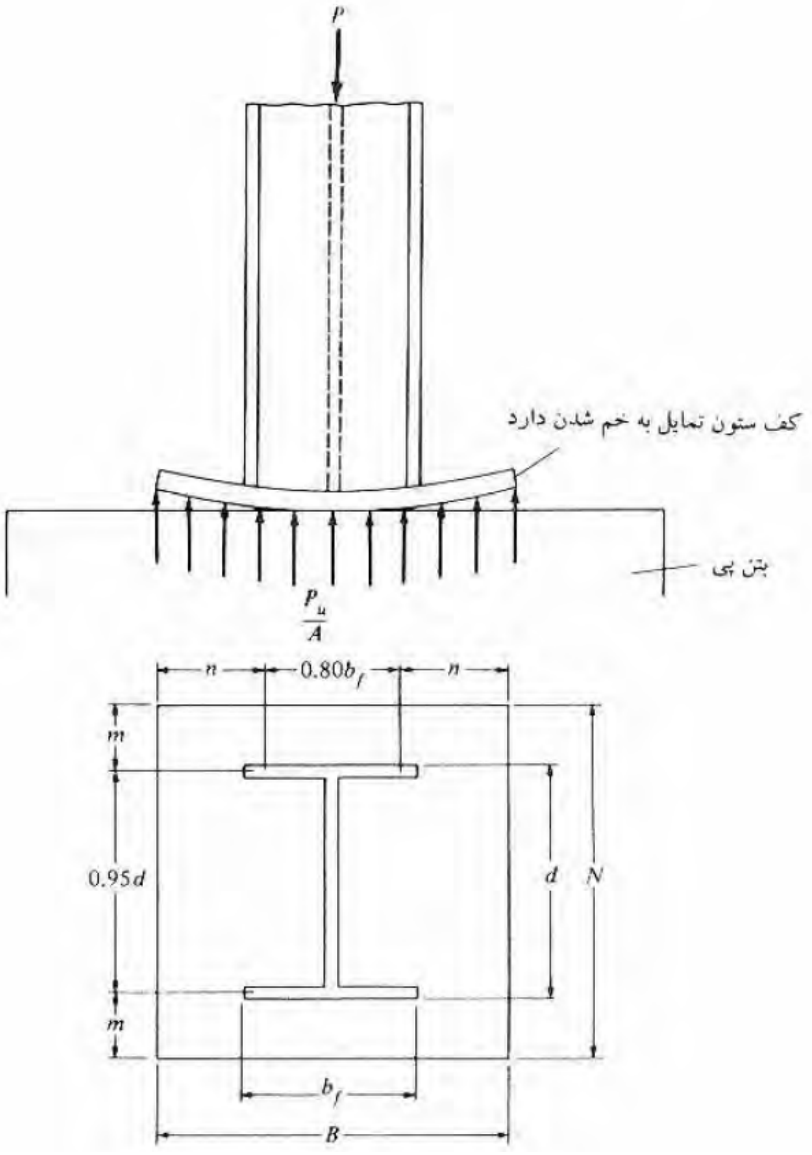


شکل: نمونه‌ای از اجرای کف ستون

در اینجا روش طراحی کف ستون برطبق کتاب راهنمای LRFD بیان می‌شود. برای طراحی کف ستون در شکل زیر فرض می‌شود که بار وارده کل به کف ستون P_u باشد که این بار از طریق کف ستون به پی فشاری برابر با P_u/A وارد می‌کند که در آن A سطح کف ستون است. عکس‌العمل پی روی کف ستون فشاری برابر با P_u/A خواهد بود که این فشار سبب خمیده شدن لبه‌های بیرونی کف ستون مطابق شکل خواهد شد، همچنین این فشار تمایل به بالا راندن سطح کف ستون واقع در بین بالهای ستون خواهد داشت.

کتاب راهنمای LRFD اعتقاد دارد که بیشترین تنش در کف ستون مطابق شکل زیر در فواصل تقریبی $0.8\ b_f$ و $0.95\ d$ اتفاق می‌افتد.

لنگر حداکثر در فواصل فوق معین شده و ضخامت صفحه برطبق آن معین می‌گردد روش فوق تنها به‌صورت تقریبی ضخامت صفحه را معین می‌کند، زیرا وضعیت واقعی تنش در صفحه ترکیبی از خمش در دو جهت خواهد بود.



سطح کف ستون:

اگر سطح کف ستون کل سطح فوقانی پی را نپوشاند بیرون زدگی بتن از کف ستون سبب بالا رفتن قدرت باربری بتن شده و استحکام اسمی بتن براساس رابطهٔ زیر که در آن A_2 سطح حداکثر تحمل کنندهٔ بار در بتن و به صورت هندسی برابر با سطح فوقانی پی خواهد بود معین می‌گردد.

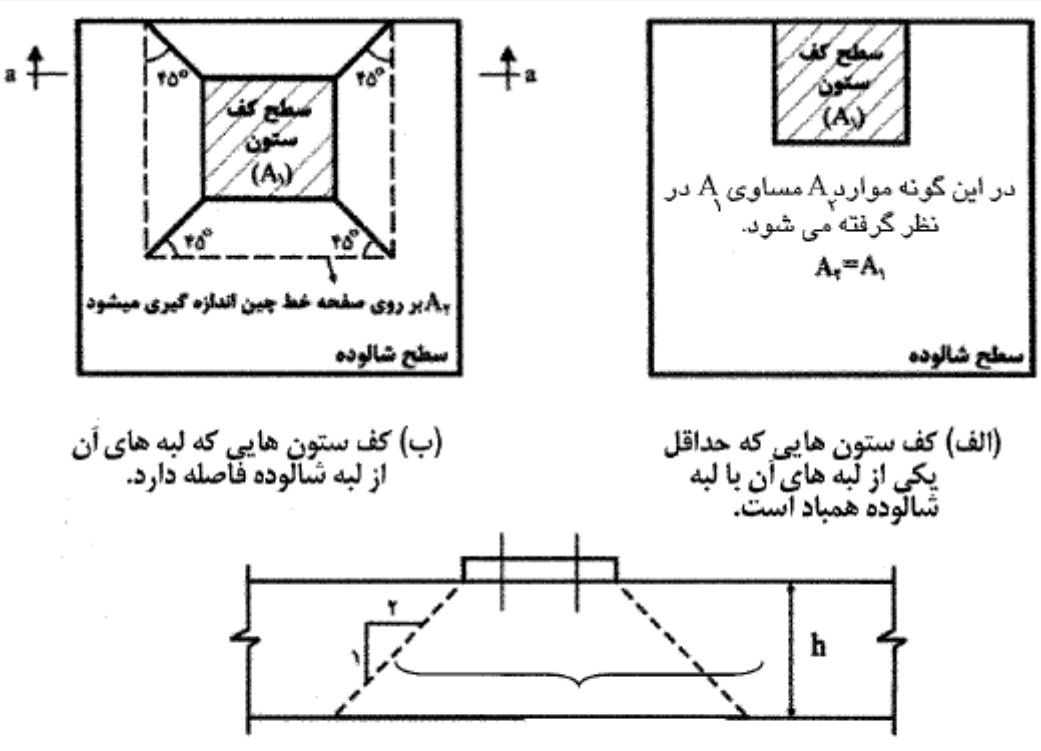
$$P_u = \phi_c (0.85 f'_c A_1) \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le \phi_c 1.7 f'_c A_1$$

که در آن:

f_c= مقاومت مشخصهٔ فشاری بتن بر روی نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد.

A_1= سطح ورق کف‌ستون در تماس با شالوده

A_2= حداکثر سطحی از شالوده هم‌مرکز و متشابه با ورق کف‌ستون که در پلان و عمق شالوده مطابق شکل محدود می‌شود.



شکل ۱۰-۲-۹-۱۵ سطح اتکا در تماس با شالوده بتنی

حداقل سطح کف ستون براساس حداکثر استحکام بتن خواهد شد:

$$A_1 = \frac{1}{A_2}\left[\frac{P_u}{0.6(0.85f_c')}\right]^2 \quad \text{یا} \quad A_1 = \frac{P_u}{0.6(1.70f_c')}$$

و

$$N \simeq \sqrt{A_1} + \Delta$$

$$\Delta = 0.5(0.95d - 0.8b_f), \qquad B = \frac{A_1}{N}$$

ضخامت کف ستون:

ضخامت ورق کف ستون با کنترل لبه‌های ورق که به صورت طره‌ای می‌توانند عمل کنند، و محاسبه لنگرهای خمشی ناشی از عکس‌العمل بستر تعیین می‌شود.

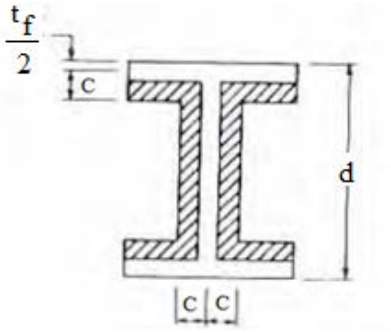
$$\frac{P_u}{A_1}(m)(\mathrm{B})\frac{m}{2} \quad \text{یا} \quad \frac{P_u}{A_1}(n)(N)\frac{n}{2}$$

ضخامت کف‌ستون بیشترین مقدار از سه رابطه زیر خواهد بود:

$$t_p = m\sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_y BN}} \qquad t_p = n\sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_y BN}} \qquad t_p = c\sqrt{\frac{2P_0}{0.9F_y A_H}}$$

که در آن C، P_0 و A_H به صورت زیر بدست می‌آید:

اگر ستون دارای بار کمی باشد، فرض می‌شود که بار در سطح هاشور خورده شکل زیر توزیع می‌شود. ضخامت کف ستون در این حالت با فرض اینکه سطح تحمل کنندهٔ بار سطح H شکل است و با لنگرگیری از کف ستون با فرض اینکه به بال و جان ستون گیردار شده است تعیین می‌گردد. طول‌طره با c معین می‌شود که در شکل زیر نشان داده شده است و مقدار آن از وسط ضخامت بال یا جان تعیین می‌شود.



کتاب راهنمای LRFD بار تحمل شده از بارکل P_u توسط سطح محاط شده توسط ستون $(b_f\, d)$ را P_0 نامیده و به صورت زیر تعیین می‌کند.

$$P_0 = \left(\frac{P_u}{BN}\right)(b_f\, d)$$

سطح H شکل با تقسیم P_0 بر فشار مجاز به صورت زیر معین می‌شود

$$A_H = \frac{P_0}{\phi_c \times 0.85\sqrt{A_2/b_f d}\, f_c'} \le \frac{P_0}{\phi_c (1.70 f_c')}$$

با استفاده از ابعاد سطح H شکل، مقدار c برحسب A_H به صورت زیر معین می‌شود:

$$c = \frac{1}{4}\left[d + b_f - t_f - \sqrt{(d + b_f - t_f)^2 - 4(A_H - t_f\, b_f)}\right]$$

مثال ۴-۸:

مطلوبست طراحی یک کف ستون برای ستونی از نیمرخ IPB 30 ، بار مرده این ستون 60ton و بار زندهٔ آن 80 ton است. استحکام فشاری ۲۸ روزهٔ بتن پی 210 kg/cm^2 است. ابعاد پی را برابر با 270 × 270 cm در نظر بگیرید ($A_2 = 2.70 \times 2.70 = 7.29$ m^2)

فصل پنجم: طراحی تیرها

مقدمه