تعریف انواع کمانش مهاربندها

نویسنده: بهنام حمزه‌تاش – سعید کاویان‌پور

مقدمه

یکی از تأثیرگذارترین حالات حدی که در طراحی اعضای تحت فشار نقش کلیدی ایفا می‌نماید، کمانش است. در این مقاله در ابتدا کمانش اعضا از لحاظ مفهومی بررسی شده و با علل وقوع این کمانش در اعضا، آشنا می‌شوید. در ادامه، انواع دسته‌بندی‌هایی که می‌توان برای کمانش اعضا در نظر گرفت مورد بررسی واقع شده و بندهای آیین‌نامه‌ای مربوط به هر یک موشکافی شده است.

سپس به طور خاص کمانش داخل‌صفحه و خارج‌صفحه به عنوان دو حالت کمانش مهاربندها معرفی‌شده‌اند و خصوصیات هر یک بررسی شده است.

با توجه به اینکه در سازه‌هایی که با مهاربندهای همگرا طراحی می‌شوند، مهاربندها مهم‌ترین المان در تأمین شکل‌پذیری مورد نیاز سازه می‌باشند، تأثیر انواع کمانش در شکل‌پذیری سازه بررسی شده و نکات طراحی و همچنین اجراییِ مهم که برای رسیدن به شکل‌پذیری مورد انتظارِ سازه باید رعایت شوند، معرفی شده است.

با مطالعه این مقاله چه می‌آموزید:

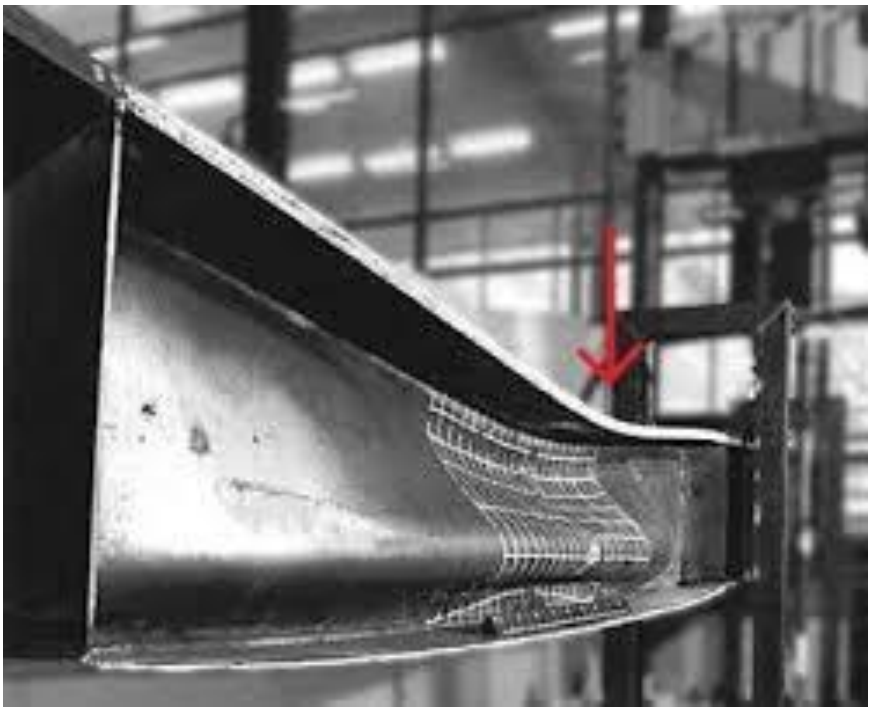
۱. تعریف کمانش و دسته‌بندی‌های مختلف آن
۲. پارامترهای تأثیرگذار در کمانش یک عضو
۳. مفهوم کمانش الاستیک و کمانش غیر الاستیک و ویژگی‌های هر یک
۴. درک مفهومی و آیین‌نامه‌ای کمانش کلی نحوه‌ی جلوگیری از وقوع آن
۵. درک مفهومی و آیین‌نامه‌ای کمانش موضعی و نحوه‌ی جلوگیری از وقوع آن
۶. تأثیر کمانش در شکل‌پذیری سازه‌ها
۷. کمانش داخل‌صفحه و خارج‌صفحه‌ی بادبندها و ویژگی‌های هر یک از آن‌ها
۸. اهمیت رعایتِ فاصله‌ی قطعِ مهاربند از خط آزاد تنش، بر روی ورق اتصال
۹. تعریف عرض ویتمور و کاربرد آن

کمانش چیست؟

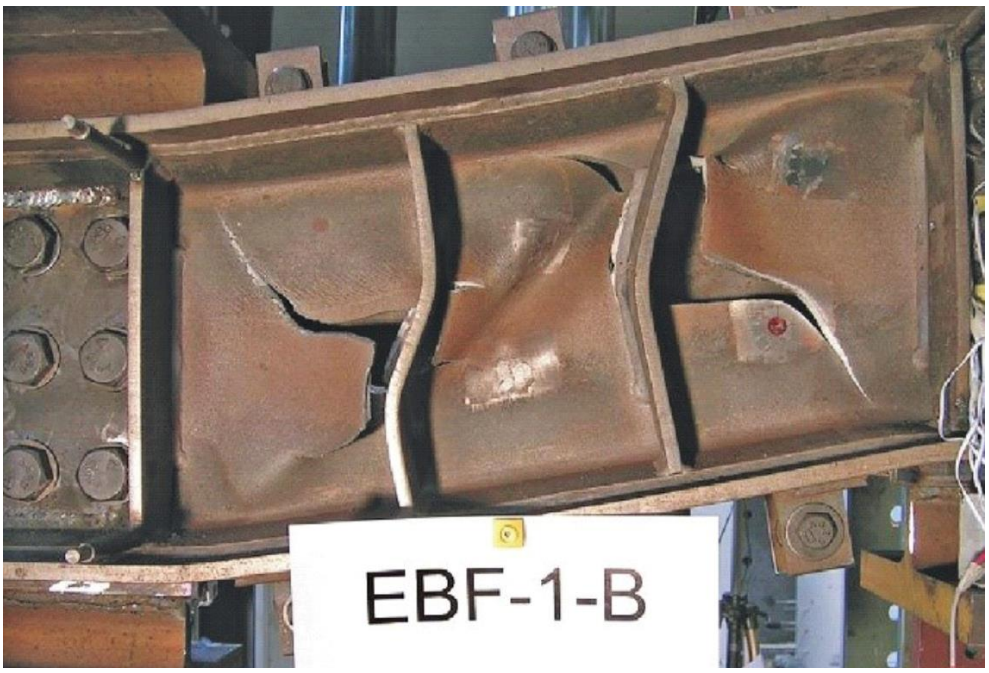
کمانش رفتاری است که اعضای تحت‌فشار ممکن است از خود نشان دهند که به صورت تغییرشکل جانبی ناگهانی در اعضای سازه‌ای رخ می‌دهد. این حالت ممکن است در اعضای فشاری، در تنشی کمتر از تنش تسلیم ماده رخ دهد (کمانش الاستیک). زمانی که المان تحت‌فشار کمانش می‌کند، در صورتی که این عضو به کلی منهدم نشود، همچنان امکان تحمل بار کمانش توسط این المان وجود دارد؛ در صورتی هم که این عضو جزئی از یک سازه باشد، با اعمال باری بیشتر از بار کمانش، این بار بین سایر اعضای سازه توزیع خواهد شد.

کمانش در اعضای مختلف سازه‌ای مانند ستون‌ها، تیرورق‌ها، تیرهای پیوند و مهاربندها، به اشکال گوناگون رخ می‌دهد که در ادامه چند نمونه از آن‌ها مشاهده می‌شوند. با توجه به موضوع این بحث، در ادامه تمرکز مطالب بیشتر بر روی کمانش مهاربند خواهد بود.

کمانش ستون‌ها تحت اثر نیروی زلزله



کمانش جان تیر

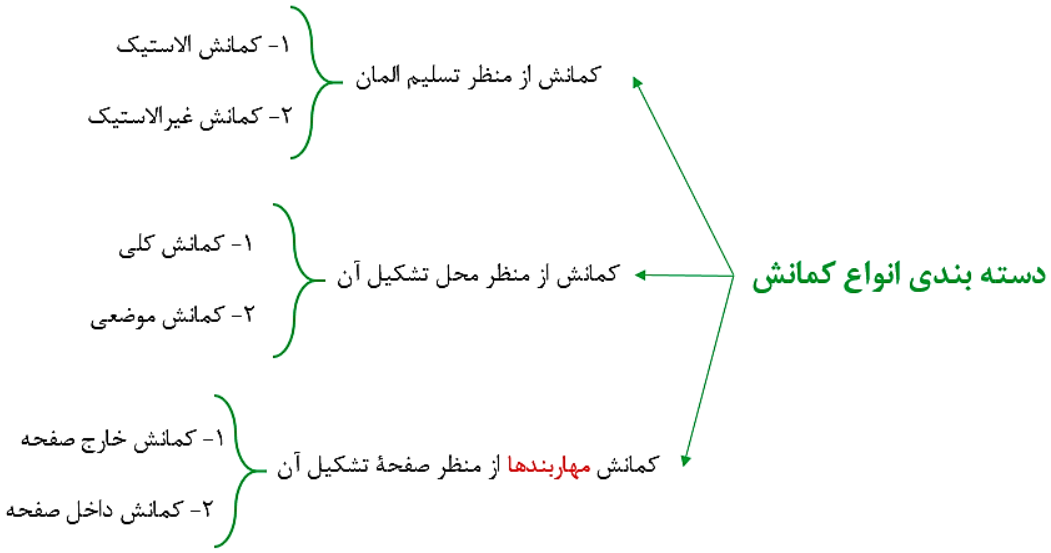


گسیختگی پس از کمانش [سخت‌کننده‌های تیر پیوند]

نمونه‌ای از کمانش داخل صفحه‌ی مهاربند

انواع کمانش را می‌توان با دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی نمود. از منظر تسلیم اعضای مهاربند، کمانش به الاستیک و غیر الاستیک دسته‌بندی می‌شود. همچنین با توجه محل وقوع کمانش در عضو، کمانش‌ها به دو دسته‌ی کمانش کلی و کمانش موضعی تقسیم می‌شوند.

دسته‌بندی سومی هم که می‌توان برای کمانش مهاربندها در نظر گرفت، از منظر صفحه‌ی وقوع کمانش می‌باشد که در این حالت کمانش مهاربند می‌تواند داخل صفحه و یا خارج صفحه رخ دهد. در شکل زیر دسته‌بندی‌های مختلف برای کمانش مشاهده می‌شوند.



در ادامه و در بخش‌های آتی، پس از بررسی کلی مفهوم کمانش و روابط مربوط به آن، به بررسی هر سه دسته‌بندی خواهیم پرداخت.

پارامترهای تأثیرگذار در بررسی کمانش

کمانش به پارامترهای مختلفی وابسته است که در ادامه هر یک از آن‌ها بررسی می‌شوند. یکی از این پارامترها، ضریب طول مؤثر (Effective Length Factor) است که معمولاً با K نشان داده می‌شود که وابسته به شرایط تکیه‌گاهی دو انتهای عضو می‌باشد.

این پارامتر به نوعی نشان‌دهنده‌ی طولی از عضو می‌باشد که احتمال کمانش در آن بیشتر است و با بزرگ‌تر شدن این عدد احتمال کمانش عضو هم افزایش می‌یابد. در جدول پ-۱-۱ از مبحث دهم مقررات ملی، ضرایب طول مؤثر برای ستون با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل مشاهده می‌شوند:

جدول پ-۱-۱ ضریب طول موثر (K) اعضای فشاری با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل

توضیحات	انواع مختلف اعضای فشاری با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل					
شکل کمانش‌یافته عضوفشاری به صورت خطچینی نمایش داده شده است.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
مقادیر نظری K	۰/۵	۰/۷	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰
مقادیر پیشنهادی K برای طراحی	۰/۶۵	۰/۸	۱/۲	۱/۰	۲/۱	۲/۰
نماد شرایط مرزی	▪ انتقال و دوران مقید ▪ انتقال مقید، دوران آزاد ▪ انتقال آزاد، دوران مقید ▪ انتقال و دوران آزاد					

ضرایب طول مؤثر برای ستون‌هایی با شرایط تکیه‌گاهی ایده آل

لازم به ذکر است اغلب اوقات، ساخت شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل (به عنوان مثال تکیه‌گاه کاملاً صلب) در عمل برای یک عضو امکان‌پذیر نیست، در نتیجه ضرایب طول مؤثر برای مقاصد طراحی، بعضاً بزرگ‌تر از مقدار تئوری پیشنهاد شده است.

در بندهای پ-۱-۲ و پ-۱-۳ توضیحات کامل در رابطه با محاسبه‌ی ضریب طول مؤثر برای اعضای فشاری به ترتیب در قاب‌های مهارشده و مهارنشده ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد، ضریب طول مؤثر جدول فوق برای شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل ارائه شده که این شرایط معمولاً در اتصالات سازه‌های واقعی وجود ندارند، از این رو احتیاج به محاسبه‌ی دقیق‌تر ضریب K، به کمک توضیحات بندهای مذکور، می‌باشد.

همچنین برای مقاطع ساخته شده مانند مقاطع دوبل که معمولاً در مهاربندها از آن‌ها استفاده می‌شود، در بخش ۱۰-۲-۴-۷-۱ ضرایب طول مؤثر ارائه شده که در شکل زیر مشاهده می‌شوند.

K_i = ۰/۵ برای مقطع نبشی پشت به پشت

= ۰/۷۵ برای مقطع ناودانی پشت به پشت

= ۰/۸۶ برای سایر مقاطع

در همین رابطه، پارامتر **طول مؤثر** (**Effective Length**)، به حاصل‌ضرب K در طول آزاد بین تکیه‌گاه‌ها (L) گفته می‌شود (KL). این طول در واقع نشان می‌دهد که **طول معادل این عضو** در صورتی که با شرایط تکیه‌گاهی دوسر مفصل ساخته شود، چه میزان خواهد بود.

پارامتر تأثیرگذار بعدی در کمانش، شعاع ژیراسیون نامیده می‌شود که از خصوصیات هندسی مقطع می‌باشد. شعاع ژیراسیون r_x فاصله‌ایست که اگر تمام سطح مقطع المان، در آن فاصله نسبت به محور x متمرکز شود، ممان اینرسی تغییری نمی‌کند (در واقع فاصله‌ای از محور x را نشان می‌دهد که اگر مساحت یک مقطع را به صورت متمرکز در یک نقطه جمع کنیم، همان ممان اینرسی اولیه مقطع اصلی را ایجاد می‌کند). به‌طورکلی در حالتی که شعاع ژیراسیون حول دو محور اصلی مقطع برابر نباشند، مقطع تمایل دارد حول محور ضعیف‌تر (محوری که شعاع ژیراسیون کمتری دارد) کمانش نماید. شعاع ژیراسیون حول محور x از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

با دقت در این فرمول متوجه می‌شویم که هر چه ممان اینرسی یک مقطع بیشتر و سطح مقطع کوچک‌تر باشد، شعاع ژیراسیون آن هم بزرگ‌تر می‌شود. در نتیجه شعاع ژیراسیون بالاتر نشان‌دهنده‌ی توان تحمل بیشتر بارهای کمانش است. همین موضوع یکی از دلایل تمایل طراحان به استفاده از مقاطع دوبل برای مهاربندهاست.

پس از تعریف شعاع ژیراسیون، حال به تعریف پارامتر مهمی به نام **ضریب لاغری** می‌رسیم. به نسبت طول مؤثر عضو به شعاع ژیراسیون مقطع عضو ضریب لاغری گفته می‌شود (KL/r). این پارامتر در تعیین مُدهای خرابی یک مقطع بسیار تأثیرگذار است. با توجه به تعریف ضریب لاغری، مقاطع به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند که به کمک آن رفتار مقاطع تحت بار محوری را می‌توان بررسی نمود. این سه دسته عبارت‌اند از:

۱- مقاطع کوتاه (چاق): مقاطع کوتاه مقاطعی هستند که ضریب لاغری آن‌ها کوچک می‌باشد، در این حالت مقطع تحت تنش فشاری خراب شده و هیچ کمانشی در آن رخ نمی‌دهد.

۲- مقاطع لاغر (دراز): در این مقاطع، معمولاً مقطع تحت کمانش و پیش از رسیدن به حد تسلیم خراب می‌شود. رفتار این ستون‌ها وابسته به مدول الاستیسیته‌ی آن‌ها (E) است.

۳- مقاطع با طول متوسط: در مقاطعی که ضریب لاغری بین دو حالت فوق قرار دارد، خرابی ترکیبی از مُدهای کمانشی و تنش فشاری خواهد بود.

ارائه‌ی حدود برای ضریب لاغری در آیین‌نامه‌های مختلف با توجه به نوع عضو انجام می‌گیرد. به عنوان مثال در رابطه با ستون‌های فولادی در بسیاری از آیین‌نامه‌های مطرح بین‌المللی مقادیر زیر پیشنهاد شده است:

- ستون‌های کوتاه دارای ضریب لاغری کمتر از ۵۰ می‌باشند.
- ستون‌های لاغر دارای ضریب لاغری بزرگ‌تر از ۲۰۰ هستند.
- ستون‌ها با طول متوسط هم ستون‌هایی هستند که ضریب لاغری آن‌ها بین ۵۰ و ۲۰۰ قرار دارد. رفتار این ستون‌ها وابسته به حد مقاومتی (Strength Limit) آن‌ها می‌باشد.

در سال ۱۷۵۷ اویلر رابطه‌ای معرفی نمود که به کمک آن می‌توان نیرویی که یک ستون ایده‌آل لاغر قبل از کمانش تحمل می‌کند را محاسبه نمود. ستون ایده‌آل لاغر، ستونی است که کاملاً مستقیم بوده، از مصالح همگن ساخته شده و هیچ تنش اولیه‌ای در آن وجود نداشته باشد. زمانی که بار به مقدار بار اویلر می‌رسد، به آن بار بحرانی هم گفته می‌شود. با رسیدن نیروی یک ستون به نیروی کمانش، افزایش اندک بار سبب می‌شود که ستون به‌یک‌باره تغییرشکل داده و فرم جدید بگیرد.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

در این فرمول:

E: مدول الاسیتیسیته

I: ممان اینرسی مقطع

K: ضریب طول مؤثر ستون

L: طول آزاد بین دو تکیه‌گاه

با دقت در فرمول فوق، می‌توان نتیجه گرفت که بار بحرانی با مدول الاستیسیته (E) و ممان اینرسی (I) رابطه مستقیم داشته و با افزایش این دو، بار بحرانی مقطع (مقاومت در برابر کمانش) هم افزایش می‌یابد. همچنین مربع طول مؤثر (KL)، با بار بحرانی رابطه عکس داشته و با افزایش طول مؤثر، بار بحرانی کاهش می‌یابد؛ این بدین معناست که بار بحرانی برای یک ستون دو سر مفصل در مقایسه با یک ستون با یک انتهای گیردار و یک انتهای آزاد، $\frac{1}{4}$ می‌باشد.

برای تأکید بیشتر بر روی اهمیت ضریب لاغری (KL/r) و همچنین روشن‌تر شدن رابطه‌ی آن با بار کمانش، رابطه بار بحرانی کمانش را می‌توان به صورت زیر هم نوشت:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \xrightarrow{r=\sqrt{\frac{I}{A}}} P = \frac{\pi^2 Er^2 A}{(KL)^2} \rightarrow P = \frac{\pi^2 EA}{(\frac{KL}{r})^2}$$

در این رابطه مشخص است که مربع ضریب لاغری $(\frac{KL}{r})$ با بار کمانش (P) رابطه معکوس دارد، از این رو با افزایش ضریب لاغری، بار کمانش کاهش می‌یابد (مقطع تحت بار فشاری کمتری کمانش می‌کند) و مقطع ضعیف می‌شود.

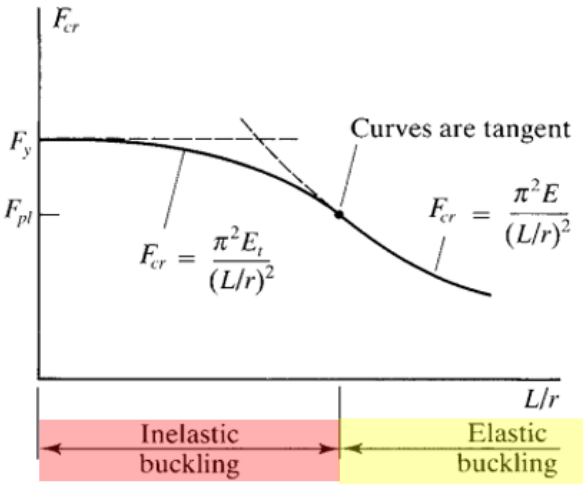
کمانش الاستیک و غیر الاستیک

همان‌طور که در ابتدا هم بیان گردید، با توجه به مصالح سازنده‌ی عضو، کمانش را می‌توان به دو صورت کمانش الاستیک و غیر الاستیک (پلاستیک) تعریف نمود. در کمانش الاستیک فرض می‌شود در زمان کمانش عضو، رفتار ماده همچنان در ناحیه‌ی الاستیک قرار داشته و ماده تسلیم نشده است. در این حالت تنش در عضو، کمتر از تنش تسلیم بوده و مدول الاستیسیته (E) را هم تقریبا می‌توان خطی فرض نمود.

اما در حالتی که کمانش غیر الاستیک است، با افزایش تنش‌ها از میزان تنش تسلیم مصالح، منحنی تنش-کرنش هم غیرخطی خواهد شد. در این حالت، مدول الاستیسیته در هر لحظه به دلیل رفتار غیرخطی ماده، متغیر بوده و نمی‌توان برای محاسبه‌ی بار بحرانی کمانش از یک مدول الاستیسیته‌ی ثابت استفاده نمود. در نتیجه برای محاسبه‌ی مدول الاستیسیته باید در هر سطح تنش، شیب خط مماس بر منحنی تنش-کرنش را محاسبه نمود که به آن مدول الاستیسیته‌ی مماسی (تانژانتی) یا E_t گفته می‌شود. با این توضیحات، بار بحرانی کمانش در حالت الاستیک و غیر الاستیک برابر است با:

$$P_{cr-Elastic} = \frac{\pi^2 EA}{(\frac{KL}{r})^2} \qquad P_{cr-Inelastic} = \frac{\pi^2 E_t A}{(\frac{KL}{r})^2}$$

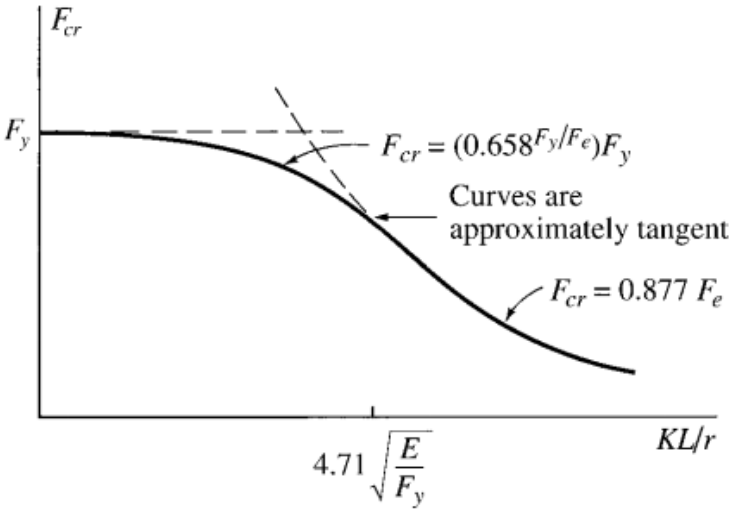
در صورتی که منحنی این دو فرمول رسم گردند، شکل زیر حاصل می‌شود. این منحنی با توجه به ویژگی‌های ماده یعنی F_y، E و E_t و همچنین ضریب لاغری مقطع (KL/r) تعیین می‌شود. این منحنی برای المانی با K=1 رسم شده است.



منحنی بار بحرانی کمانش (F_{cr}) در مقابل ضریب لاغری عضو (K=1)

معادله‌ی منحنی فوق را در ناحیه‌ی غیر الاستیک می‌توان به صورت یک تابع نمایی نشان داد. در ادامه و در شکل زیر معادله‌ی هر دو بخش منحنی، مربوط به حالت کمانش الاستیک و غیر الاستیک، نشان داده شده است. ضریب 0.877 که در F_e (تنش کمانش الاستیک) ضرب شده برای در نظر گرفتن ناشاقولی (Crookedness) اولیه‌ی عضو است.

با دقت در محور افقی نمودار زیر مشخص می‌شود که با کاهش ضریب لاغری (KL/r) یا به عبارتی با قوی‌تر شدن مقطع، کمانش از حالت الاستیک به غیر الاستیک تبدیل شده و در واقع نشان می‌دهد که با تقویت مقطع، المان تحت تنش‌های بزرگ‌تری کمانش می‌نماید، به همین دلیل همان‌طور که قبل‌تر هم اشاره شد، در مقاطع چاق معمولاً پیش از وقوع کمانش، مقطع تحت تنش فشاری خراب می‌شود. مرز لاغری که سبب تبدیل کمانش الاستیک به غیر الاستیک می‌شود، عدد $4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ می‌باشد، ک با توجه به خصوصیات مصالح سازنده‌ی مقطع تعیین می‌شود.



معادله‌ی دو بخش کمانش الاستیک و کمانش غیر الاستیک، در منحنی کمانش- ضریب لاغری

کمانش کلی (Overall Buckling)

در این بخش کمانش کلی مهاربندها تعریف شده و ضوابط آیین‌نامه‌ای مربوط به آن ارائه می‌شود. در شکل زیر یک نمونه کمانش کلی مهاربند مشاهده می‌شود که به دلیل عدم وجود لقمه، جهت تأمین اتصال مناسب بین دو المان مهاربند، رخ داده است.

کمانش کلی مهاربندها تحت زلزله

نکات ذکر شده در بخش گذشته منجر به رسم نموداری شد که محور افقی آن لاغری و محور عمودی، بار بحرانی کمانش را نشان می‌دهد. حال با توجه به این نمودار، ضوابط آیین‌نامه‌ای در رابطه با کمانش کلی مقطع ارائه شده است.

با توجه به بخش ۱۰-۲-۴-۳ از مبحث دهم، ضریب لاغری اعضای تحت‌فشار نباید از ۲۰۰ کمتر باشد. همچنین با مراجعه به بخش ۱۰-۲-۴-۴ از مبحث دهم مقررات ملی، رابطه‌هایی برای محاسبه‌ی بار بحرانی کمانش، با توجه به معادله‌ی نمودار بخش قبل، تعریف شده است.

۱۰-۲-۴-۴ کمانش خمشی

مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری، P_n ، با مقطع بدون اجزای لاغر بر اساس کمانش خمشی با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود.

$$P_n = F_{cr} A_g \qquad (۱۰-۲-۴-۱)$$

که در آن:

A_g= سطح مقطع کلی عضو

F_{cr}= تنش فشاری ناشی از کمانش خمشی که از روابط زیر به دست می‌آید.

الف) اگر $\frac{KL}{r} \le ۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ یا $\frac{F_y}{F_e} \le ۲/۲۵$ باشد:

$$F_{cr} = [۰/۶۵۸^{\frac{F_y}{F_e}}]\, F_y \qquad (۱۰-۲-۴-۲)$$

ب) اگر $\frac{KL}{r} > ۴/۷۱\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ یا $\frac{F_y}{F_e} > ۲/۲۵$ باشد:

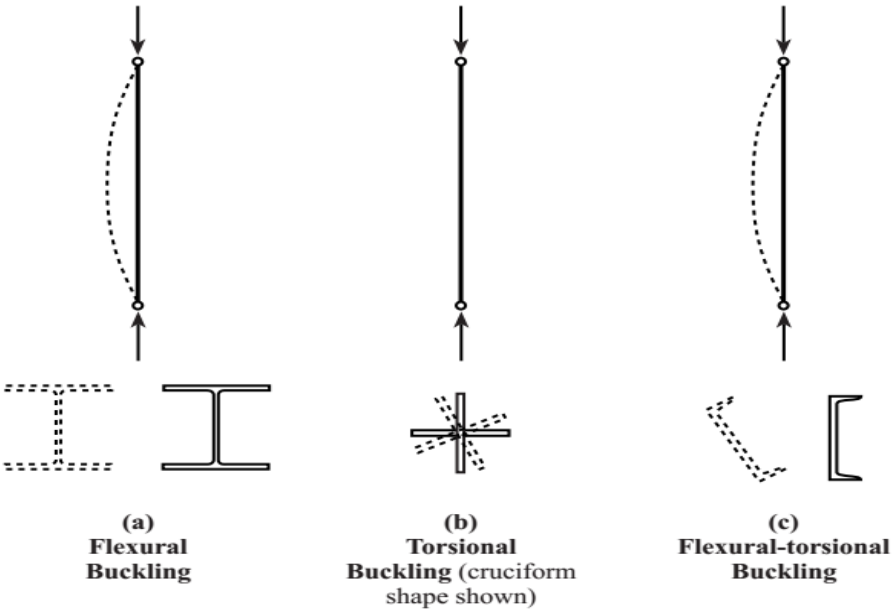
$$F_{cr} = ۰/۸۷۷\, F_e \qquad (۱۰-۲-۴-۳)$$

روابط ذکر شده در اینجا برای کمانش‌های کلی از نوع خمشی می‌باشد؛ اما برخی از اعضا ممکن است تحت کمانش پیچشی و یا کمانش خمشی-پیچشی هم قرار گیرند. به‌طورکلی سه نوع کمانش کلی ممکن است در المان رخ دهد:

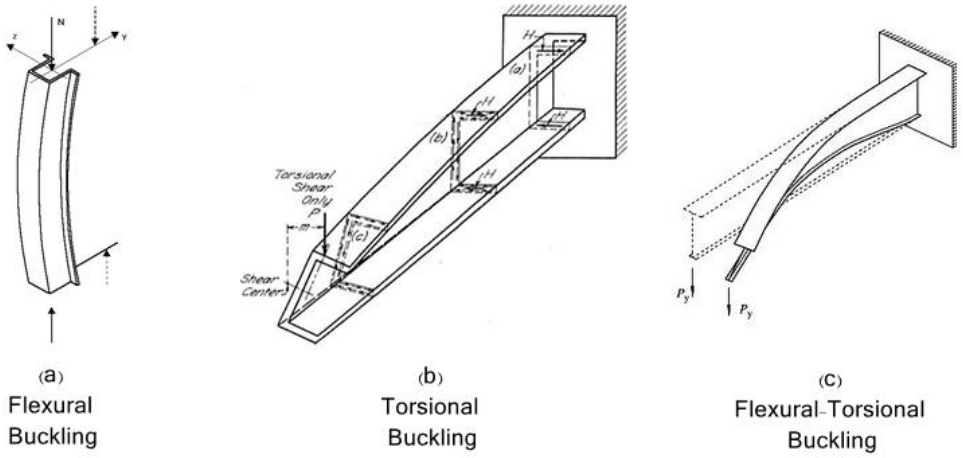
۱- **کمانش خمشی:** این کمانش تغییر شکلی است ناشی از خمش که حول محور با بزرگ‌ترین ضریب لاغری رخ می‌دهد که همان محور ضعیف مقطع یا محور با شعاع ژیراسیون کوچک‌تر خواهد بود. مقاطعی که تحت نیروی فشاری قرار دارند، با هر نوع شکلی، ممکن است دچار این کمانش شوند.

۲- **کمانش پیچشی:** این نوع کمانش حول محور طولی المان رخ می‌دهد. این حالت تنها در مقاطع لاغری که دارای دو محور تقارن هستند (مانند مقاطع صلیبی) رخ می‌دهد. مقاطع گرم نورد شده‌ی استاندارد معمولاً تحت کمانش پیچشی قرار نمی‌گیرند و فقط در حالتی که مقطع از ورق ساخته شده باشد این حالت باید کنترل گردد.

۳- **کمانش خمشی-پیچشی:** این حالت ترکیبی از کمانش خمشی و پیچشی می‌باشد و در اثر آن مقطع به طول هم‌زمان دچار خمش و پیچش می‌شود. این کمانش تنها در مقاطع نامتقارن رخ می‌دهد، که عبارت‌اند از: مقاطعی با یک محور تقارن مانند ناودانی، نبشی با بال مساوی، دوبل نبشی و همچنین مقاطع بدون محور تقارن مانند نبشی‌های با بال نامساوی.



سه حالت اصلی کمانش کلی



سه حالت اصلی کمانش کلی از نمای سه‌بعدی

الزامات طراحی مقاطع در حالتی که کمانش به صورت پیچشی و یا خمشی–پیچشی باشد در بند ۱۰–۲–۴–۵ مبحث دهم مقررات ملی ذکر شده‌اند. با توجه به این بند از آیین‌نامه، کمانش‌های پیچشی و خمشی–پیچشی باید در اعضای فشاری زیر در نظر گرفته شوند:

۱- مقاطع دارای یک محور تقارن (مانند ناودانی).

۲- مقاطع نامتقارن (مانند نبشی با بال نامساوی).

۳- مقطع دارای دو محور تقارن است در حالتی که طول آزاد مهارنشده در برابر پیچش، از طول آزاد مهارنشده در برابر خمشی تجاوز نماید.

با این توضیحات، از آنجایی که معمولاً مقاطع مورد استفاده در مهاربندها جزو سه حالت فوق نمی‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت که کمانش‌های پیچشی و خمشی–پیچشی معمولاً در مهاربندها رخ نمی‌دهند و احتمال رخداد کمانش کلی از نوع خمشی بیشتر خواهد بود.

کمانش کلی در اعضای ساخته شده

اعضای بادبندی به وسیله‌ی مقاطعی ساخته می‌شوند که معمولاً به آن‌ها مقاطع ساخته شده گفته می‌شود. برای کنترل کمانش کلی در المان‌های فشاری که از نوع ساخته شده هستند، مبحث دهم مقررات ملی ضوابط جداگانه‌ای در نظر می‌گیرد. اعضای ساخته شده عبارت‌اند از:

الف– مقاطع ساخته شده از ورق.

ب– مقاطع ساخته شده از دو یا چند نیمرخ با قطعات لقمه بین آن‌ها.

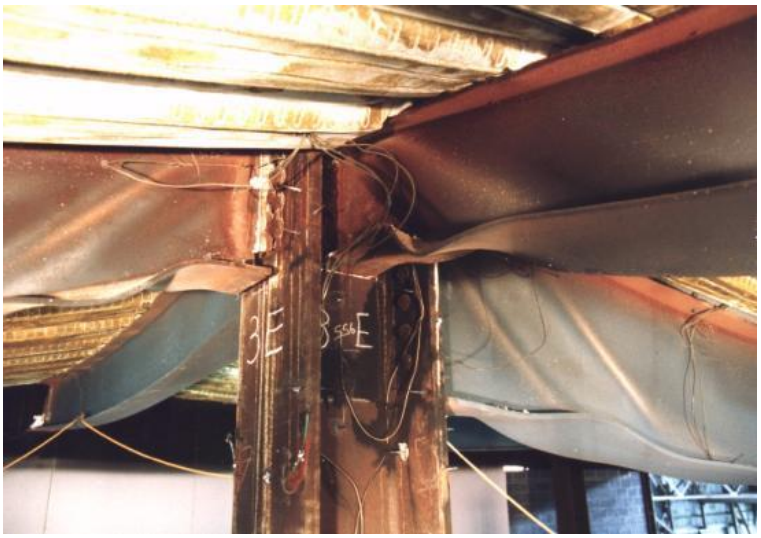
پ– مقاطع ساخته شده از دو یا چند نیمرخ به همراه ورق سراسری یا بست.

ت– مقاطع ساخته شده از دو نیمرخ به هم متصل شده.

مقاومت فشاری مقطع ساخته شده، با توجه به ضریب لاغری (KL/r) آن‌ها تعیین می‌شود. به عبارتی، با توجه به نوع اتصال قطعات متصل‌کننده به المان‌های اصلی که می‌توانند پیچی یا جوشی باشند، ضریب لاغری این مقاطع اصلاح می‌شود. در ادامه و پس از اصلاح ضریب لاغری با استفاده از روابطی که در بندها ۴–۴–۲–۱۰ و ۱۰–۲–۴–۵ مبحث دهم، در رابطه با کمانش خمشی، کمانش پیچشی و کمانش خمشی–پیچشی وجود دارند، اقدام به محاسبه‌ی بار بحرانی کمانش در مقاطع ساخته شده می‌شود.

کمانش موضعی (Local Buckling)

نکات ذکر شده در مورد کمانش که در بخش‌های گذشته در مورد آن‌ها صحبت شد، اصطلاحاً مربوط به حالت کمانش کلی (Overall Buckling) بودند. نوعی دیگری از کمانش هم وجود دارد که به آن کمانش موضعی (Local Buckling) گفته می‌شود و طی آن قسمتی از مقطع خاصیت باربری خود را از دست می‌دهد. برای جلوگیری از کمانش موضعی باید نسبت پهنا به ضخامت هر یک از اجزای مقطعِ عضو فشاری طوری انتخاب شود که از وقوع این پدیده جلوگیری به عمل آید. در ادامه یک نمونه از کمانش موضعی در تیر مشاهده می‌شود.



کمانش موضعی جان تیرها

کمانش موضعی در حالتی رخ می‌دهد که المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی مقطع بسیار لاغر باشد. محدودیت‌های مربوط به کمانش کلی تا زمانی است که مقطع قبل از رسیدن به F_{cr} دچار کمانش موضعی نشود، از این رو کنترل کمانش موضعی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و با دقت در آیین‌نامه‌ها هم می‌توان مشاهده کرد که ابتدا کنترل کمانش موضعی مقطع انجام شده، سپس کمانش کلی کنترل می‌گردد.

کمانش موضعی به صورت یک کمانش محلی یا چروکیدگی (Wrikling) در مقطع رخ می‌دهد. معیار بررسی احتمال رخداد کمانش موضعی، نسبت پهنا به ضخامت یا λ برای هر عضو تشکیل‌دهنده‌ی مقطع است. کمانش موضعی در دو حالت در مقاطع رخ می‌دهد:

۱- **مقاطع تحت‌فشـار محوری:** در این حالت مقاطع فولادی به دو دسـته‌ی لاغر (Slender) و غیرلاغر (NonSlender) تقسـیم می‌شـوند. در صورتی که نسبت پهنا به ضخامت اجزای فشاری تشکیل‌دهنده‌ی مقطع عضو از λ_r بزرگ‌تر باشد، مقطع لاغر محسوب می‌شود. λ_r در واقع مرز بین مقطع لاغر و غیرلاغر می‌باشد که در جدول ۱۰-۲-۲-۱ تا ۱۰-۲-۲-۴ مبحث دهم قابل مشاهده‌اند.

$$\begin{cases} \lambda > \lambda_r \rightarrow \text{مقاطع با اجزای لاغر } (Slender) \\ \lambda < \lambda_r \rightarrow \text{مقاطع با اجزای غیرلاغر } (NonSlender) \end{cases}$$

مطابق تبصره‌ی موجود در بند ۱۰-۲-۲-۱ مبحث دهم، استفاده از مقاطع فولادی با اجزای لاغر در اعضایی که تحت اثر فشار محوری قرار دارند (مانند مهاربندها)، مجاز نمی‌باشد.

۲- **مقاطع تحت خمش:** مقاطع تحت خمش از نظر کمانش موضعی به سه گروه تقسیم می شوند که در بند ۱۰-۲-۲-۲ به آن‌ها اشاره شده است که در ذیل مشاهده می‌شوند.

۱۰-۲-۲-۲ 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 ۱۰-۲-۲-۳ و ۱۰-۲-۲-۴ 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 ۱۰-۲-۲-۳ و ۱۰-۲-۲-۴ تجاوز نموده ولی از λ_r مشخص شده در جداول ۱۰-۲-۲-۳ و ۱۰-۲-۲-۴ 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 ۱۰-۲-۲-۳ و ۱۰-۲-۲-۴ 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 ۱۰-۲-۵ و ۱۰-۲-۶ باید تأمین گردد.

تأثیر کمانش کلی و موضعی در شکل‌پذیری سازه

همان‌طور که می‌دانیم، شکل‌پذیری به معنای توانایی تحمل تغییرشکل‌های غیر الاستیک توسط یک عضو، بدون کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت می‌باشد که سبب استهلاک انرژی می‌شود. در اعضای سازه‌ای شکل‌پذیری به وسیله‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک تأمین می‌شود. در قاب‌های مهاربندی همگرا، المان‌های مهاربندی وظیفه‌ی تأمین شکل پذیری کلی سازه را بر عهده دارند. در مورد قاب‌های مهاربندی واگرا هم تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرهای پیوند سبب اتلاف انرژی و تأمین شکل‌پذیری مورد نیاز سیستم می‌شود.

در واقع تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف سبب می‌شود که سایر المان‌های سازه‌ای الاستیک رفتار کرده و دچار آسیب جدی نشوند. از این رو رفتار اعضای شکل‌پذیرکه به عنوان فیوزهای سازه‌ای عمل می‌کنند، از اهمیت دوچندانی برخوردار است. در مورد مهاربندها، کمانش موضعی و کمانش کلی تأثیر مستقیم در قابلیت جذب انرژی سیستم دارد.

ضوابط ذکر شده در بخش‌های گذشته با توجه به کنترل معیارهای پایداری، سختی و مقاومت اعضا بودند که در بخش دوم از مبحث دهم مقررات ملی مطرح‌شده‌اند؛ اما علاوه بر معیارهای طراحی، معیار شکل‌پذیری در اعضا هم باید مورد توجه قرار گیرد. برای قاب‌های مهاربندی شده دو حد شکل‌پذیری متوسط و زیاد در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این نکته قاب‌های مهاربندی شده به دو دسته‌ی **قاب‌های معمولی** و **قاب‌های ویژه** تقسیم می‌شوند.

در سازه‌ها با شکل‌پذیری زیاد و متوسط که از آن‌ها انتظار تحمل تغییرشکل‌های غیر الاستیک قابل‌توجهی می‌رود، برای مقاطع اعضا ضوابط سخت‌گیرانه‌تری در مورد کمانش موضعی در نظر گرفته می‌شود تا امکان رسیدن به شکل‌پذیری‌های بیشتر فراهم گردد.

در حالتی که مقطع دارای شکل پذیری متوسط و یا زیاد باشد، در رابطه با نسبت پهنا به ضخامتِ اجزا ($\boldsymbol{\lambda}$) تعریف جدیدی برای فشردگی مطرح می‌شود که به آن مقطع فشرده‌ی لرزه‌ای گفته می‌شود. این مقطع دقیقاً همان تعریف مقطع فشرده را دارد اما به جای مقایسه‌ی $\boldsymbol{\lambda}$ با λ_r برای تعیین فشردگی یا عدم فشردگی، $\boldsymbol{\lambda}$ با λ_{md} (برای شکل‌پذیری متوسط) و λ_{hd} (برای شکل‌پذیری زیاد) مقایسه می‌شود. در حالتی که قاب مهاربندی شده از نوع معمولی یا ویژه باشد، برخی از اعضای سازه‌ای باید فشرده‌ی لرزه‌ای در نظر گرفته شوند. جدول ۱۰-۳-۴-۱ مبحث دهم، مربوط به محدودیت نسبت پهنا به ضخامت در اجزای فشاری با شکل پذیری متوسط و زیاد می‌باشد.

مفهوم فشردگی و فشردگی لرزه‌ای در آیین‌نامه‌های طراحی فولادی به منظور جلوگیری از کمانش موضعی اعضا معرفی شده است. با مقایسه‌ی ضوابط فشردگی آیین‌نامه در مورد مهاربندهای همگرای معمولی و مهاربندهای همگرای ویژه به نتایج مهمی می‌توان رسید.

المان‌های مهاربند در قاب‌های همگرای معمولی و ویژه باید از نوع فشرده‌ی لرزه‌ای باشند؛ اما نکته‌ی مهم در رابطه با کنترل فشردگی المان‌های مهاربند این است که در قاب‌های همگرای معمولی این کنترل با توجه به محدودیت λ_{md} انجام می‌شود اما در قاب‌های همگرای ویژه که شکل پذیری بیشتری دارند این کنترل با λ_{hd} صورت می‌گیرد. همان‌طور هم که می‌دانیم، λ_{hd} در مقایسه با λ_{md} ضابطه‌ای سخت‌گیرانه‌تر بوده و سبب تقویت مقاطع می‌شود. هدف از این سختگیری بیشتر، تأخیر هر چه بیشتر کمانش موضعی است تا امکان رسیدن به سطوح بالاتری از شکل پذیری فراهم شود.

با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که کمانش موضعی تأثیر نامطلوبی بر روش شکل‌پذیری داشته، و تا حد کان وقوع آن باید به تأخیر بیافتد. لازم به ذکر است که احتمال رخداد کمانش کلی و کمانش موضعی به صورت هم‌زمان در مهاربند وجود دارد.

به‌طورکلی شکل‌پذیری در مهاربندها به دو صورت تأمین می‌گردد:

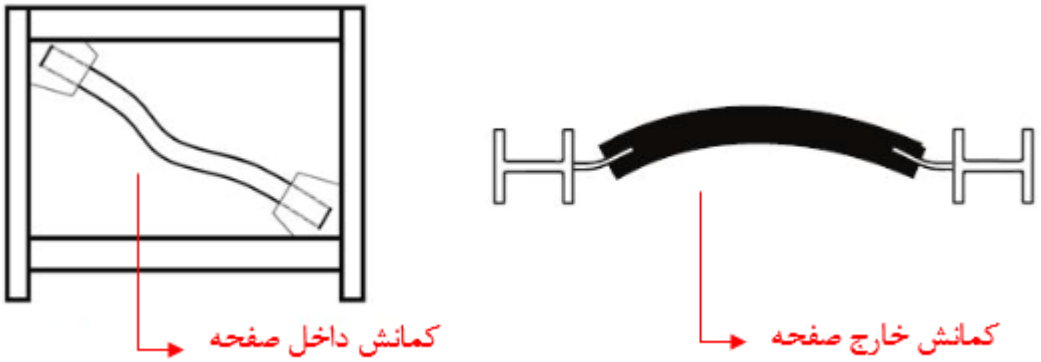
تسلیم مهاربندهای کششی که سبب ورود مقطع مهاربند به ناحیه‌ی غیر الاستیک می‌شود و درنتیجه‌ی آن، جذب انرژی صورت می‌گیرد. کمانش غیر الاستیک و کلی مقطع.

همان‌طور که در بخش‌های گذشته هم ذکر شد، کمانش به دو صورت کمانش الاستیک و غیر الاستیک می‌باشد. کمانش الاستیک زمانی رخ می‌دهد که مقطع قبل از تسلیم مصالح، کمانش نماید، در این حالت کمانش عضو هیچ کمکی به شکل‌پذیری سیستم نمی‌نماید. با این توضیحات، کمانشی که سبب تأمین شکل‌پذیری سیستم می‌شود، کمانش غیر الاستیک خواهد بود.

در بخش بعدی کمانش داخل و یا خارج صفحه‌ی مهاربندها بررسی می‌شود و نحوه‌ی تأمین شکل‌پذیری در هر یک از آن‌ها شرح داده خواهد شد.

کمانش‌های داخل و خارج صفحه

مهاربندها ممکن است در دو حالت داخل و یا خارج صفحه کمانش کنند که در شکل زیر هر کدام از این حالت‌ها نمایش داده شده است.



شکل شماتیک از کمانش داخل و خارج صفحه

وقوع کمانش خارج صفحه‌ی مهاربندها، معمولاً به دلایل زیر بیشتر است:

الف) سختی ورق اتصال (Gusset Plate) در خارج از صفحه بسیار ناچیز است که سبب می‌شود کمانش در این جهت راحت‌تر باشد.

ب) در مواردی که مهاربند در داخل دیوار (میان قاب) قرار می‌گیرد، به سبب سختی درون صفحه‌ی دیوار، امکان تغییرشکل داخل صفحه کاهش یافته و مهاربند به صورت خارج از صفحه کمانش می‌کند.

کمانش خارج صفحه (شکل سمت راست) در مقابل کمانش داخل صفحه (شکل سمت چپ) بادبند

در صورتی که نیمرخ مهاربند متقارن باشد، امکان وقوع کمانش داخل و خارج از صفحه یکسان می‌باشد، اما اغلب به علت سختی پایین‌تر ورق اتصال (ورق گاست) در خارج از صفحه، کمانش خارج صفحه رخ می‌دهد. به عنوان مثال برای نیمرخ قوطی، با توجه به نکته‌ی ذکر شده، کمانش محتمل به صورت کمانش خارج از صفحه خواهد بود. تعداد مقاطع مهاربند که کمانش داخل صفحه داشته باشند اندک می‌باشد. جفت نبشی که از بال کوتاه کنار هم قرار گرفته‌اند کمانش داخل صفحه ممکن است داشته باشد.

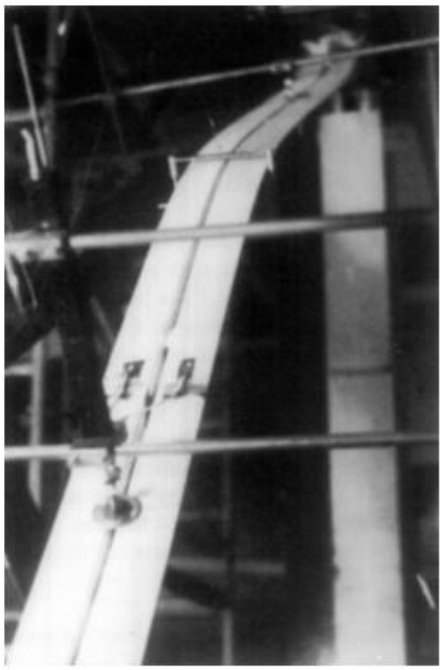
به‌طورکلی در صورتی که بخواهیم کمانش به صورت داخل صفحه رخ دهد، لاغری خارج صفحه‌ی مقطع مهاربند باید کمتر از لاغری داخل صفحه باشد تا امکان کمانش داخل صفحه فراهم شود. برخی از منابع برای این نسبت عدد ۰٫۶۵ را پیشنهاد نموده‌اند.

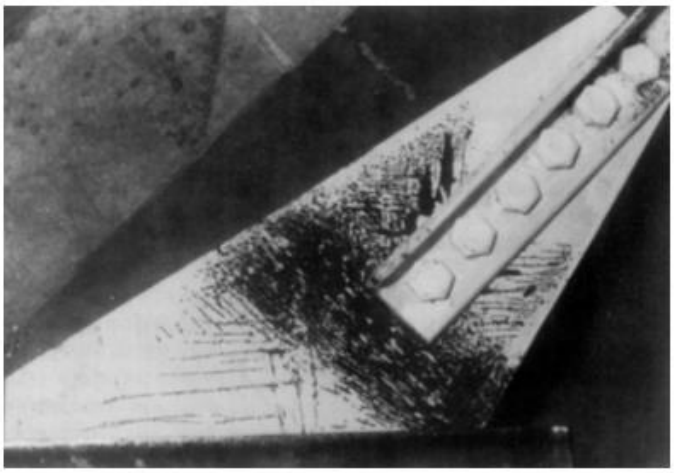
$$\frac{(\frac{KL}{r})_{\text{خارج صفحه}}}{(\frac{KL}{r})_{\text{داخل صفحه}}} \leq 0.65$$

محل تشکیل مفصل‌های پلاستیک در حالت کمانش داخل صفحه و خارج صفحه متفاوت است. در حالتی که **کمانش داخل صفحه** باشد، سه مفصل پلاستیک تشکیل خواهد شد که عبارت‌اند از:

۱- یک مفصل پلاستیک در وسط دهانه.

۲- دو مفصل پلاستیک دیگر در طرفین عضو، خارج از ورق‌های اتصال.



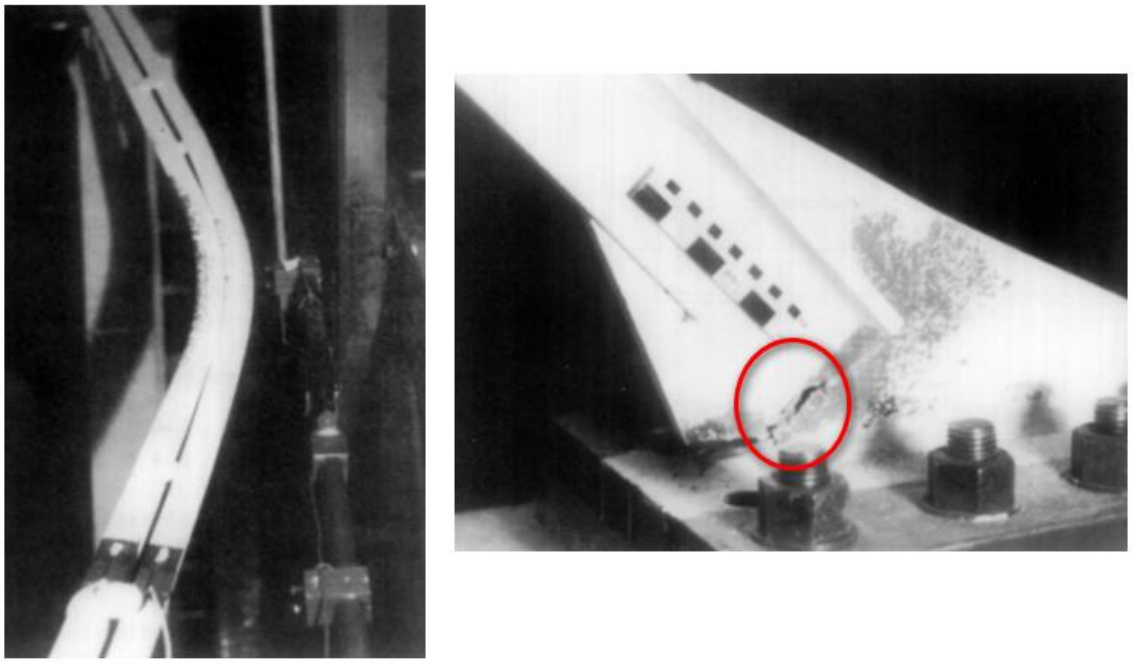


کمانش داخل صفحه مهاربند و سالم ماندن ورق اتصال که بیانگر تشکیل مفصل پلاستیک در خارج از این ورق است.

در حالتی که **کمانش خارج صفحه** باشد، همچنان سه مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از:

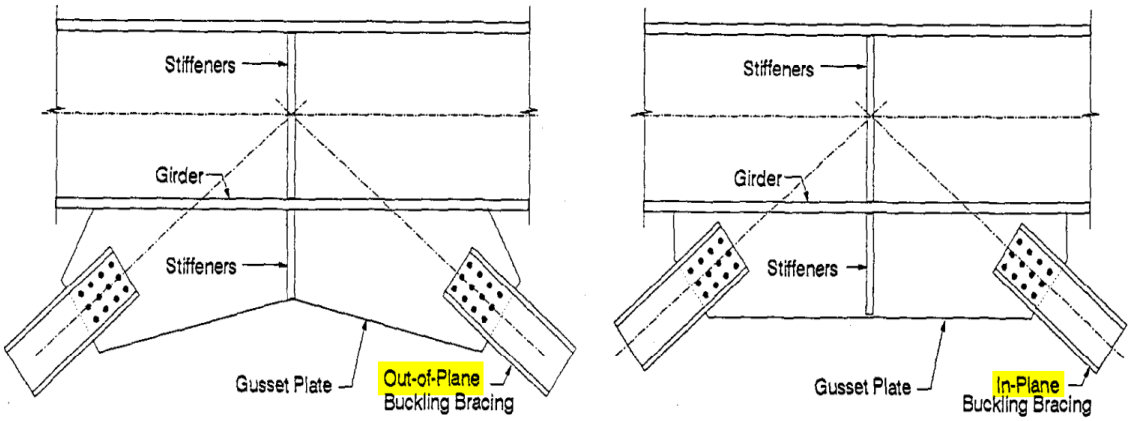
۱- یک مفصل پلاستیک همچنان در وسط دهانه.

دو مفصل پلاستیک دیگر در داخل ورق‌های اتصال.



کمانش خارج صفحه مهاربند و تشکیل مفصل پلاستیک در ورق اتصال که سبب گسیختگی این ورق شده

با توضیحات ارائه شده متوجه می‌شویم که طراحی ورق اتصال تأثیر فراوانی در نحوه‌ی کمانش بادبندها خواهد داشت که یک نمونه از آن در شکل زیر مشاهده می‌شود.

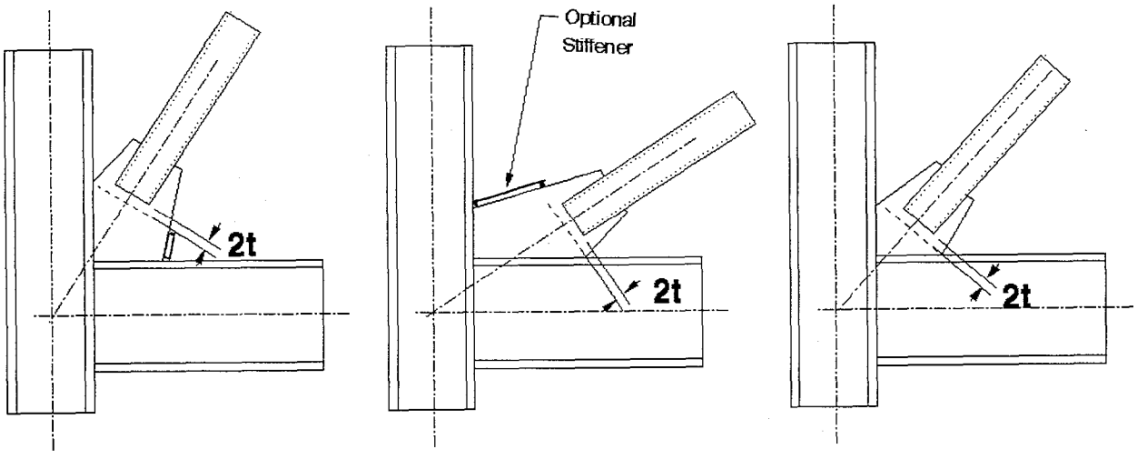


تأثیر ورق‌های اتصال در نوع کمانش داخل یا خارج صفحه‌ی مهاربند

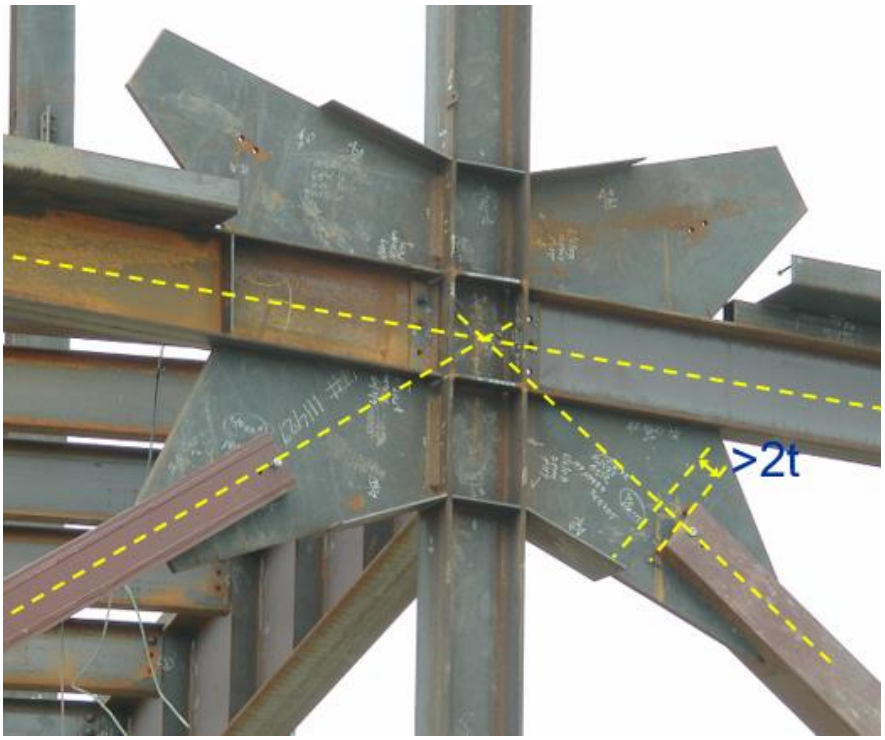
در شکل فوق مشاهده می‌شود که با ضعیف‌تر طراحی کردنِ وسط ورق اتصال در شکل سمت چپ (کاهش عرض ورق)، تمایل به تشکیل مفصل پلاستیک در این ورق می‌باشد تا کمانش عضو به صورت خارج صفحه رخ دهد.

از نظر تأمین شکل‌پذیری، کمانش داخل صفحه و خارج صفحه تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ اما برای رسیدن به حدود شکل پذیری مورد نیاز، ضوابط اشاره شده در آیین‌نامه‌ها باید رعایت گردند. به عنوان مثال در بند ۱۰-۳-۱۱-۳ مبحث دهم ذکر شده، در حالتی که کمانش مهاربندها از نوع خارج صفحه در نظر گرفته می‌شود، از آنجایی که مفاصل پلاستیک در داخل ورق‌های اتصال تشکیل می‌شوند، این ورق‌ها باید قادر به تحمل دوران‌های غیر الاستیک حاصل از تغییرشکل‌های پس از کمانش باشند.

از این رو، علاوه بر اینکه شرایط کمانش خارج صفحه باید فراهم شود، مهاربندها باید در فاصله‌ای به اندازه‌ی دو برابر ضخامت صفحه‌ی اتصال (2t) قبل از خط تکیه‌گاهی ورق اتصال (خط آزاد تنش) قطع شوند. نمونه‌هایی از رعایت این فاصل در ورق اتصال‌های مختلف در شکل زیر مشاهده می‌شود.



رعایت فاصله‌ی 2t از خط تکیه‌گاهی ورق اتصال، در حالت‌های مختلف



رعایت فاصله‌ی 2t در اتصال مهاربند به ورق اتصال

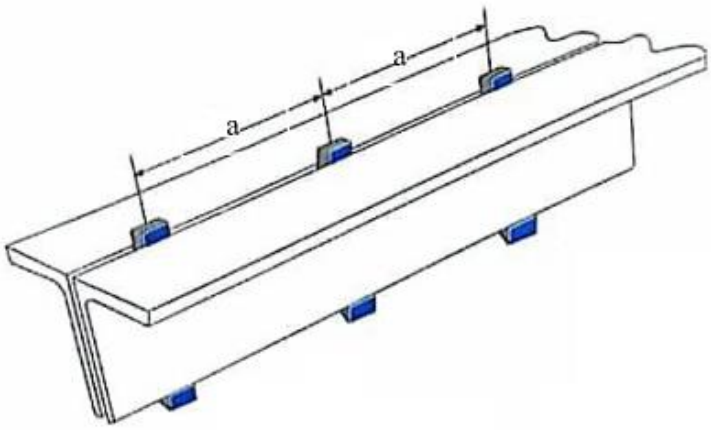
در نظر گفتن این فاصله سبب می‌شود ورق اتصال بتواند آزادانه دوران نماید، در صورتی که این فاصله رعایت نشود ورق اتصال در سیکل‌های اولیه، دچار گسیختگی شده و امکان دوران‌های غیر الاستیک و تشکیل مفصل پلاستیک در آن وجود نخواهد شد.

با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت چندانی میان کمانش داخل صفحه و خارج صفحه از نظر شکل‌پذیری وجود ندارد و هر یک از این دو در صورتی که به درستی طراحی شوند، می‌توانند شکل‌پذیری مورد نیاز سیستم را تأمین نمایند. لازم به ذکر است که کمانش خارج صفحه به دلیل اینکه سبب می‌شود میانقاب‌ها دچار مشکلات بیشتری شوند، گاهی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، اما با اتخاذ تدابیر لازم در راستای مهار این میانقاب‌ها با استفاده از وال‌پست می‌توان، از خرابی این المان‌ها هم جلوگیری نمود تا سبب آسیب‌های مالی و جانی نشود.

ضوابط مربوط به لقمه در مقاطع ساخته شده مهاربندها

در بسیاری از مواقع مقطع اعضای فشاری مانند مهاربندها، به صورت ساخته‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه جهت اتصال آن‌ها باید تمهیداتی اندیشیده شود. جوش سرتاسری دو مقطع به یکدیگر معمولاً به دلیل صدماتی که این فرآیند به مقطع وارد می‌کند (مانند ترد شدن یا سوختگی مقطع)، سبب کاهش شکل پذیری می‌شود، چندان مورد اقبال نیست. بدین منظور، می‌توان از بست‌هایی که به اصطلاح به آن‌ها **لقمه** گفته می‌شود، استفاده نمود.

لقمه، در برخی مقاطع مانند مقاطع دوبل نبشی و یا دوبل ناودانی، جهت اتصال المان‌ها به یکدیگر استفاده می‌شوند که در شکل زیر هم یک نمونه از این مقاطع ساخته شده به کمک لقمه دیده می‌شود. لقمه‌ها معمولاً به شکل تسمه‌هایی ساخته می‌شوند که این تسمه‌ها از دو طرف مقطع اندکی بیرون‌زدگی دارند تا فرآیند جوشکاری تسهیل شود.



اتصال مقطع دوبل نبشی به کمک لقمه در فواصل a از یکدیگر

ساخت مقطع دوبل ناودانی به کمک لقمه

محدودیت‌های مربوط به بست‌ها و لقمه‌ها در مقاطع ساخته شده عبارت‌اند از:

۱- با توجه به بند ۱۰-۲-۴-۷-۲ از مبحث دهم مقررات ملی، در مقاطع ساخته شده که در آن‌ها از لقمه استفاده می‌شود، فاصله‌ی لقمه‌ها (a) باید به نحوی باشد که ضریب لاغری حداقل برای هر یک از اجزا (r_i) در فاصله‌ی a، کوچک‌تر از $\frac{3}{4}$ ضریب لاغری کل عضو ساخته شده باشد.

$$\frac{K_i a}{r_i} \leq \frac{3}{4}(\frac{KL}{r})_{\text{کل عضو ساخته شده}}$$

۲- بـ ستهای مورد ا ستفاده در اء ضای مهاربندی در قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه در بند ۱۰-۳-۱۱-۱ مورد بحث واقع شده‌اند. در این قاب‌ها، لقمه‌های مهاربندهایی که مقطع آن‌ها به اصطلاح ساخته شده محسوب می‌گردد باید طوری باشند که لاغری تک نیمرخ ($\frac{a}{r_i}$) در فاصله بین دو لقمه، از ۰,۴ لاغری کل حاکم بر عضو مرکب تجاوز ننماید (این ضریب برای شکل‌پذیری ویژه می‌باشد).

$$(\frac{a}{r_i})_{single} \leq 0.4(\frac{KL}{r})_{max}$$

r_i: شعاع ژیراسیون حداقل تک نیمرخ

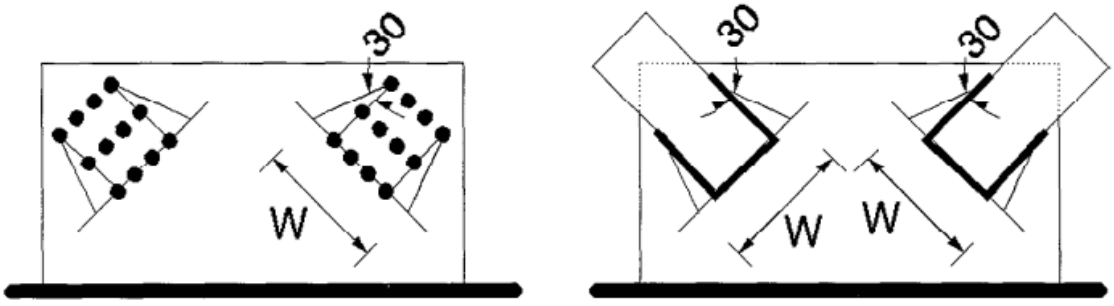
a: فاصله‌ی بین هر دو لقمه‌ی متوالی

همچنین مجموع مقاومت برشی طراحی اتصال‌دهنده‌ها باید برابر یا بیشتر از مقاومت کششی طراحی هر عضو باشد. فاصله‌ی لقمه‌ها باید به طور یکنواخت باشد و تعداد لقمه‌ها در طول عضو از ۲ عدد کمتر نشود. لقمه‌ها در یک‌چهارم میانی طول آزاد مهاربندها هم نباید تعبیه شوند.

عرض ویتمور

بنا به نظریه‌ای که در ابتدا در سال ۱۹۵۲ توسط ویتمور (Whitmore) ارائه شد، تنش‌های حاصل بر روی ورق اتصال در سطحی توزیع می‌گردند که این سطح، با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به اولین وسیله‌ی اتصال رسم شده و تا آخرین وسیله‌ی اتصال ادامه می‌یابد. این کار سبب به وجود آمدن یک ذوزنقه بر روی ورق اتصال خواهد شد، در این حالت به طول قاعده‌ی بزرگ ذوزنقه‌ی مذکور، **عرض ویتمور** گفته می‌شود.

به سطح مقطع حاصل از ضرب عرض ویتمور در ضخامت ورق را سطح مقطع مؤثر ورق گاست می‌گویند. نحوه‌ی محاسبه‌ی عرض ویتمور در شکل زیر، در حالت اتصالات پیچی و جوشی، مشاهده می‌شود.



عرض ویتمور در اتصالات پیچی و جوشی

با تقسیم نیروی محوری موجود در مهاربند بر سطح مقطع مؤثر گاست پلیت، تنش موجود در ورق اتصال حاصل می‌شود که از این تنش برای طراحی ابعاد ورق اتصال (گاست پلیت) استفاده می‌شود.

منابع

- مبحث دهم مقرارت ملی ایران.
- “Steel Design”, William T. Segui, Fifth Edition.
- طراحی سازه های فولادی بر مبنای آیین‌نامه فولاد ایران، شاپور طاحونی.
- “Seismic Behavior and Design of Gusset Plates”,Abolhassan Asraneh-Asl, 1998

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر برای شرکت مهندسی سبز سازه محفوظ می باشد و هرگونه کپی برداری، تقلید یا باز نشر غیر قانونی بوده و تحت پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.