

بررسی و مقایسه انواع بادبند همگرا در
قالب یک ویدئو

فاطمه جوادی
محمد جواد زاهدی

ناظر علمی:

علیرضا آران

امیر صفی زاده

Sabzsaze Group

sabzsaze.com

 Sabzsaze

 Sabzsaze



سبزسازه



بررسی و مقایسه انواع بادبند همگرا در قالب یک ویدئو

گروه صنعتی
سبزسازه

مقدمه

مهاربند همگرا چیست؟ انواع بادبند در ساختمان به چه شکلی است؟ تفاوت مهاربند همگرای ویژه و مهاربند همگرای معمولی در چه چیزی است؟ همانطور که می دانید مهاربندها (بادبندها) یکی از اعضای سیستم باربر جانبی هستند که برای مقاومت در برابر زلزله طراحی می شوند اما اگر بادبندها نتوانند وظیفه خود را به درستی انجام دهند، ساختمان می تواند تا مرز انهدام کامل پیش رود اما چه نوع مهاربندی باید در طراحی سازه استفاده کنیم؟

ما در این مقاله جامع به معرفی انواع بادبند همگرا (ضربدری، قطری، شورون و ...) می پردازیم و در نهایت نکاتی در رابطه با نحوه ترسیم و مدل سازی مهاربندهای همگرا در نرم افزار ETABS2019 و همچنین نکات معماری مهاربند شورون را بیان می کنیم. برای تسلط کامل بر روی انواع مهاربندهای همگرا حتما یک بار ویدئوی رایگانی را که در ابتدای مقاله قرار گرفته است مشاهده کنید.

نام مقاله: بررسی انواع مهاربندهای همگرا و مقایسه آنها
 نویسنده: فاطمه جوادی، محمد جواد زاهدی
 ناظر علمی: علیرضا آران، امیر صفی زاده
 ناشر: سبزسازه
 نسخه: آبان ماه ۱۴۰۲



نشانی دفتر مرکزی: تهران، خیابان مطهری، خیابان ملایری پور غربی،
 پلاک ۱۰۲، طبقه ۵، واحد ۱۳

نشانی دفتر آموزش: بیرجند، پاسداران ۳۵، بلوک ۲، واحد ۸
 تلفن: ۰۵۶۳۲۰۴۴۴۰
 کد پستی: ۹۷۳۵۱۱۴۸۸۴
 پرسش و پاسخ درباره این کتاب:

<https://sabzsaze.com/cbf/>

حق چاپ و نشر محفوظ و مخصوص ناشر می باشد. لذا هرگونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب بدون ذکر نام سبزسازه ممنوع بوده، شرعا حرام است و پیگرد قانونی دارد.



فهرست مطالب

صفحه

۱	معرفی مهاربند همگرا.....	۵
۲	آشنایی با مهاربندها.....	۵
۱.۲	مهاربند همگرای ضربدري.....	۶
۲.۲	مهاربند همگرای قطري.....	۶
۳.۲	مهاربند همگرای شورون.....	۷
۴.۲	مهاربند همگرای K شکل.....	۹
۵.۲	مهاربندهای چند ردیفی.....	۱۰
۶.۲	آبر مهاربندها.....	۱۲
۷.۲	مهاربند دروازه‌ای.....	۱۲
۸.۲	مزایا و معایب مهاربندهای همگرا.....	۱۴
۹.۲	مهاربند زانویی (KBF).....	۱۵
۱۰.۲	مهاربندهای کمانش ناپذیر (BRB).....	۱۶
۱۱.۲	تفاوت مهاربندهای ویژه و معمولی.....	۱۷
۱۲.۲	مهاربندهای همگرای ویژه مختلط.....	۱۸
۳	محدودیت خروج از مرکزیت از دید مبحث دهم مقررات ملی ساختمان.....	۱۹
۴	مقایسه مهاربندهای همگرا از لحاظ سختی، شکل پذیری و ایجاد بازشو.....	۲۱
۵	مقایسه مهاربندهای همگرا از نظر کمانش و ایجاد مفصل پلاستیک.....	۲۲
۶	مقایسه مهاربندهای شورون از لحاظ معماری و مشکلات اجرایی.....	۲۲
۷	مقایسه ضریب رفتار قاب‌های مهاربندی.....	۲۳
۸	مقایسه رفتار مهاربندهای همگرا در هنگام وقوع زلزله.....	۲۴
۱.۸	مهاربندهای شورون هفتی و هشتی.....	۲۴
۲.۸	مهاربندهای K شکل.....	۲۹
۳.۸	مهاربندهای ضربدري.....	۳۰
۹	عوامل تاثیرگذار در رفتار شکل پذیر مهاربندهای همگرا.....	۳۱
۱۰	مدل سازی مهاربندهای همگرا در نرم افزار ایتبس.....	۳۲
۱.۱۰	روش ترسیم سریع مهاربندها.....	۳۴
۲.۱۰	تنظیمات عمومی پیش از طراحی.....	۳۵
۳.۱۰	تنظیمات اختصاصی مهاربندها.....	۳۶
	پرسش و پاسخ.....	۳۶

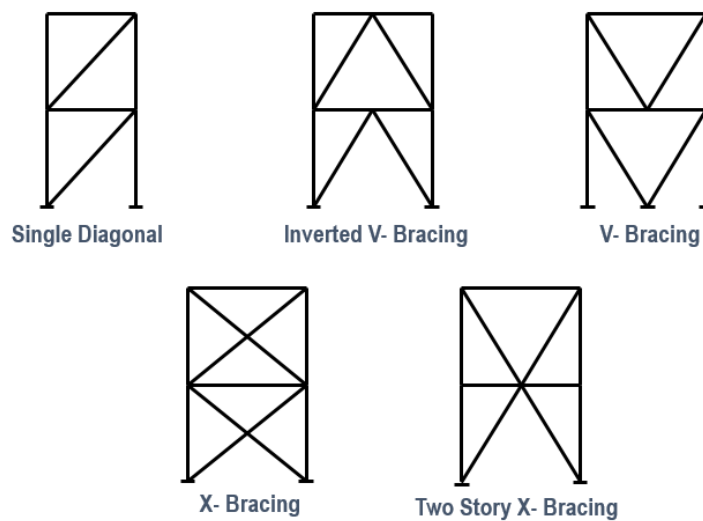


نتیجه گیری و جمع بندی..... ۳۷



۱ معرفی مهاربند همگرا

به طور کلی مهاربندها اعضای باربر جانبی هستند که با اضافه شدن به سازه، سختی جانبی آن را افزایش می‌دهند و به سه دسته مهاربندهای هم‌محور یا همگرا، برون‌محور یا واگرا و سیستم‌های نوین مهاربندی تقسیم‌بندی می‌شوند. اعضای مهاربندها را می‌توان از مقاطعی به شکل مستطیل، I شکل، دایره‌ای، دویل نبشی و دویل ناودانی انتخاب نمود. لازم به ذکر است از تعبیه مهاربندها در دهانه‌هایی که به دیافراگم متصل نیستند بایستی خودداری نمود. همان‌طور که از اسم مهاربندهای همگرا پیداست، اعضای مهاربندی یا امتداد آن‌ها در یک نقطه همگرا شده و باهم تلاقی دارند. این نقطه می‌تواند روی تیر، روی ستون یا در صفحه قاب باشد. مهاربندهای همگرا با نام هم‌محور نیز شناخته می‌شوند. در این مهاربندها دو انتهای اعضای مهاربندی مفصلی بوده و اعضا دارای نیروی کششی یا فشاری هستند. رفتار مهاربندهای همگرا همچون خرپاهای قائم می‌باشد، بطوریکه از طریق سختی محوری ایجادشده در تیر و ستون به مقاومت در برابر نیروهای جانبی می‌پردازند. بسته به نقطه تلاقی مهاربندها، نوع مهاربند مشخص می‌شود که در ادامه انواع مهاربندهای همگرا معرفی می‌شود.



شکل ۱- انواع مهاربندی های همگرا در یک نگاه

۲ آشنایی با مهاربندها

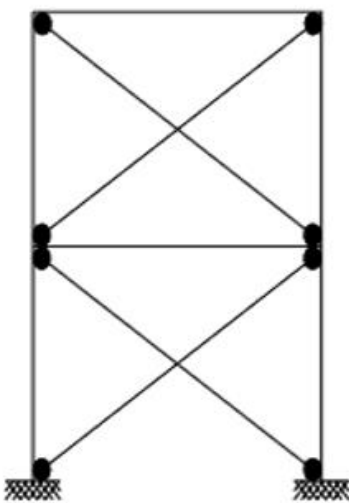
مهاربندهای همگرا بر ۶ نوع هستند:

- ۱- مهاربند ضربدری
- ۲- مهاربند قطری
- ۳- مهاربند شورون هشتی
- ۴- مهاربند شورون هفتی
- ۵- مهاربند ترکیب شورون هفتی و هشتی
- ۶- مهاربند K شکل

در ادامه ابتدا با انواع مهاربندهای همگرا آشنا می‌شویم، سپس پیکربندی‌های تازه از انواع مهاربندها را فرا می‌گیریم.

۱.۲ مهاربند همگرای ضربدری

رایج‌ترین نوع مهاربندهای همگرا، مهاربند همگرای ضربدری می‌باشد که در آن دو عضو به صورت قطری، گره‌های مقابل یک دهانه را به هم متصل می‌کنند. این نوع مهاربند دارای ظرفیت کششی بالا و ظرفیت فشاری کم می‌باشد. لازم به ذکر است مهاربند ضربدری بیشترین سختی را در بین انواع مهاربندهای همگرا داراست. این ویژگی موجب می‌شود تا با قرارگرفتن در معرض زلزله، نیروی بیشتری به این مهاربند نسبت به سایر مهاربندها اعمال شود، اما در مقابل در محدود نمودن تغییر شکل سازه موفق عمل می‌کند. شکل ظاهری مهاربندهای ضربدری باعث ایجاد محدودیت‌های معماری نظیر عدم امکان اجرای باز شو می‌گردد و یکی از مهم‌ترین معایب آن می‌باشد. در مهاربندهای ضربدری معمولاً یک قطر به صورت پیوسته و قطر دیگر به صورت منقطع اجرا می‌شود، درحالی‌که در مدل‌سازی هر دو عضو پیوسته مدل‌سازی می‌شوند. همچنین در مدل‌سازی اتصال مهاربندهای ضربدری مفصلی فرض می‌شود، درحالی‌که در اجرای جزئیات اتصالات ممکن است اندکی گیرداری پدید آمده باشد. در شکل زیر نمونه‌ای از مهاربندهای همگرای ضربدری قابل مشاهده است.



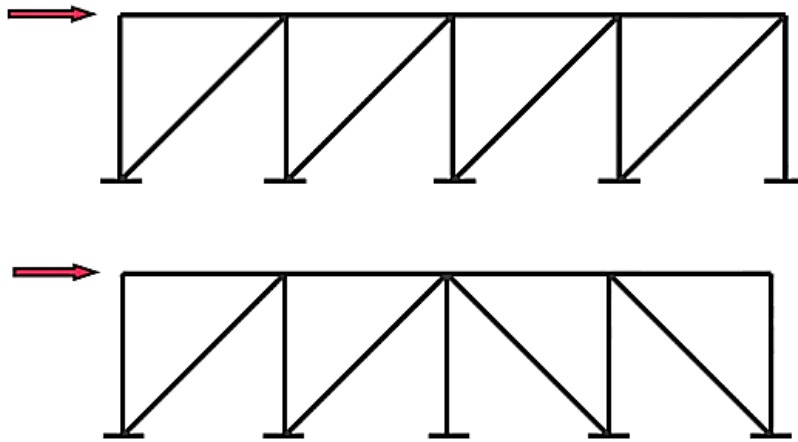
شکل ۲- مهاربند ضربدری

۲.۲ مهاربند همگرای قطری

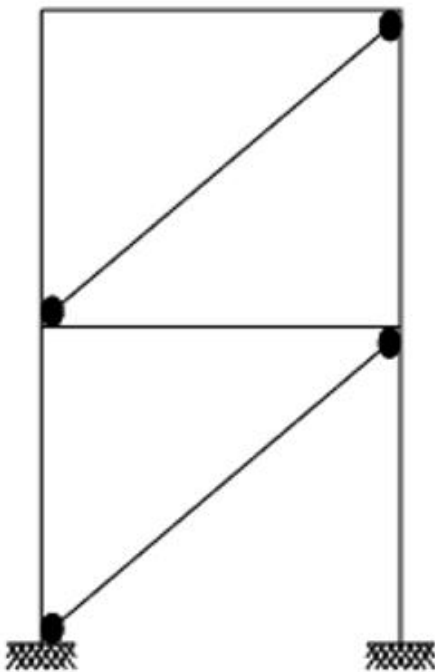
مهاربند قطری شباهت زیادی به مهاربند ضربدری دارد، با این تفاوت که در این مهاربندها فقط یک عضو قطری در دهانه وجود دارد. این عضو باید توانایی تحمل کشش و فشار را دارا باشد. در مهاربندهای قطری، بایستی در همان راستا و در دهانه دیگری مهاربند قطری دیگری در جهت برعکس تعبیه شود که اگر مهاربند اولی دچار کماتش شود، مهاربند دوم پاسخگوی بارهای جانبی باشد. این امر در شکل (۳) نشان داده شده است. با وارد شدن بار جانبی در حالت (الف)، همه مهاربندها در کشش یا فشار کار می‌کنند که این حالت صحیح نمی‌باشد. ولی حالت (ب) قابل اطمینان‌تر است، چراکه اعضاء مهاربندی در دو دهانه یک قاب به صورت معکوس استفاده شده‌اند تا با تغییر جهت نیروی جانبی یکی از مهاربندها به کشش و دیگری به فشار کار کند. به طور کلی مهاربند قطری را



تنها زمانی می‌توان در یک جهت به کار برد که از عدم کماتش عضو قطری اطمینان حاصل شود. در شکل (۴) یک مهاربند قطری اجرا شده نمایش داده شده است.



شکل ۳- جانمایی صحیح مهاربند قطری



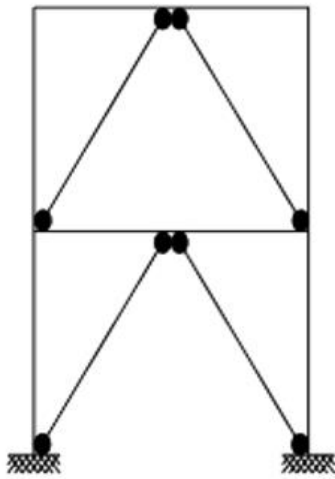
شکل ۴- مهاربند قطری

۲.۳ مهاربند همگرای شورون

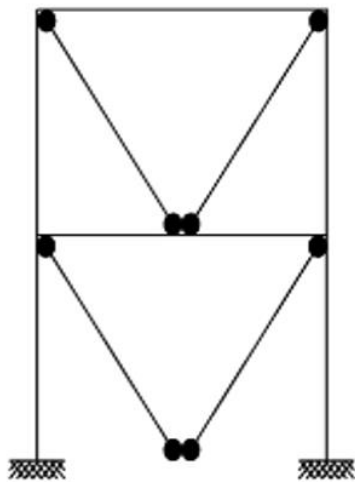
در مهاربندهای شورون دو عضو مهاربندی بر روی یک گره به تلاقی می‌رسند. اگر این گره روی تیر باشد، شورون هفتی و اگر زیر تیر باشد، شورون هشتی نامیده می‌شود. طراحان از این مهاربندها عمدتاً زمانی که شرایط خاصی از نظر معماری وجود دارد، استفاده می‌کنند؛ زیرا این نوع مهاربندها فضای مناسبی برای



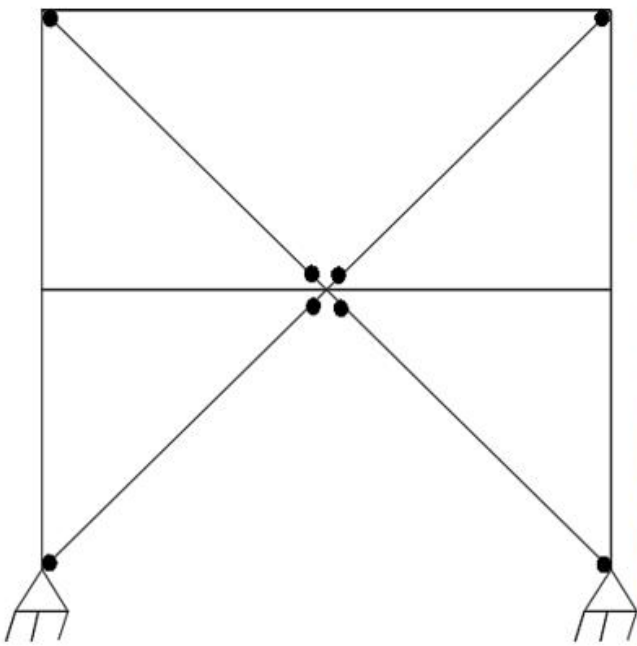
اجرای بازشوها و نورگیرها در اختیار طراحان قرار می دهند. مهاربند شورون هشتی بهترین گزینه از نظر پوشش محدودیت های معماری می باشد و محدودیت هایی نظیر عدم امکان تعبیه بازشو چسبیده به زمین (نظیر درب ورودی) که در مهاربند هفتی وجود دارد، در آن وجود ندارد. این دو مهاربند در مواردی در ترکیب با یکدیگر نیز به کار گرفته می شوند. مهاربندهای همگرای شورون در شکل های زیر مشخص شده اند.



شکل ۵- مهاربند شورون هشتی



شکل ۶- مهاربند شورون هفتی



شکل ۷- مهاربند شورون ترکیبی هفتی هشتی

۲.۴ مهاربند همگرای K شکل

در این نوع مهاربندها، اعضای قطری در یک طرف ستون قرار می‌گیرند و یکدیگر را در نقطه‌ای بر روی ستون مقابل قطع می‌کنند. مهاربندهای K شکل پتانسیل ایجاد مفصل پلاستیک در وسط ستون را بالا می‌برند و به همین دلیل نامناسب ترین سیستم مهاربندی تلقی می‌شوند. استفاده از دو مهاربند K شکل به طور قرینه در یک طبقه، پیکربندی جدیدی از آن را ارائه می‌دهد که به مهاربند لوزی شکل نیز معروف است (شکل ب-۸).

نکته: طبق بندهای ۱۰-۳-۴-۱-۴-۳-۱۰ و ۱۰-۳-۴-۲-۴-۳-۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، استفاده از مهاربندهای K شکل در سیستم‌های مهاربندی غیرمجاز می‌باشد.

۱۰-۳-۴-۱ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF)

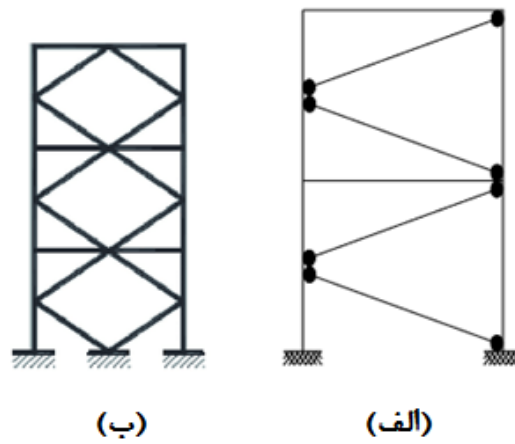
۱۰-۳-۴-۲ مهاربندهای به شکل K

در این نوع قاب‌های مهاربندی شده استفاده از مهاربندهای به شکل K مجاز نیست.

۱۰-۳-۴-۲ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF)

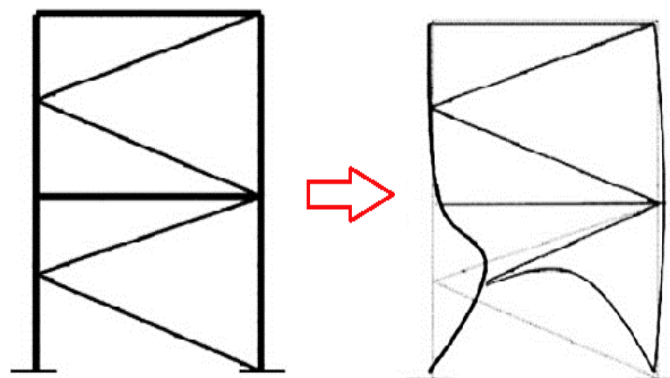
۱۰-۳-۴-۳ مهاربندهای به شکل K

در این نوع قاب‌های مهاربندی شده استفاده از مهاربندهای به شکل K مجاز نیست.



شکل ۸- (الف) مهاربند K شکل (ب) مهاربند لوزی شکل

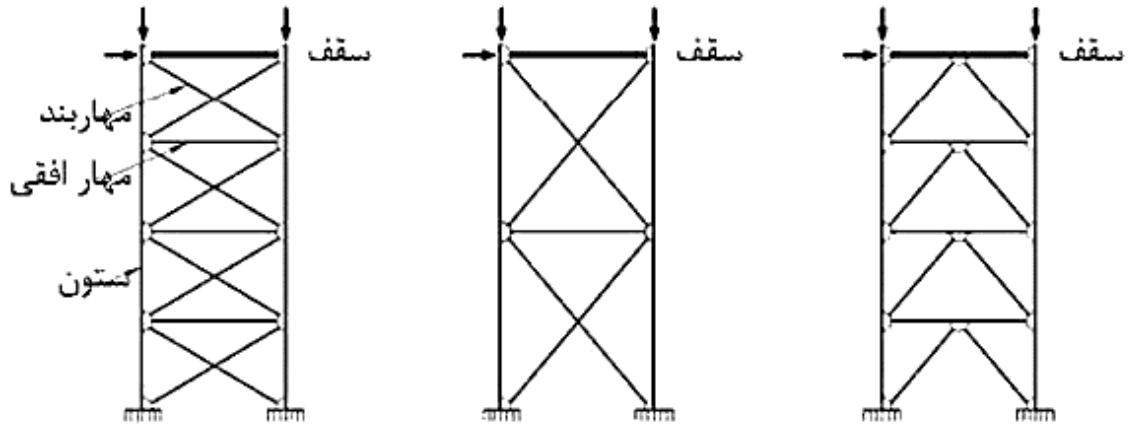
لازم به ذکر است در مهاربندهای K شکل چنانچه عضو فشاری دچار کماتش گردد، عضو کششی نیروی زیادی به ستون وارد می نماید و موجب تخریب آن می شود. این امر در شکل زیر نشان داده شده است.



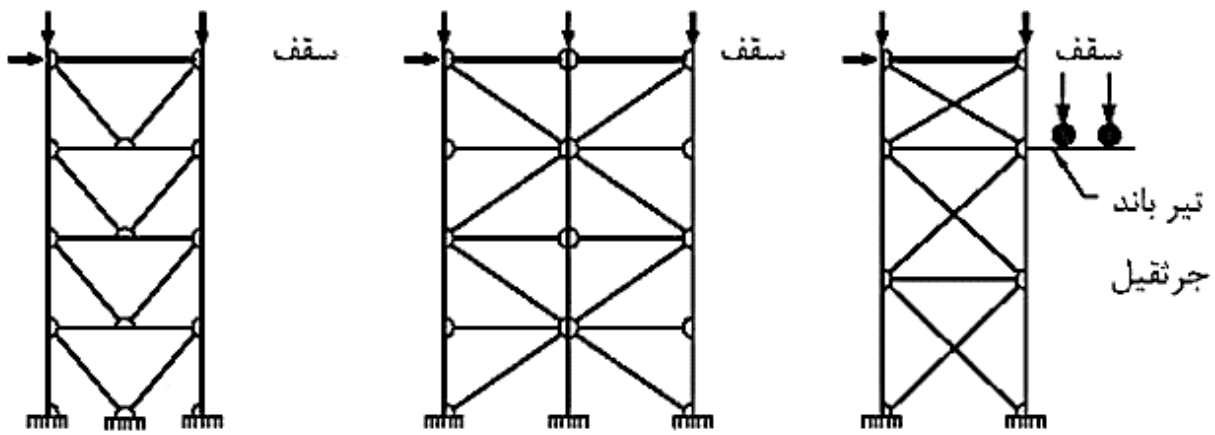
شکل ۹- عملکرد نامناسب مهاربند K شکل

۲.۵ مهاربندهای چند ردیفی

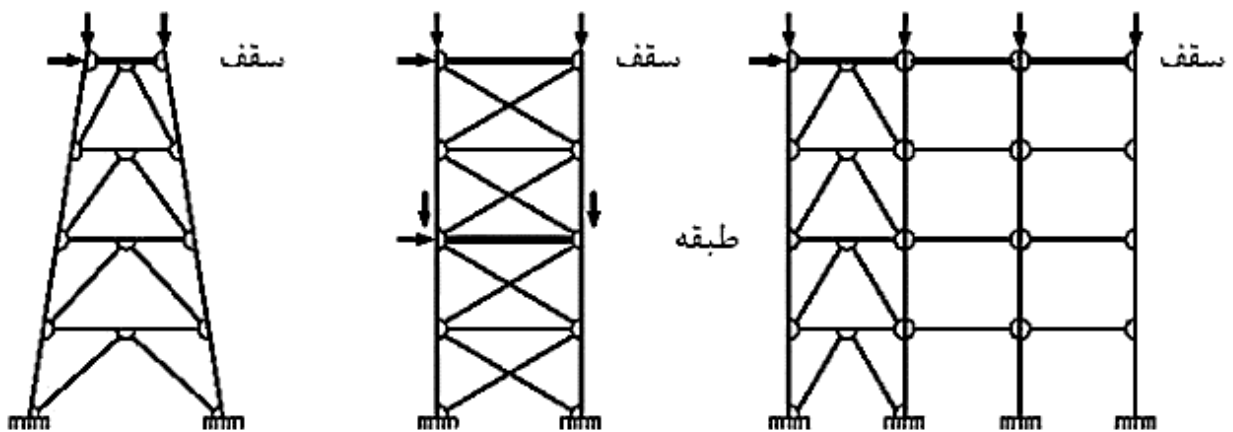
سیستم های مهاربندی چند ردیفی در یک یا چند طبقه، معمولاً به دلیل ارتفاع بالای طبقه و عدم امکان طراحی یک مهاربند در آن تراز مورد استفاده قرار می گیرند. به گونه ای که در حد فاصل دو تراز مجاور، از دو یا چند ردیف مهاربند استفاده می شود. این نوع سیستم در سازه های فولادی نظیر سوله ها با کاربری صنعتی با ورزشی کاربرد بیشتری دارند. لازم به ذکر است این نوع مهاربندها بایستی ضوابط لرزه ای مربوط به بندهای ۱۰-۳-۴-۱ و ۱۰-۳-۴-۲ و ۱۰-۳-۴-۳ و ۱۰-۳-۴-۴ از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان را ارضاء نمایند. از شرایط عمومی مورد نیاز، می توان به وجود اعضای افقی (struts) در تراز هر ردیف اشاره نمود. ستون ها بایستی در محل اتصال هر عضو افقی در برابر پیچش مهار شوند. همچنین، مهاربندها در هر ردیف بایستی به صورت جفت هایی در جهت مخالف مورد استفاده قرار گیرند. نمونه ای از انواع مهاربندهای چند ردیفی در شکل زیر نمایش داده شده است.



مهاربند چند ردیفی ضربدری مهاربند دو ردیفی ضربدری مهاربند چند ردیفی از نوع ۸



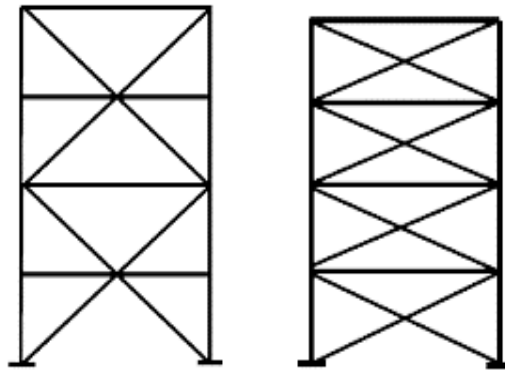
مهاربند چند ردیفی از نوع ۷ مهاربند چند ردیفی دو دهانه مهاربند چند ردیفی ضربدری



مهاربند چند ردیفی هرمی مهاربند چند ردیفی دو طبقه مهاربند چند ردیفی همراه با ستون های ثقیلی

شکل ۱۰- پیکربندی های متداول مهاربندهای چند ردیفی

توجه: مهاربندهای همگرا می توانند در دو یا چند دهانه به کار گرفته شوند. یکی از این متداول ترین نوع این سیستم ها، مهاربند ضربدری دو دهانه است که به آن ترکیب مهاربند هفتی و هشتی نیز گفته می شود. این نوع مهاربند در مقایسه با مهاربند ضربدری در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

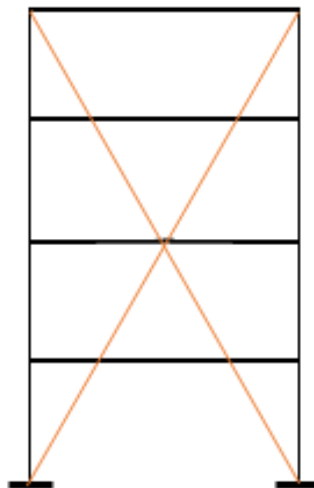


مهاربند ضریبری-دو دهانه مهاربند ضریبری

شکل ۱۱- نمونه‌ای از مهاربند دو دهانه

۲.۶ آبر مهاربندها

در صورت به کارگیری مهاربندها در چند دهانه موضوع ابرمهاربندها (Mega braces) مطرح می‌گردد. ابرمهاربندها با ترکیب سیستم‌های سنتی مهاربندی موجب می‌شوند که تمام سازه مانند یک چشمه مهاربندی شده عمل نماید و اغلب در سازه‌های بلندمرتبه کاربرد دارند. این سیستم با چیدمان خاصی موجب صرفه‌جویی در مصالح و هزینه‌های ساخت می‌شود و از طرفی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را نیز به خوبی کاهش می‌دهد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمونه‌ای از پیکربندی آبر مهاربندها

۲.۷ مهاربند دروازه‌ای

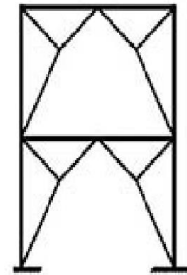
همانطور که اشاره شد، مهاربندهای همگرا اغلب با مشکلات معماری از جمله نبود فضای کافی برای ایجاد بازشو مواجه هستند. بنابراین نوع جدیدی از مهاربندهای همگرا تحت عنوان مهاربند دروازه‌ای معرفی می‌گردد که از نظر هندسی مشابه مهاربندهای همگرای شورون هفت و هشتی می‌باشد، اما اعضای آن مستقیم نیستند و با شکستگی‌هایی به هم متصل می‌شوند. محل شکستگی به وجود آمده بین دو عضو توسط عضو سومی به محل اتصال تیر و ستون



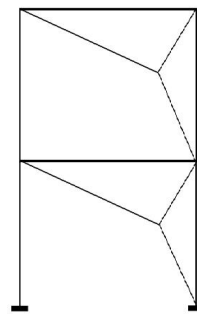
متصل می شود. مهاربند دروازه‌ای به نام‌های دیگری نظیر مهاربند پرده‌ای، مهاربند چند ضلعی، مهاربند Y شکل و مهاربند خیمه‌ای نیز شناخته می شود. اگر این مهاربند از ۶ عضو تشکیل شده باشد، به آن مهاربند دروازه‌ای دو لنگه نیز می گویند. چنانچه این مهاربند از ۳ عضو تشکیل شده باشد به آن مهاربند دروازه‌ای تک لنگه یا Y شکل می گویند که در شکل (۱۳) هر دو نوع مهاربند دروازه‌ای تک لنگه و دو لنگه نشان داده شده‌اند.



(الف)

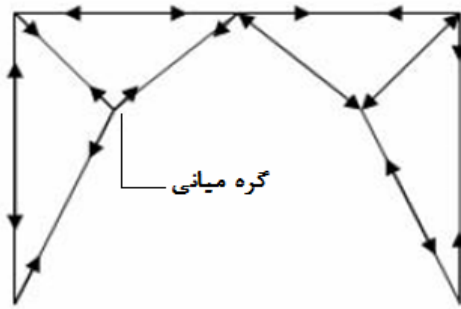


(ب)



شکل ۱۳- مهاربند دروازه‌ای (الف) دو لنگه (ب) تک لنگه

اجرای صحیح مهاربندهای دروازه‌ای به دلیل عدم وجود ضوابط دقیق آیین‌نامه‌ای بسیار اهمیت دارد. هم‌چنین تأثیر پارامترهای مختلف مانند مشخصات اعضای مهاربند، ضریب رفتار و شکل‌پذیری بایستی به دقت بررسی شوند. این مهاربندها سختی و شکل‌پذیری را در حد معمول تأمین می‌نمایند. لازم به ذکر است در زلزله‌های شدید عضو مایل شکل‌پذیری لازم را فراهم می‌کند. اغلب اتصالات اعضای مهاربندی به قاب و به یکدیگر مفصلی در نظر گرفته می‌شوند، اما مفصلی بودن اتصال اعضای مهاربندی به یکدیگر در گره میانی باعث ناپداری هندسی مهاربند دروازه‌ای در جهت عمود بر صفحه خواهد شد. به بیان دیگر در زلزله‌های شدید، سه عضو متصل به گره میانی در یک طرف به صورت کششی و در طرف دیگر به صورت فشاری عمل می‌کنند. فشاری بودن سه عضو باعث خروج گره میانی از صفحه می‌گردد، بنابراین اتصالات در این نقطه بایستی صلب باشد. موقعیت گره میانی، اعضاء کششی و فشاری در شکل زیر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۴- گره میانی و عملکرد اعضای مهاربند دروازه‌ای

در مهاربند دروازه‌ای، فضایی که برای باز شو در نظر گرفته می‌شود ارتباط مستقیمی با محل گره‌های میانی دارد. طبق تحقیقات صورت گرفته هرچه گره میانی به گوشه قاب نزدیک‌تر باشد، سختی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار کاهش می‌یابد ولی در عوض امکان ایجاد بازشوه‌های بزرگ فراهم می‌شود.

استفاده از مهاربند دروازه‌ای در آیین نامه‌ای ممنوع نشده است، اما تا حد امکان بهتر است از استفاده از آن اجتناب نمود. یکی از دلایل مفصلی نبودن گره میانی این است که موجب حرکت خارج از صفحه و ناپایداری می‌گردد. حتی اگر بتوان برای این اتصال با در نظر گرفتن اتصال پیوسته برای حداقل دو عضو از سه عضو، صلیبیت ایجاد نمود، بازهم توجیه اقتصادی نخواهد داشت؛ زیرا که گیرداری اتصال موجب ایجاد لنگرهایی در اعضای مهاربندی خواهد شد و بایستی از مقاطع بزرگتری برای اعضای استفاده نمود، در نتیجه طراحی آن غیراقتصادی خواهد بود. یکی دیگر از دلایل اجتناب از استفاده از این مهاربند، نزدیک بودن گره میانی به گوشه قاب است؛ چراکه طراحان زمانی که نیاز به استفاده از بازشوه‌های بزرگ باشد از این نوع مهاربند استفاده می‌کنند و تا حد امکان سعی می‌کنند گره‌های میانی به گوشه قاب نزدیک‌تر شود ولی این امر موجب کاهش سختی و شکل‌پذیری می‌گردد.

۲.۸ مزایا و معایب مهاربندهای همگرا

مهاربندهای همگرا نیز مانند هر المان مؤثر در رفتار سازه دارای مزایا و معایبی هستند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند:

مزایای مهاربندهای همگرا

- ✓ سختی بالای سیستم
- ✓ کنترل شدن تغییر مکان جانبی سازه تا حد زیاد به دلیل سختی زیاد سیستم مهاربندی
- ✓ طراحی به نسبت ساده و عدم نیاز به نیروی تخصصی جهت اجرا آن
- ✓ آسیب کمتر به اجزای غیرسازه‌ای به دلیل دریافت پایین طبقات
- ✓ اقتصادی بودن این سیستم نسبت به سیستم قاب خمشی و قاب مهاربندی شده واگرا

در [طراحی اسکلت فولادی با نرم‌افزار ایتبس](#) یکی از کنترل‌های آیین‌نامه‌ای، [کنترل دررفت](#) مجاز طبقات است. برای سازه های متعارف با قاب‌های مهاربندی شده، به دلیل سختی بالای مهاربندها اکثر مواقع یا شاید به جرات بتوان گفت اصلاً نیازی به کنترل دررفت طبقات نیست. برخلاف قاب‌های مهاربندی شده، این کنترل در مورد قاب‌های خمشی، به دلیل سختی به نسبت کمتر، حتماً باید چک شود. همانطور که اشاره شد، سیستم‌های مهاربندی از سختی بالایی برخوردار می‌باشند که این ویژگی یکی از مهم‌ترین نقاط قوت آن محسوب می‌شود. اما از طرفی سختی بالا موجب کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه کاهش جذب و استهلاک انرژی زلزله می‌گردد.

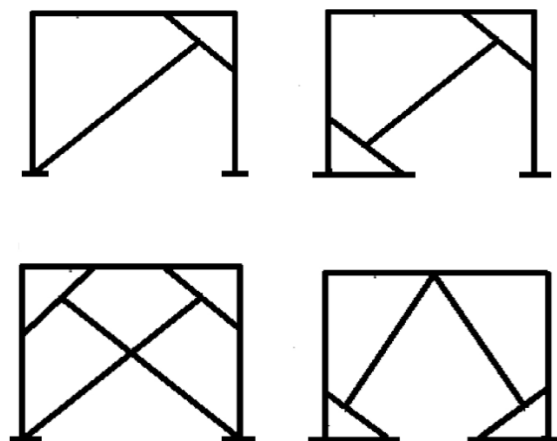
معایب مهاربندهای همگرا

- × ایجاد محدودیت از نظر معماری برای ایجاد بازشوهای مانند تعبیه درب و پنجره به ویژه در مهاربندهای نوع ضربدری و قطری (این محدودیت در مورد مهاربندهای شورون هفتی و هشتی تقریباً مرتفع شده است)
- × کاهش شکل پذیری نسبت به قاب خمشی و قاب مهاربندی شده واگرا
- × قابلیت جذب و استهلاک کمتر انرژی زلزله نسبت به قاب مهاربندی شده واگرا
- × احتمال کماتش مهاربند و تأثیر آن بر روی نازک کاری

به منظور بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا، سیستم‌های نوینی نظیر مهاربند زانویی و مهاربند کمانش ناپذیر پدید آمده‌اند که به اختصار به معرفی هریک می‌پردازیم.

۹.۲ مهاربند زانویی (KBF)

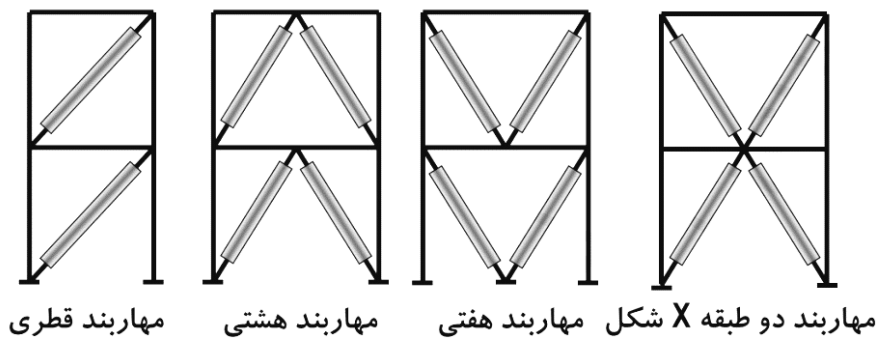
مهاربندهای زانویی سیستم نوین مهاربندی می‌باشند که به منظور پوشش نواقص دیگر مهاربندها پیشنهاد شده‌اند و تاکنون وارد آیین‌نامه‌ها نشده‌اند. این سیستم مشابه مهاربند همگرای قطری می‌باشد، با این تفاوت که علاوه بر عضو قطری، از یک عضو زانویی نیز تشکیل شده‌است. دو سر عضو زانویی به تیر و ستون متصل بوده و از نقطه دیگری (معمولاً وسط عضو) به عضو قطری متصل می‌شود. باتوجه به سختی قابل توجه عضو قطری، تأمین شکل‌پذیری لازم بر عهده عضو زانویی می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های مهاربند زانویی قابل تعمیر بودن آن است، به طوری‌که با قرار گرفتن سازه تحت تحریک زلزله عضو قطری و قاب سازه در حالت الاستیک باقی مانده و عضو زانویی دچار خرابی می‌شود؛ زیرا مفصل پلاستیک در عضو زانویی تشکیل می‌شود. بنابراین می‌توان این عضو را پس از اتمام زلزله تعمیر و یا جایگزین کرده و در هزینه‌های مربوط صرفه‌جویی نمود. سیستم مهاربندی زانویی نسبت به سایر سیستم‌های مهاربندی، خسارات وارده به اعضا غیرسازه‌ای را به حداقل می‌رساند. در زلزله‌های کوچک، تنها عضو قطری با تأمین سختی لازم به مقابله با ارتعاش می‌پردازد و در زلزله‌های بزرگ عضو زانویی با تأمین شکل‌پذیری مناسب وارد عمل می‌شود. نمونه‌ای از مهاربندهای زانویی در شکل (۱۵) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۵- نمونه‌هایی از بیکربندی مهاربندهای زانویی

۲. ۱۰ مه‌اربندهای کمانش ناپذیر (BRB)

مه‌اربندهای کمانش ناپذیر به منظور بهبود عملکرد مه‌اربندهای همگرا پدید آمدند و متشکل از یک هسته فولادی به همراه غلاف هستند که غلاف از کمانش هسته فولادی در فشار ممانعت می‌کند. بنابراین در این مه‌اربندها اعضاء مه‌اربندی هم در فشار و هم در کشش مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند و این امر شکل‌پذیری قاب در مقابل زلزله را افزایش می‌دهد و عملکرد مه‌اربند را ارتقاء می‌بخشد. ملات یا بتن دور هسته فولادی مانند قیدی برای مه‌اربند عمل کرده و با کاهش لاغری مه‌اربند از کمانش فشاری آن نیز جلوگیری می‌کند. استفاده از مه‌اربند کمانش ناپذیر برای انواع مه‌اربندهای همگرایی که در آیین‌نامه مجاز اعلام شده‌اند (به جز مه‌اربند همگرای ضربدری) قابل اجرا می‌باشد. این نوع مه‌اربندها به دلیل دارا بودن سختی قاب‌های مه‌اربندی همگرا و شکل‌پذیری بالا گزینه مناسبی برای اجرا در سازه‌ها می‌باشند.



شکل ۱۶ - پیکربندی مه‌اربند کمانش ناپذیر



شکل ۱۷ - نمونه اجرا شده مه‌اربند کمانش ناپذیر

ضوابط مربوط به مه‌اربندهای کمانش ناپذیر در بند ۱۰-۳-۴-۴ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان اضافه شده‌است.



۱۰-۳-۴-۴ الزامات لرزه‌ای مهاربندهای کمانش تاب (BRBF)

۱۰-۳-۴-۴-۱ الزامات عمومی

قاب‌های مهاربندی شده با مهاربندهای کمانش تاب (BRBF) به قاب‌هایی گفته می‌شوند که از آن‌ها انتظار تغییر شکل‌های فرار ارتجاعی قابل ملاحظه‌ای از طریق تسلیم هسته فولادی در کشش و فشار تحت اثر نیروی جانبی ناشی از زلزله طرح می‌رود. این نوع قاب‌ها متشکل از اعضای مهاربندی کمانش تاب هستند که به صورت همگرا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع قاب‌ها، فقط پیکربندی‌های قطری و به شکل ۷ یا ۸ مجاز هستند.

۲.۱۱ تفاوت مهاربندهای ویژه و معمولی

به طور کلی وقتی حرف از ویژه و معمولی پیش می‌آید آیین نامه ۲۸۰۰ ضریبی را برای محاسبه‌ی نیروی زلزله به عنوان ضریب رفتار (Ru) در نظر می‌گیرد (جدول ۳-۴ آیین نامه ۲۸۰۰) که این ضریب تابع نوع سیستم باربر جانبی سازه است. در سیستم‌های از نوع ویژه این ضریب مقدار بزرگ‌تری نسبت به سیستم‌های نوع معمولی دارد و این باعث می‌شود نیروی زلزله‌ی وارد بر سازه $\left(\frac{ABI}{Ru}\right)$ در سیستم‌های ویژه، نسبت به سیستم‌های معمولی کمتر شود. در نتیجه می‌توان گفت که در سیستم‌های ویژه یک قاب سبک‌تر و شکل پذیرتر نسبت به سیستم معمولی خواهیم داشت که رفتار انعطاف پذیرتری از خود در زلزله نشان می‌دهد. همچنین می‌توان استنباط کرد که در سیستم‌های ویژه، ما رفتار فرار ارتجاعی (خارج از ناحیه الاستیک) بیشتری از اعضا انتظار داریم، در صورتی که در سیستم‌های معمولی مهاربندی‌ها در ناحیه الاستیک باقی می‌مانند. این بدان معناست که در سیستم مهاربندی ویژه ما به اعضای مهاربندی اجازه می‌دهیم وارد ناحیه پلاستیک شوند. در واقع در سیستم‌های همگرای ویژه، مهاربندها باید نقش یک عضو شکل پذیر را داشته باشند و مثل یک فیوز عمل کنند تا سایر اعضای قاب مهاربندی یعنی تیرها و ستون‌ها در ناحیه الاستیک باقی بمانند. به همین علت سیستم‌های ویژه استهلاک انرژی بیشتری نسبت به سیستم‌های معمولی دارند. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در این مورد به صورت زیر توضیح داده است.



۱-۳-۴-۱ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF)

۱-۳-۴-۱-۱ الزامات عمومی

قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF) به قاب‌هایی گفته می‌شوند که از آن‌ها انتظار تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی محدودی، بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت اعضا و اتصالات آن‌ها، تحت اثر زلزله طرح می‌رود. پیکربندی مهاربندهای مجاز در این نوع قاب‌ها شامل مهاربندهای قطری، ضربدری، مهاربندهای به شکل ۷ یا ۸ و مهاربندهای چند ردیفی در یک طبقه می‌شوند.

۱-۳-۴-۲ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF)

۱-۳-۴-۲-۱ الزامات عمومی

قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF) به قاب‌هایی گفته می‌شوند که در آن‌ها از مهاربندها انتظار می‌رود تحت اثر بار جانبی زلزله طرح تغییرشکل‌های فرا ارتجاعی قابل ملاحظه‌ای تحمل کنند و در آن‌ها کاهش مقاومت چندانی رخ ندهد. رفتار فرا ارتجاعی موردنظر ممکن است به مرحله بعد از کمانش مهاربند توسعه یابد. از این رو پیکربندی و طراحی مهاربندها و اتصالات آن باید چنان باشد که از عهده این تغییرشکل‌ها برآیند. پیکربندی مهاربندهای مجاز در این نوع قاب‌ها شامل مهاربندهای قطری، ضربدری، مهاربندهای به شکل ۷ یا ۸ و مهاربندهای چند ردیفی در یک طبقه می‌باشند.

۲.۲ مهاربندهای همگرای ویژه مختلط

در این نوع قاب‌ها از مقاطع مختلط استفاده می‌شود و محاسبه مقاومت‌های مورد نیاز برای کشش و فشار براساس مشخصات مقاطع مختلط انجام می‌گیرد.

۱-۳-۴-۱-۶ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای مختلط ویژه (C-SCBF)

۱-۳-۴-۱-۶-۱ الزامات عمومی

قاب‌های مهاربندی شده همگرای مختلط ویژه (C-SCBF) باید براساس الزامات این بخش طراحی شوند. در این نوع قاب‌ها، ستون‌ها باید دارای مقطع مختلط محاط در بتن یا پرشده با بتن، تیرها به صورت فولادی یا مختلط و اعضای مهاربندی به صورت فولادی یا مختلط پرشده با بتن در نظر گرفته شوند.



۳ محدودیت خروج از مرکزیت از دید مبحث دهم مقررات ملی ساختمان

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان خروج از مرکزیت تا کمتر از ارتفاع تیر را مشروط به شرایطی مجاز اعلام کرده است. برای قاب‌های مهاربندی شده همگرا معمولی و ویژه به ترتیب داریم:

۱-۳-۴-۱۰ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای معمولی (OCBF)

۱-۳-۴-۱۰ مبانی طراحی

در طراحی اعضا و اتصالات قاب‌های دارای دهانه‌های مهاربندی علاوه بر الزامات متعارف فصل‌های ۱-۱۰ و ۲-۱۰ و نیز الزامات لرزه‌ای بخش ۲-۳-۱۰ باید الزامات لرزه‌ای این بخش نیز رعایت شود. در این گونه قاب‌های مهاربندی شده، خروج از مرکزیت کمتر از عمق تیر مجاز است مشروط بر اینکه در طراحی اعضا لنگرهای ناشی از خروج از مرکزیت، براساس ترکیبات بارگذاری زلزله تشدید یافته $(\Omega_0 E)$ در نظر گرفته شوند.

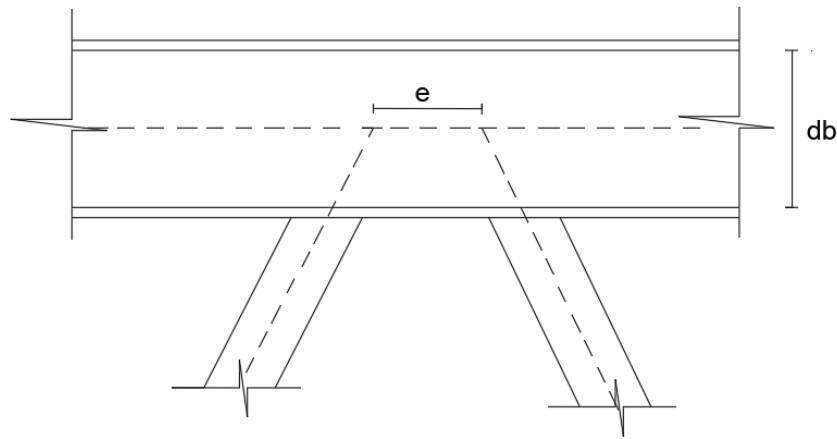
۲-۳-۴-۱۰ الزامات لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه (SCBF)

۲-۳-۴-۱۰ مبانی طراحی

در طراحی اعضا و اتصالات قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه علاوه بر الزامات متعارف فصل‌های ۱-۱۰ و ۲-۱۰ و نیز الزامات لرزه‌ای عمومی بخش ۲-۳-۱۰ باید الزامات لرزه‌ای این بخش نیز رعایت شود. در این گونه مهاربندها خروج از مرکزیت کمتر از عمق تیر مجاز است مشروط بر اینکه برآیند نیروهای اعضا و اتصالات در طراحی لحاظ شوند و منبع مورد انتظار ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک تغییر نکند.

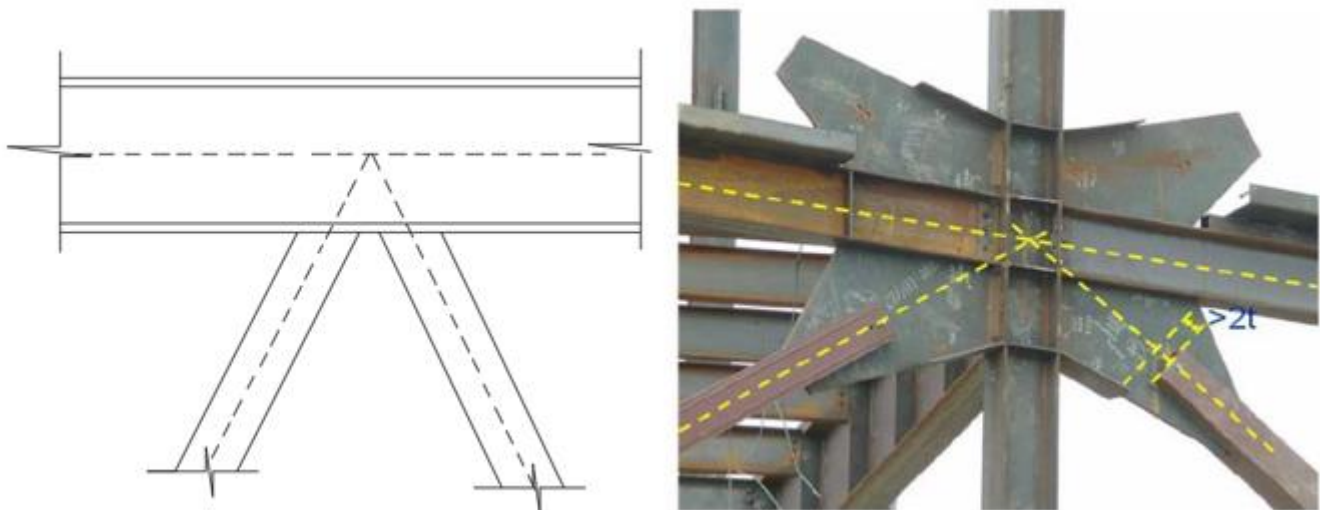
برای قاب‌های مهاربندی شده کم‌انحراف ناپذیر و همگرای مختلط نیز طبق بندهای ۲-۳-۴-۱۰ و ۲-۳-۴-۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان خروج از مرکزیت کمتر از عمق تیر مجاز اعلام شده است. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در ویرایش قبلی در رابطه با محدودیت خروج از مرکزیت که سبب تبدیل مهاربند واگرا به همگرا (شورون هفتی و هشتی) می‌شود، اینگونه توضیح داده است:

پ) مهاربندی‌های به شکل ۷ و ۸ ای که در محل اتصال به تیر دارای خروج از مرکزیت کمتر از ارتفاع تیر هستند، به عنوان مهاربندی‌های همگرا محسوب می‌شوند و می‌توانند بر اساس الزامات این بخش طراحی شوند.

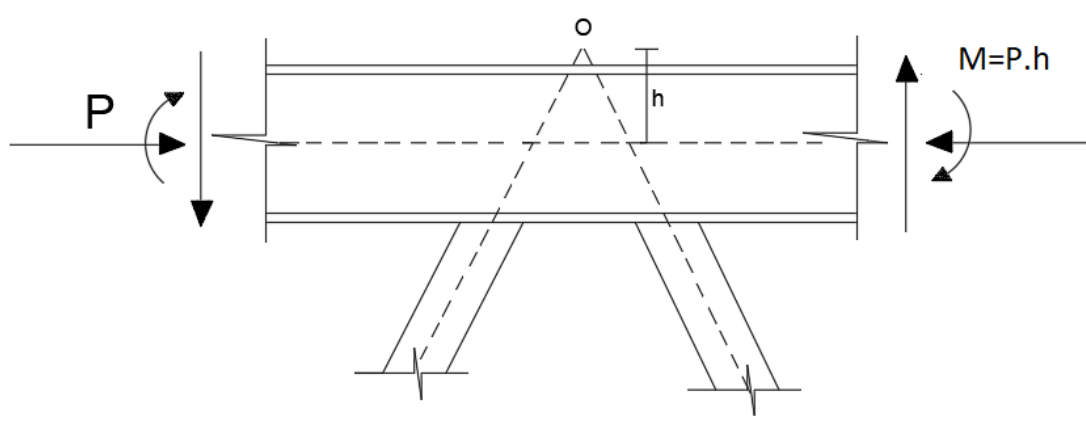


شکل ۱۸- برون مرکزی مجاز مهاربندی همگرا

در واقع اگر در شکل فوق $e < db$ باشد، مهاربند از نوع شورون هشتی است و باید الزامات آیین‌نامه‌ای مربوط به شورون ۸ برای آن رعایت شود. در مورد مهاربندهای همگرا باید به این نکته دقت شود که محل تلاقی محورهای اعضای مورب آن‌ها باید روی محور میانی جان تیر متصل به مهاربند قرار گیرد (شکل ۱۹) که البته همان‌طور که در بند فوق هم گفته شد، آیین‌نامه برای خروج از مرکزیت حداقلی را در نظر گرفته و به‌نوعی برای عدم تلاقی محورهای مهاربند با محور میانی تیر، تخفیف قائل شده است ولی تا حد امکان در اجرای مهاربندها باید دقت کافی به خرج داد تا محل تلاقی محورهای مهاربندی‌ها روی محور میانی تیر بیفتد؛ زیرا در غیر این صورت مطابق شکل (۲۰)، محل تلاقی خارج از محور تیر قرار گرفته و این باعث ایجاد یک نیروی لنگر اضافی Pxh ناشی از نیروی محوری تیر می‌شود و لنگر خمشی مازادی را به سازه تحمیل می‌کند.



شکل ۱۹- نحوه صحیح اجرای مهاربند همگرا

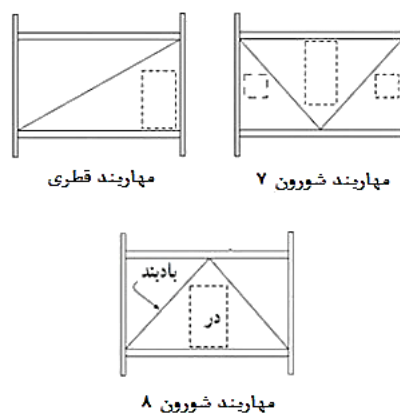


شکل ۲۰- محل تلاقی محورمیانی مهاربندها خارج از محور میانی تیر

۴ مقایسه مهاربندهای همگرا از لحاظ سختی، شکل پذیری و ایجاد بازشو

همانطور که اشاره شد، استفاده از مهاربندهای k شکل طبق آیین نامه مجاز نمی باشد و مهاربندهای دروازه ای نیز به دلیل ناپایداری خارج از صفحه و غیراقتصادی بودن پیشنهاد نمی شود، مگر اینکه در سازه های کوتاه مرتبه و با رعایت تمهیدات خاص استفاده شود. معمولاً در سازه های بلند مرتبه، آبر مهاربندها و مهاربندهای چند ردیفی مورد استفاده قرار می گیرند که هم اقتصادی بوده و هم کارایی مطلوبی دارند. حال به مقایسه مهاربندهای همگرای ضربدری، قطری و شورون که در سازه های فولادی به طور متداول استفاده می شوند، می پردازیم.

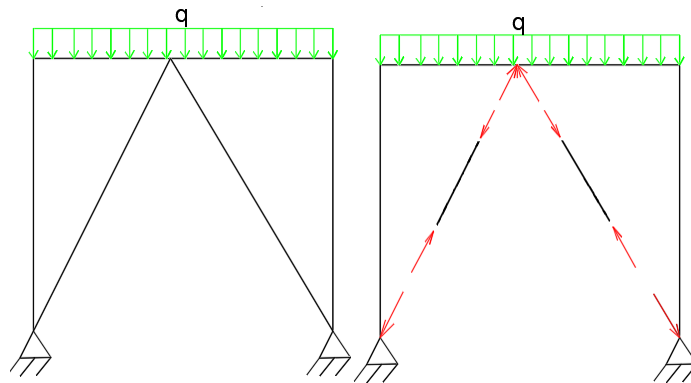
مهاربند همگرای ضربدری بیشترین سختی و کمترین شکل پذیری را در میان مهاربندهای همگرا دارا می باشد و معمولاً عملکرد بهتری نسبت به مهاربند قطری داراست؛ زیرا در مهاربند قطری یک عضو بایستی به تنهایی توانایی تحمل بارهای لرزه ای را به صورت فشاری و کششی دارا باشد که این امر مستلزم استفاده از سطح مقطع بالاتری می باشد و یا عضو قطری به صورت قرینه در دهانه کناری نیز مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش بار بحرانی و کاهش طول آزاد مهاربند، افزایش مقاومت زیادی در مهاربندهای ضربدری نسبت به مهاربندهای قطری اتفاق می افتد؛ زیرا کمانش مهاربند در اثر نیروی فشاری با طول مهاربند ارتباط دارد. از نظر ایجاد بازشو، مهاربندهای شورون با توجه به شکل هندسی خود در اولویت قرار می گیرند و مهاربندهای قطری نیز فضای آزاد بیشتری را نسبت به مهاربندهای ضربدری دارا هستند (شکل ۲۱). چنانچه شرایط معماری خاصی وجود نداشته باشد، مهاربندهای ضربدری متداول ترین نوع مهاربند در اجرا می باشند؛ زیرا سختی زیادی برای سازه فراهم می کنند.



شکل ۲۱- مقایسه مهاربندهای همگرا از نظر ایجاد بازشو

۵ مقایسه مهاربندهای همگرا از نظر کمانش و ایجاد مفصل پلاستیک

در قاب‌های مهاربندی همگرا که به ظرفیت نهایی خود رسیده باشند، تسلیم در کشش یا کمانش در فشار اتفاق می‌افتد. ایجاد کمانش در عضو فشاری موجب افت مقاومت و خرابی می‌گردد. کمانش ممکن است به صورت داخل صفحه یا خارج از صفحه صورت بگیرد. چنانچه مقطع مهاربند قوطی شکل یا دایره‌ای باشد، معمولاً کمانش خارج از صفحه صورت گرفته و مفصل پلاستیک در خود مهاربند تشکیل می‌شود. در مهاربندهای ضربدری ایجاد اتکای جانبی توسط عضو کششی در وسط عضو صفحه صورت گرفته و مفصل پلاستیک در وسط مهاربند را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ همچنین نیروی نامتوازن کننده در روی تیر به شکل نیروی محوری بزرگی ظاهر می‌گردد. برای مهاربندهای قطری در طول کمانشی بیشتری تغییر شکل‌های جانبی در آن ایجاد شده و در نتیجه کمانش موضعی کمتری را متحمل می‌شوند. با بررسی دقیق‌تر مهاربندهای شورون ۷ و ۸ می‌توان به این نتیجه رسید که شورون ۷ در مقایسه با شورون ۸ یک مزیت مهم دارد؛ در این مهاربندها تحت بارهای ثقلی، نیروی کششی ایجاد می‌شود، در نتیجه وقوع پدیده کمانش برای این مهاربندها هنگام زلزله به تعویق می‌افتد. در صورتی که در مهاربند شورون ۸ تحت اثر بارهای ثقلی نیروی فشاری در مهاربند ایجاد می‌شود که وقوع پدیده کمانش را جلو می‌اندازد.

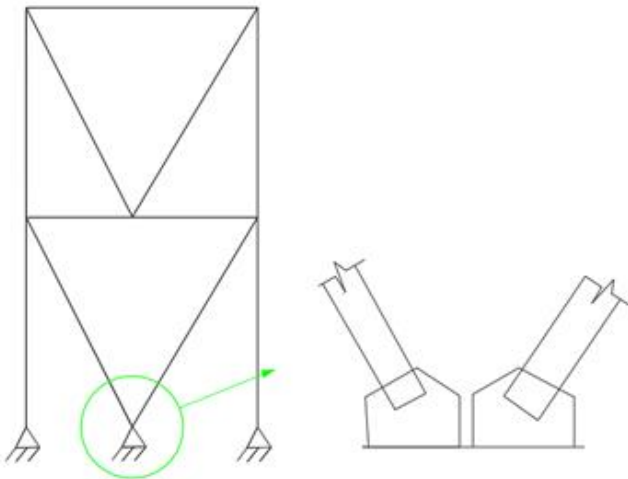


شکل ۲۲- به فشار افتادن مهاربند شورون ۸ تحت اثر بار ثقلی و جلوگیری از کمانش هنگام زلزله

۶ مقایسه مهاربندهای شورون از لحاظ معماری و مشکلات اجرایی

از بین مهاربندهای همگرا، مهاربندهای شورون ۷ و ۸ به علت ایجاد امکان تعبیه بازشوهای نظیر در و پنجره، بیشتر مورد توجه معماران قرار دارند، اما این انتخاب کار مهندس محاسب و سازه و حتی مجری را سخت می‌کند؛ زیرا مهاربندهای شورون ۷ و ۸ به دلیل اتصال به تیر و رفتار متفاوتی که نسبت به مهاربندهای ضربدری و قطری دارند، رعایت ضوابط آیین‌نامه‌ای سخت‌گیرانه و البته محتاطانه‌ای را می‌طلبند.

مقایسه‌ی مهاربندهای شورون ۷ و ۸ نشان می‌دهد که از لحاظ ایجاد بازشو، مهاربند شورون ۷ فضای بیشتری نسبت به شورون ۸ دارد. از لحاظ اتصال به فونداسیون، مهاربند شورون ۸ در پایین‌ترین طبقه نیاز به اتصال مهاربند به فونداسیون ندارد، این در حالی است که شورون ۷ باید به فونداسیون متصل شود. در نتیجه اجرای شورون ۸ اندکی ساده‌تر است و همچنین شورون ۷ در طبقه اول از لحاظ معماری محدودیت ایجاد می‌کند (مثل عدم امکان عبور خودرو) که برای حل این مشکل می‌توان در تمام طبقات از شورون ۷ استفاده کرد و تنها در پایین‌ترین طبقه از شورون ۸ استفاده می‌شود. از لحاظ طراحی ستون‌ها، ستون‌ها در شورون ۸ کمی سبک‌تر از شورون ۷ می‌باشند؛ چراکه در شورون ۷ ستون‌های آخرین طبقه نیروی زلزله را از مهاربندها دریافت می‌کنند ولی در شورون ۸ نیروی زلزله به ستون‌های یک طبقه پایین‌تر انتقال پیدا می‌کند.



شکل ۲۳- محدودیت‌های مهاربند شورون هفتی و هشتی

۷ مقایسه ضریب رفتار قاب‌های مهاربندی

ضریب رفتار سازه در تحلیل‌های خطی به منظور محاسبه نیروی زلزله به کار می‌رود و با R_{II} نمایش داده می‌شود. این پارامتر میزان شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در ناحیه غیرخطی را تعیین می‌کند. آیین‌نامه ۲۸۰۰ به معرفی ضریب رفتار ساز پرداخته و آن را برای سیستم‌های مختلف سازه‌ای ارائه کرده است.

با توجه به اینکه در سیستم‌های مهاربند ویژه رفتار سازه شکل‌پذیرتر است، ضریب رفتار آن نیز بزرگتر خواهد بود. سیستم مهاربندی واگرای ویژه نیز به دلیل توانایی بالا در استهلاک انرژی و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به سیستم‌های مهاربندی همگرا ضریب رفتار بزرگتری دارد؛ در مقابل از سختی کمتری برخوردار می‌باشد. مهاربند‌های کمانش‌تاب یا کمانش‌ناپذیر به دلیل ممانعت از کمانش اعضای مهاربندی فشاری، مقاومت بالایی در کشش و فشار از خود نشان می‌دهند و شکل‌پذیری بالایی دارند در نتیجه ضریب رفتار بالایی نسبت به سیستم همگرا دارد.

۳-۳-۵ ضریب رفتار ساختمان، R_{II}

۳-۳-۱ ضریب رفتار ساختمان در برگیرنده خصوصیات ماند شکل‌پذیری، نامعینی و اضافه مقاومت موجود در سازه ساختمان است. این ضریب با توجه به نوع سیستم باربر ساختمان و تمهیداتی که برای شکل‌پذیر کردن آن به‌کاربرده شده است، با رعایت محدودیت‌های بندهای (۳-۳-۲) تا (۳-۳-۵-۷)، از جدول (۳-۴) تعیین می‌گردد.

۷	۵- مهاربندی واگرای ویژه فولادی [۲] و [۳]
۷	۶- مهاربندی کمانش‌تاب
۳/۵	۷- مهاربندی همگرای معمولی فولادی
۵/۵	۸- مهاربندی همگرای ویژه فولادی [۲]

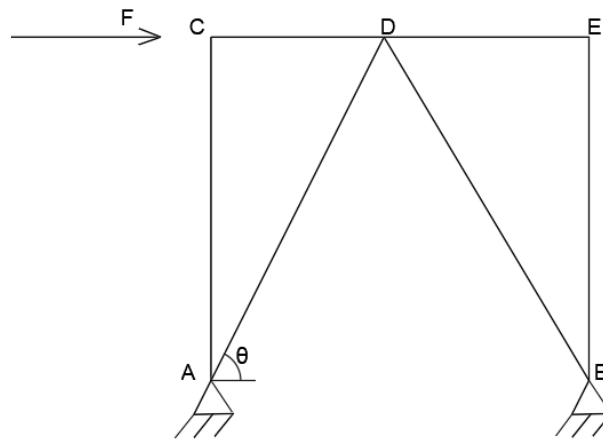


۸ مقایسه رفتار مهاربندهای همگرا در هنگام وقوع زلزله

هر کدام از انواع مهاربندهای همگرا دارای رفتار متفاوت به هنگام وقوع زلزله هستند. در ادامه قصد داریم تا با رفتار هریک آشنا شویم. با درک کامل رفتار مهاربندها، طراح می‌تواند بهترین سیستم مهاربندی را برای سازه انتخاب کند.

۱.۸ مهاربندهای شورون هفتی و هشتی

برای اینکه با رفتار مهاربندهای شورون ۷ و ۸ هنگام وقوع زلزله بیشتر آشنا شویم، قابی به شکل زیر در نظر بگیرید:

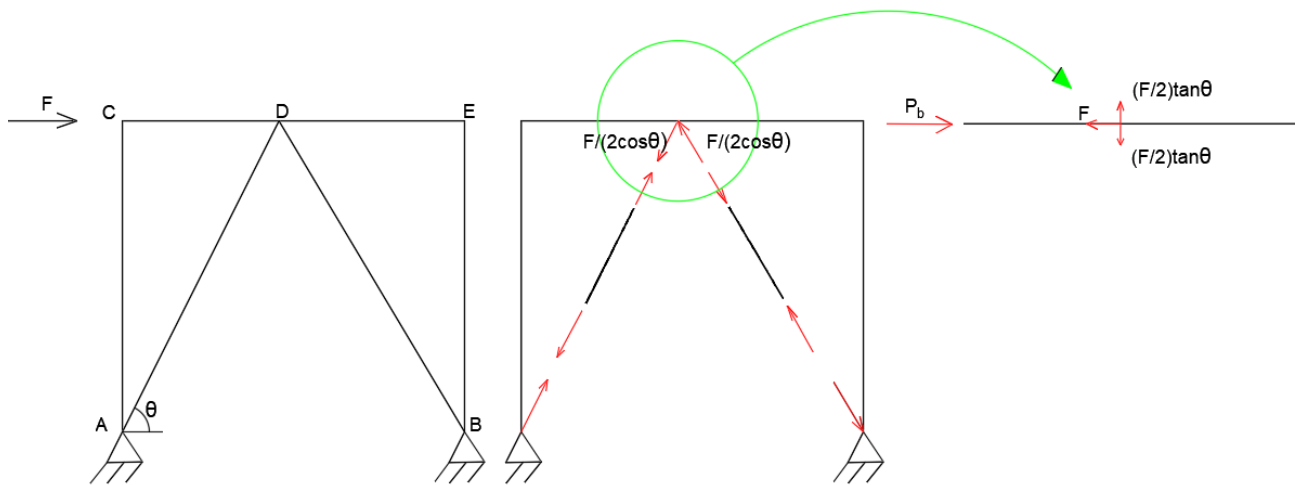


شکل ۲۴- قاب مهاربندی شورون هشتی تحت اثر بار جانبی

قاب مهاربندی شده فوق تحت اثر نیروی جانبی F قرار گرفته است که منجر شده است که مهاربند AD تحت کشش و مهاربند BD تحت فشار قرار گیرد. چنانچه نیروی جانبی وارد بر قاب مقدار قابل توجهی نداشته باشد، بطوری که نیروی فشاری وارده بر عضو مهاربندی از ظرفیت کماتشی آن کمتر باشد، مهاربند کماتش نمی‌کند و هر دو مهاربند در محدوده الاستیک خود قرار داشته و سهم برابری از نیروی جانبی را تحمل می‌کنند که با تحلیل سازه می‌توان فهمید که مقدار آن برابر با $\frac{F}{\sqrt{\cos\alpha}}$ است. در این حالت، مطابق شکل زیر، هر چند مقدار نیروها برابر ولی یکی از نوع کششی و دیگری از نوع فشاری است که به وسط تیر اعمال می‌شوند. از تجزیه این نیروها در وسط تیر، مطابق رابطه زیر مشخص می‌شود که نیروهای متمرکز قائم یکدیگر را خنثی کرده و برآیند آن‌ها صفر می‌شود. این درحالی است که مؤلفه‌های افقی نیروها، هم‌جهت و برآیند آن‌ها برابر F خواهد بود. به نیروی افقی خنثی نشده‌ای که در وسط تیر متصل به مهاربند ظاهر شده است، نیروی متوازن تیر گفته می‌شود.

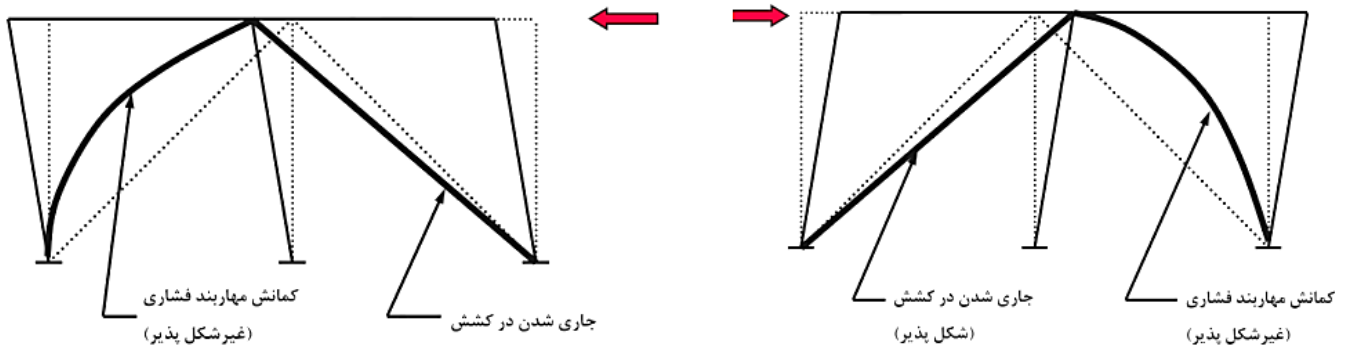
$$\sum f_x = 0 \rightarrow P_b = \left(\frac{F}{\sqrt{\cos\theta}} \times \cos\theta \right) + \left(\frac{F}{\sqrt{\cos\theta}} \times \cos\theta \right) = F$$

$$\sum f_y = 0 \rightarrow F_y = \left(\frac{F}{\sqrt{\cos\theta}} \times \sin\theta \right) - \left(\frac{F}{\sqrt{\cos\theta}} \times \sin\theta \right) = 0$$



شکل ۲۵- نمایش نیروهای متوازی که اعضای مهاربندی شورون ۸ تحت بار جانبی کم به تیر وارد می کنند

در صورتی که مقدار بار جانبی زیاد باشد به طوری که نیروی فشاری وارد بر عضو مهاربندی (عضو BD) از ظرفیت کمانشی عضو بیشتر باشد، در این صورت عضو BD کمانش می کند. می دانیم که مقاومت فشاری یک عضو فولادی از مقاومت کششی آن کمتر است؛ بنابراین زمانی که عضو BD تحت فشار کمانش می کند، نیروی کمی از جانب آن به تیر وارد می شود ولی در عوض عضو کششی مهاربند (AD) در اثر بار جانبی، نیروی کششی زیادی را به تیر اعمال می کند.

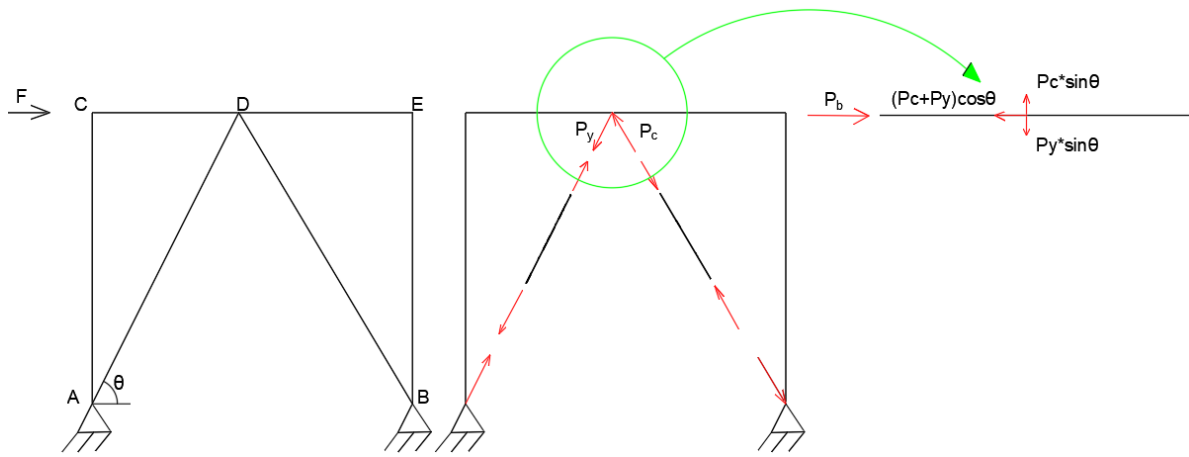


شکل ۲۶- کمانش عضو فشاری مهاربند شورون هشتی

این نیروهای وارد شده به تیر مطابق شکل زیر به دلیل اختلاف زیادی که با هم دارند، پس از تجزیه نیروهای وارده در راستای قائم و افقی مطابق رابطه زیر، در راستای قائم نیروی متمرکز نسبتاً زیادی را به وسط تیر اعمال می کنند که موجب به هم ریختن توازن نیروها در تیر می شود. به همین دلیل آن را نیروی نامتوازن کننده می نامند. این نیرو با ایجاد نیروی متمرکز زیادی در وسط تیر منجر به ایجاد لنگر خمشی زیادی در این نقطه خواهند شد که بایستی در طراحی سازه لحاظ شود. همچنین نیروی برآیند افقی قابل توجهی به تیر متصل به مهاربند وارد می شود که رفتار المان را از رفتار صرفاً خمشی به رفتار تیر - ستون (یعنی رفتار محوری - خمشی) تبدیل می کند که باید طراحی تیر متصل به مهاربندی شورون هفتی و هشتی بر اساس ضوابط تیر - ستون باید انجام گیرد.

$$\sum f_x = 0 \rightarrow P_b = (P_c \times \cos\theta) + (P_y \times \cos\theta) = (P_c + P_y) \cos\theta$$

$$\sum f_y = 0 \rightarrow F_y = (P_c \times \sin\theta) - (P_y \times \sin\theta) = (P_y - P_c) \sin\theta$$



شکل ۲۷- نمایش نیروهای نامتوازنی که اعضای مهاربندی شورون ۸ تحت بار جانبی زیاد به تیر وارد می کنند

با وارد شدن زلزله، قاب‌های مهاربندی شورون معمولاً به دو صورت دچار خرابی می شوند. حالت اول تسلیم تیر ضعیف به دلیل کماتش بابدند فشاری می باشد که موجب به وجود آوردن نیروی نامتوازن کننده، اعمال آن به تیر و ایجاد مفصل پلاستیک در تیر می گردد. حالت دوم تسلیم تیر قوی به دلیل کماتش عضو فشاری پس از عضو کششی می باشد.

توجه شود که نیروی نامتوازن کننده قائم وارد بر تیر، بسته به اینکه مهاربند لاغر یا چاق باشد، می تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. در واقع چنانچه مقدار لاغری مهاربند $(\frac{KL}{r})$ مقدار زیادی باشد، به این معناست که محدودیت آیین نامه بیشتری برای آن لحاظ می شود. در بند ۱۰-۳-۴-۱-۵-۲ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، لاغری مهاربندهای شورون هفتی و هشتی معمولی به مقدار $115 = 4\sqrt{\frac{2 \times 10^6}{2400}} = 4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ و در بند ۱۰-۳-۴-۲-۵-۲ برای مهاربندهای شورون ۷ و ۸ ویژه، این مقدار به ۲۰۰ محدود می شود.

در بند ۱۰-۳-۴-۲-۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان داریم:

$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y$	<p>الف) اگر $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (یا $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$) باشد:</p> <p>(۲-۴-۲-۱۰)</p>
$F_{cr} = 0.877 F_e$	<p>ب) اگر $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (یا $\frac{F_y}{F_e} > 2.25$) باشد:</p> <p>(۳-۴-۲-۱۰)</p>

بنابراین با توجه به محدودیت های آیین نامه ای اگر مهاربند فشاری مقدار لاغری بیشتر از محدودیت آیین نامه داشته باشد، لاغر محسوب می شود و مقاومت کماتشی کمی خواهد داشت ولی نیروی کششی مهاربند $(P_y = A_g F_y)$ ، مقدار به مراتب بزرگتری دارد که در نتیجه ای آن طبق رابطه ای

$$\sum f_y = (P_y - P_c) \sin \theta$$

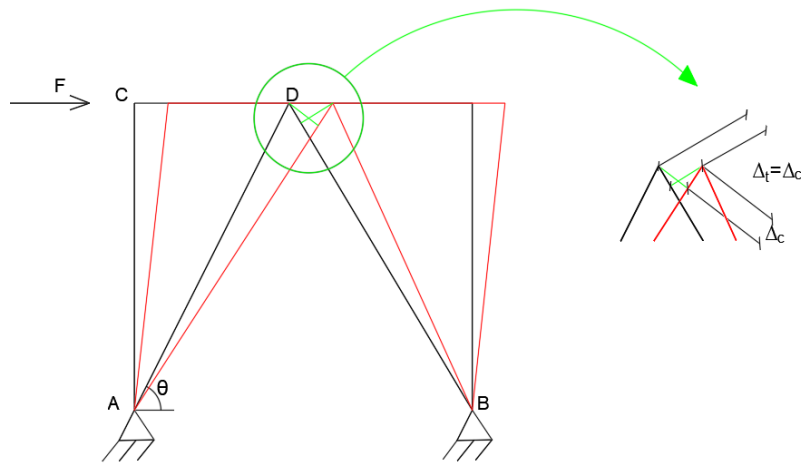


مقدار نیروی قائم نامتوازن کننده مقدار قابل توجهی خواهد شد، اما اگر مقدار لاغری مهاربند فشاری از حد آیین نامه کمتر باشد، مهاربند چاق محسوب می شود و مقاومت کمانشی قابل توجهی دارد که در مقایسه با نیروی کششی مهاربند تحت کشش، اختلاف کمی دارد که در نتیجه آن طبق رابطه

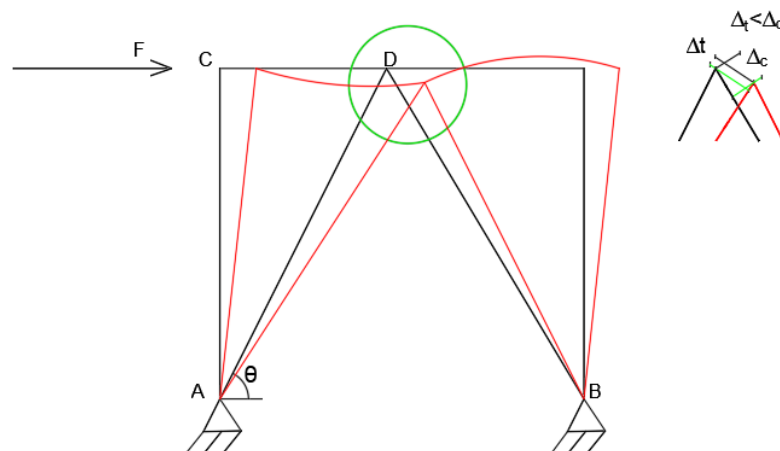
$$\sum fy = (P_y - P_c) \sin \theta$$

بنابراین باید سعی شود تا حد امکان مهاربند به گونه ای طراحی شود که لاغری آن کمتر از لاغری آیین نامه شود.

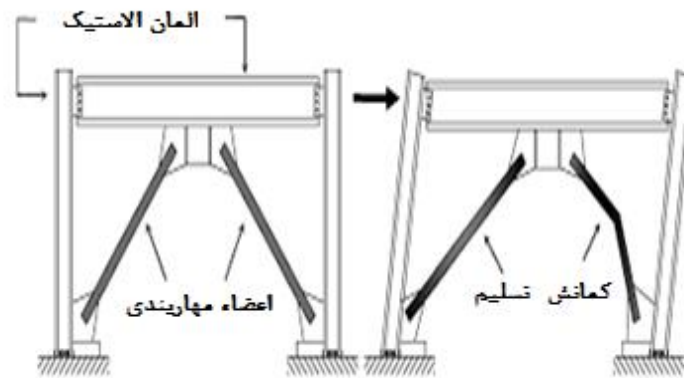
در قاب تحت بررسی تیر می تواند صلب یا غیرصلب (انعطاف پذیر) باشد. اگر تیر صلب باشد، تغییر مکان قائم در محل اتصال مهاربندها نسبت به یکدیگر صفر است که نتیجه این خواهد شد که میزان افزایش طول مهاربند کششی دقیقاً با کاهش طول مهاربند فشاری برابر است ولی اگر تیر صلب نباشد، به علت اینکه وسط تیر به سمت پایین تغییر مکان می دهد (به دلیل زیاد بودن نیروی کششی نسبت به فشاری)، تغییر طول مهاربندها با یکدیگر برابر نخواهند بود (کاهش طول مهاربند فشاری بیشتر از افزایش طول مهاربند کششی خواهد بود و البته در این حالت باز هم نیروهای مهاربندها برابر نیستند و نیروی نامتوازن وجود خواهد داشت). با توجه به اینکه استفاده از تیر صلب عملاً امکان پذیر نیست و استفاده از مهاربندهای با لاغری زیاد، نیروی نامتوازن کننده قابل ملاحظه ای را به تیر وارد می کند، تحقیقات انجام شده و همچنین آیین نامه ها، استفاده از مهاربندهای با لاغری کم را توصیه می کنند.



شکل ۲۸- تیر صلب و در نتیجه برابری کاهش طول مهاربند فشاری با افزایش طول مهاربند کششی



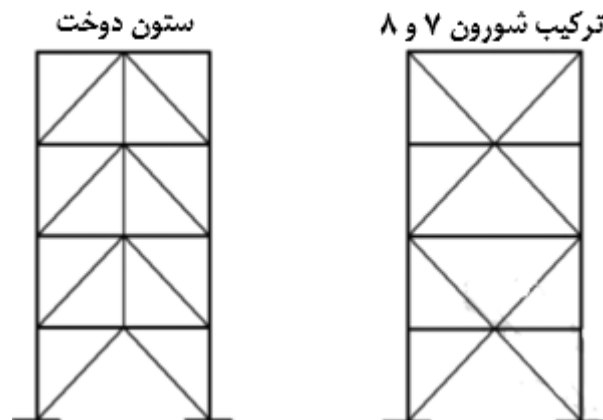
شکل ۲۹- تیر غیرصلب و بیشتر بودن کاهش طول عضو فشاری از افزایش طول عضو کششی



شکل ۳۰- عملکرد مهاربند شورون هفتی و هشتی در هنگام زلزله

آیین نامه‌ها برای کاهش نیروی زیاد نامتوازن کننده وارد بر تیر دو راهکار به شرح زیر ارائه می‌دهند:

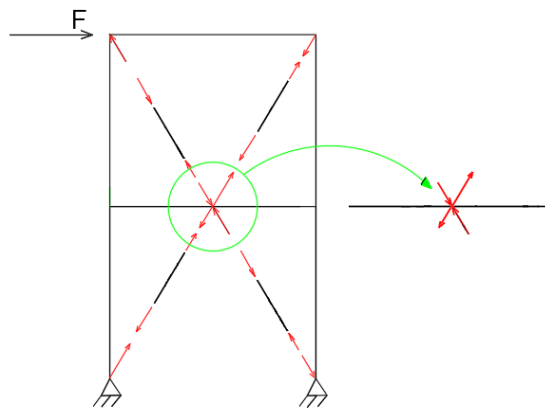
- (۱) استفاده از ستون‌های دوخت (زیپرها) در محل برخورد مهاربند با تیر در طبقات که در این صورت نیروی نامتوازن کننده به جای تیر به ستون دوخت وارد می‌شود. ستون‌های دوخت به دلیل ضعف مهاربندهای شورون در توزیع جابجایی نسبی طبقات و جذب انرژی پیشنهاد گردید و به سیستم‌های مهاربندی زیپی نیز معروف شدند. در مواردی دوخت در پایین‌ترین طبقه ساختمان اجرا نمی‌شود. همچنین این سیستم باعث می‌شود در وقوع زلزله خرابی به صورت یکنواخت در ارتفاع سازه گسترش یابد.
- (۲) استفاده از مهاربند شورون هفتی و هشتی به صورت ترکیبی که در این صورت نیروی نامتوازن کننده کمی به وسط تیر وارد می‌شود؛ زیرا از بالا و پایین نیروهای کششی و فشاری وارد بر تیر همدیگر را تا حد زیادی خنثی می‌کنند.



شکل ۳۱- راهکارهای کاهش نیروهای نامتوازن کننده



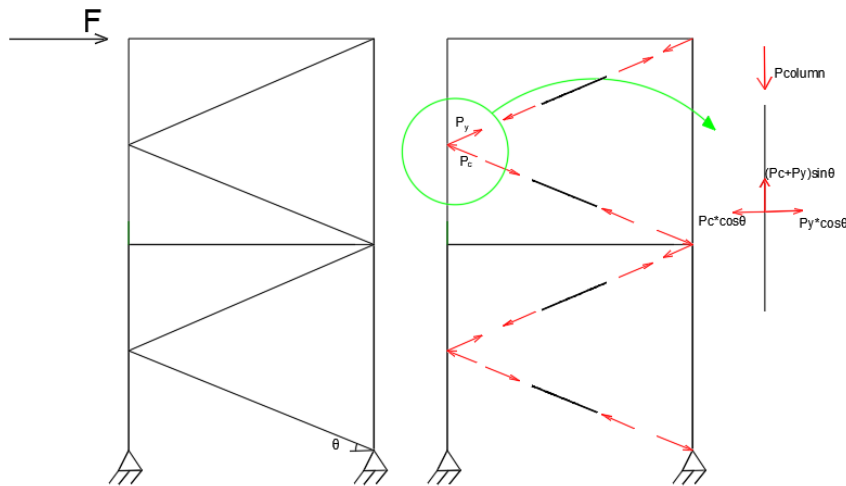
شکل ۳۲- نمونه قاب مهاربندی شده همگرا همراه ستون دوخت



شکل ۳۳- خنثی شدن اثر نیروهای وارد بر تیر در مهاربندی های ترکیبی هفتی و هشتی

۲.۸ مهاربندهای K شکل

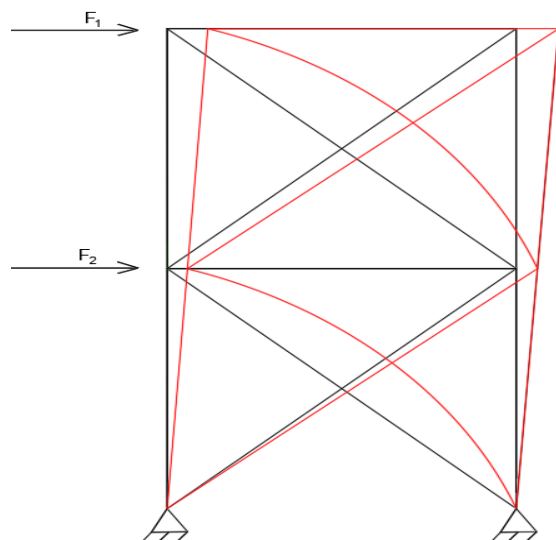
این مهاربندها نیز شبیه مهاربندهای شورون نیروی نامتوازن کننده زیادی به ستون متصل به آنها وارد می کند. استفاده از این مهاربندها محدودیت هایی دارد؛ زیرا عدم اجرای صحیح و وارد شدن نیروی برشی زیادی که از طرف مهاربندها به ستون، می تواند باعث فروپاشی کل ساختمان شود. ویرایش سوم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان استفاده از آنها را در ساختمان های یک و دو طبقه مجاز می داند، ولی در ویرایش های جدید این مبحث استفاده از این نوع مهاربند ممنوع شده است.



شکل ۳۴- نیروهای نامتوازن کننده وارد بر ستون در مهاربندی k

۳.۸. مهاربندهای ضربدری

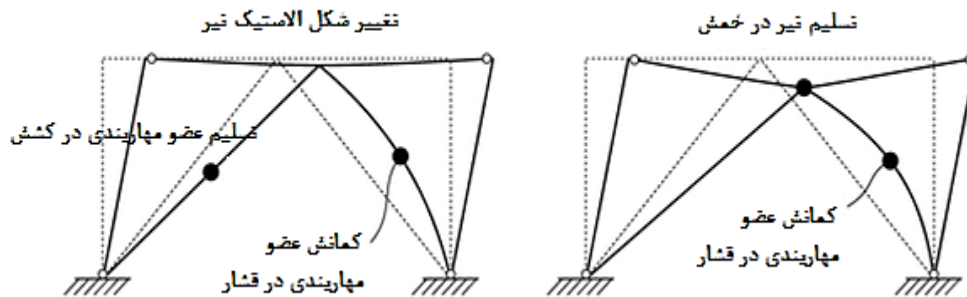
مهاربندها وقتی تحت اثر نیروی فشاری بیشتر از ظرفیت خود قرار می گیرند، کمانش می کنند. مهاربندها برخلاف ورقها، پس از کمانش مقاومت ناچیزی دارند و پس از وقوع کمانش در آنها سختی عضو تقریباً صفر خواهد شد و نیروی محوری فشاری وارده بر آنها، ثابت خواهد ماند. عضو فشاری مهاربند تحت اثر نیروی فشاری وارده با کاهش طول همراه هست که با افزایش نیروی فشاری، این کاهش طول بیشتر خواهد شد تا اینکه عضو فشاری مهاربند کمانش کند. در این حالت بدون اینکه نیروی محوری آن افزایش یابد، کاهش طول عضو ادامه می یابد.



شکل ۳۵- کمانش عضو فشاری و از بین رفتن سختی سیستم مهاربندی ضربدری

تغییر مکان وسط عضو مهاربند فشاری کم کم نسبت به حالت اولیه خود افزایش می یابد و این باعث افزایش لنگر خمشی در وسط مهاربند می شود. افزایش تغییر مکان وسط تیر و در نتیجه افزایش لنگر خمشی ادامه می یابد تا وسط مهاربند مفصل پلاستیک خمشی تشکیل شود. در این حالت با افزایش تغییر شکل عضو فشاری مهاربند، تغییر مکان جانبی وسط مهاربند به علت تشکیل مفصل پلاستیک شدیداً افزایش می یابد و به علت ثابت بودن لنگر پلاستیک، این افزایش تغییر مکان جانبی با کاهش نیروی محوری همراه خواهد بود.

$$P \times \delta = M_p = \text{ثابت} \quad , \quad P \downarrow = \frac{M_p}{\delta \uparrow}$$



شکل ۳۶- افزایش نیروی فشاری و کمانش مهاربند و در نهایت تشکیل مفصل پلاستیک در وسط عضو مهاربندی

در حالت باربرداری، نیرو صفر می‌شود و عضو تحت کشش قرار می‌گیرد. حداکثر نیروی کششی که می‌توان به عضو وارد کرد برابر $A_g F_y$ است. در این حالت تغییر شکل‌های پسماند در عضو باقی می‌ماند و عضو هیچ‌گاه مثل حالت اول (صاف) نخواهد شد. به علت مفصل پلاستیکی که در عضو ایجاد شده است، در بارگذاری مجدد فشاری بار بحرانی عضو نسبت به حالت اول کمتر خواهد بود ($P_{cr}' < P_{cr}$). مقدار $\frac{P_{cr}'}{P_{cr}}$ تابعی از لاغری عضو است. انجمن مهندسان سازه کالیفرنیا (SEAOC) رابطه زیر را ارائه کرده اند.

$$P_{cr}' = \frac{P_{cr}}{1 + \frac{\Gamma}{\sqrt{C_c}}} = \frac{P_{cr}}{1 + \frac{\lambda}{\sqrt{C_c}}} < P_{cr} \quad , \quad C_c = \sqrt{\frac{\sqrt{2}\pi^2 E}{F_y}} = \frac{6440}{\sqrt{F_y}}$$

۹ عوامل تاثیرگذار در رفتار شکل‌پذیر مهاربندهای همگرا

در رفتار شکل‌پذیر مهاربندها سه عامل تأثیرگذار است:

۱- لاغری مهاربند

لاغری عضو با پارامتر بی‌بعد $(\frac{kl}{r})$ اندازه‌گیری می‌شود که در آن k ضریب طول موثر، l طول عضو مهاربندی و r شعاع ژیراسیون عضو می‌باشد. این پارامتر در ظرفیت جذب انرژی و منحنی‌های هیستریزس مهاربند تأثیر زیادی دارد. منحنی‌های هیستریزس مهاربندهای لاغر دارای حلقه‌های لاغر می‌باشد. با افزایش لاغری مهاربند از اتلاف انرژی آن‌ها کاسته می‌شود. لاغری باعث می‌شود که مهاربند سریعتر کمانش کند و این موجب افت سریع سختی سیستم می‌شود. پس برای اتلاف انرژی بیشتر باید سعی شود مهاربند حتی المقدور چاق (با لاغری کم) طراحی شود. منظور از لاغری کم یعنی لاغری در حدی است که بار کمانشی کمتر از بار تسلیم باشد. مهاربندهای چاق ظرفیت شکل‌پذیری سازه را نیز افزایش می‌دهند.



۲- شرایط انتهایی مهاربند

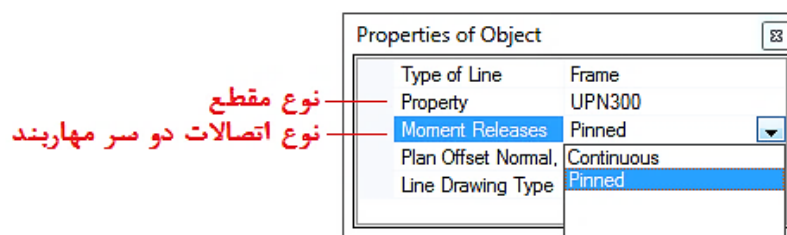
طراح بنا بر شرایط می تواند اتصالات انتهایی مهاربند را گیردار یا مفصلی طراحی کند. اگر مهاربند به جای اینکه دوسر مفصل اجرا شود، دوسر گیردار اجرا شود، در این صورت بجای تشکیل یک مفصل در وسط مهاربند، سه مفصل پلاستیک که دوتای آن دو انتهای مهاربند است تشکیل می شود (به دلیل وجود لنگر در انتهای مهاربند) و این پتانسیل اتلاف انرژی را افزایش می دهد.

۳- شکل مقطع مهاربند

در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است با لاغری یکسان بالاترین اتلاف انرژی مربوط به مهاربندهای با مقطع لوله ای و پس از آن مقطع قوطی شکل است. از این رو استفاده از جفت ناودانی (قوطی شکل) برای مهاربند گزینه بسیار مناسبی است.

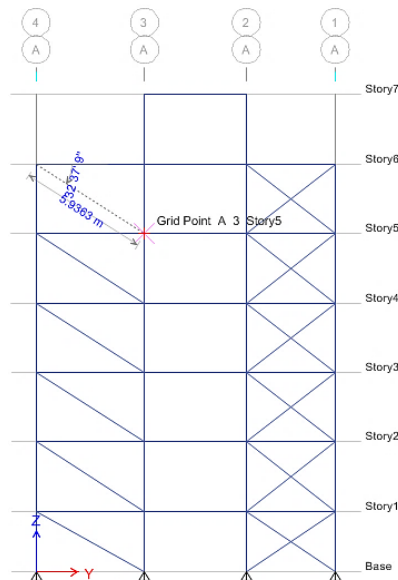
۱۰ مدل سازی مهاربندهای همگرا در نرم افزار ایتبس

با فرض مدل سازی صحیح هندسه سازه فولادی و اعمال بارگذاری های لازم، به بررسی نحوه مدلسازی و ترسیم مهاربندهای همگرا و نکات مربوط به آن در ETABS 2019 می پردازیم. باتوجه به اینکه مهاربندها در نمای جانبی سازه قاب رؤیت هستند، به جهت ترسیم ابتدا در نوار فوقانی آیکون $(e|v)$ را انتخاب کرده و در پنجره Set Elevation View محور مربوطه را انتخاب می کنیم. حال از مسیر Draw > Draw Beam/Column/Brace Objects > Beam/Column/Brace Objects (Plan, Elev, 3D) اقدام به ترسیم مهاربند می کنیم. پنجره ای مطابق شکل زیر ظاهر می شود که در آن نوع مقطع انتخابی و شرایط انتهایی (مفصلی: Pinned و گیردار: Continuous) تعیین می گردند.



شکل ۳۷- تنظیم خصوصیات مهاربندها

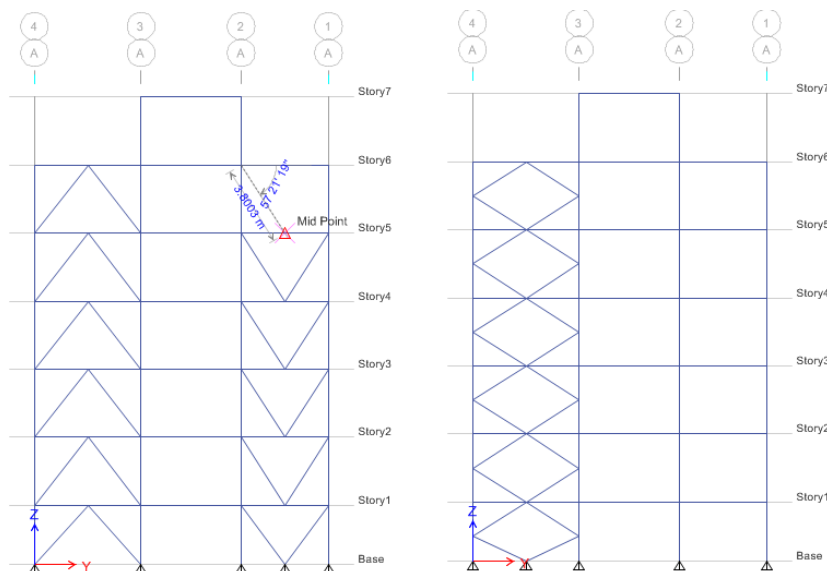
حال با استفاده از نشانک ظاهر شده می توان به ترسیم دستی مهاربند همگرا پرداخت. در شکل زیر در یک دهانه مهاربند همگرای ضربدری و در دهانه دیگر مهاربند همگرای قطری ترسیم شده اند.



شکل ۳۸- ترسیم دستی مهاربند همگرای ضربدری و قطری

به جهت ترسیم دستی مهاربندهای شورون هفتی و هشتی دو راهکار وجود دارد:

(۱) از مسیر `Draw > Snapp Options` گزینه `Line End and Midpoints` را فعال می‌کنیم تا در هنگام ترسیم نقاط انتهایی و وسط المان‌ها به طور خودکار نمایش داده شوند. در این صورت می‌توان مهاربندهای به شکل شورون هفتی و هشتی یا لوزی را ترسیم نمود که در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



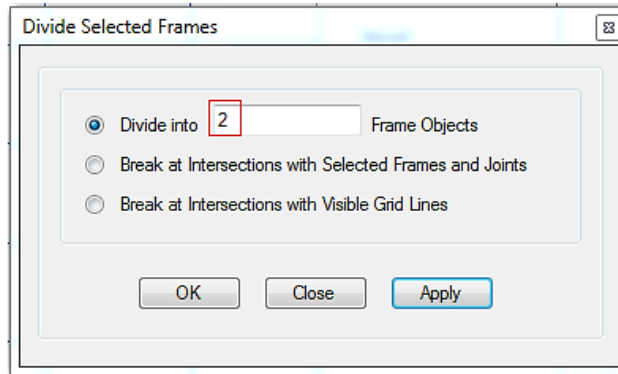
شکل ۳۹- ترسیم دستی مهاربند همگرای شورون هفت و هشتی و مهاربند همگرای لوزی

(۲) با انتخاب المان مربوطه از مسیر `Edit > Edit frames > Divide Frames` می‌توان المان را به چند قسمت تقسیم نمود. مطابق شکل زیر با وارد نمودن عدد ۲ در گزینه اول، المان به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود. چنانچه بخواهیم از نقطه خاصی المان را دو قسمت کنیم با انتخاب المان و نقطه



مربوطه گزینه دوم را فعال می کنیم. گزینه سوم زمانی به کار می رود که grid line اضافی وجود داشته باشد یا با ترسیم یک grid line اضافی قصد داشته باشیم المان از محل تقاطع المان با grid line به دو قسمت تقسیم شود.

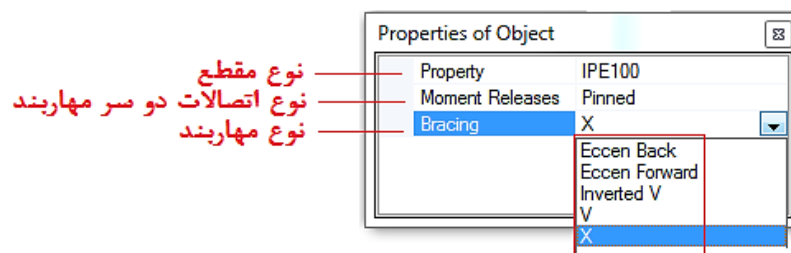
تذکره: پس از ترسیم دستی مهاربندها بایستی با انتخاب دو قسمت جدا شده از المان، از مسیر Edit > Edit frames > Join Frames اقدام به یکپارچه کردن المان نمود.



شکل ۴۰- تقسیم بندی المان (تیر یا ستون) به چند قسمت

۱.۱۰ روش ترسیم سریع مهاربندها

با انتخاب آیکون Quick Draw Braces(Plan,Elev,3D) از نوار ابزار کناری در منوی اصلی ایتبس پنجره ای به شکل زیر ظاهر می شود. در قسمت Bracing می توان نوع مهاربند را تعیین نمود.



شکل ۴۱- تنظیم مشخصات و نوع مهاربند در ترسیم سریع

Eccen Back : مهاربند قطری که از راست به چپ ترسیم می شود

Eccen Forward : مهاربند قطری که از چپ به راست ترسیم می شود

Inverted V : مهاربند شورون هشتی

V : مهاربند شورون هفتی

X : مهاربند ضربدری

با انتخاب نوع مهاربند و کلیک بر روی دهانه مربوطه، مهاربند انتخابی به طور خودکار ترسیم می شود.



۲.۱۰ تنظیمات عمومی پیش از طراحی

از مسیر Design > Steel Frame Design > View Revise Preferences می‌توان نوع قاب سازه را از نظر طراحی لرزه‌ای و شکل‌پذیری تعیین نمود. موارد ۳ تا ۱۰ مربوط به برخی تنظیمات طراحی لرزه‌ای می‌باشد که در این مقاله مورد بحث نیست.

قاب خمشی ویژه : SMF

قاب خمشی متوسط : IMF

قاب خمشی معمولی : OMF

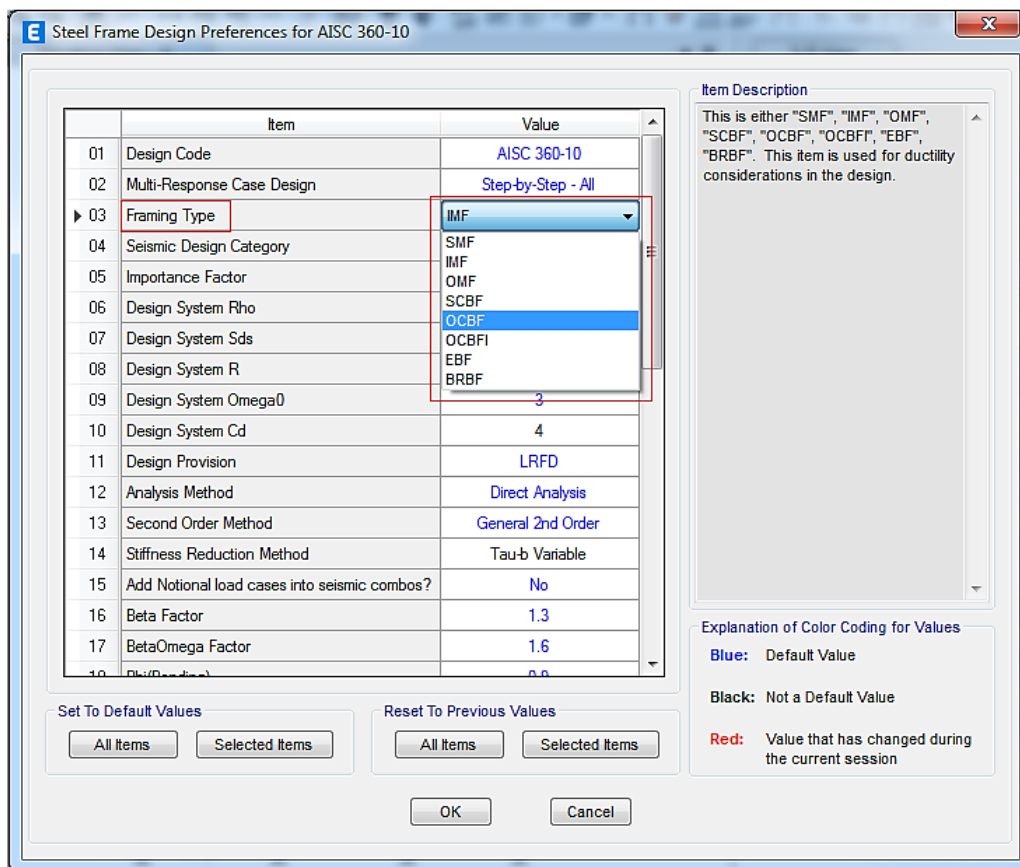
قاب مهاربندی شده همگرای ویژه : SCBF

قاب مهاربندی شده همگرای معمولی : OCBF

قاب مهاربندی شده همگرای معمولی در سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای : OCBFI

قاب مهاربندی شده واگرا : EBF

قاب با مهاربند کماتش‌تاب : BRBF



شکل ۴۲- تعیین نوع قاب ساختمانی



۳.۱۰ تنظیمات اختصاصی مهاربندها

از مسیر Design > Steel Frame Design > مسیر Select > Select Object Type > Braces تمامی مهاربندها انتخاب می‌شوند، سپس از مسیر View Overwrites می‌توان تنظیمات اختصاصی مهاربندها را مشاهده نمود. با انتخاب آیین‌نامه و نوع قاب، ویژگی‌های مربوطه به درستی تنظیم می‌شوند. تنها موارد ۲۴ و ۲۵ با توجه به نوع مقطع مورد استفاده در مهاربندها بایستی اصلاح گردد. به عنوان مثال در مهاربندهای ضربدری با مقطع متداول دویل ناودانی، مقادیر مربوط به نسبت طول مهارنشده برای کمانش حول محور قوی و ضعیف به ترتیب ۰/۵ و ۰/۷ وارد می‌شوند.

Steel Frame Design Overwrites for AISC 360-10	
Item	Value
22	Unbraced Length Ratio (Major)
23	Unbraced Length Ratio (Minor)



نسبت طول مهارنشده مهاربندها برای
کمانش حول محور قوی و ضعیف

شکل ۴۳- تنظیم خصوصیات مهاربندها

پس از تحلیل و طراحی اطلاعات مربوط به مهاربندها با راست کلیک بر روی آن قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت پنجره‌ای به نام Steel Stress Information باز می‌شود که خلاصه‌ای از طراحی عضو مورد نظر در هریک از ترکیب بارها نمایش داده شده است.

پرسش و پاسخ

(۱) تفاوت سیستم مهاربندی زانویی با قطری چیست؟

سیستم مهاربند زانویی علاوه بر عضو قطری شامل یک عضو زانویی نیز می‌باشد که تأمین کننده شکل‌پذیری لازم بوده و با تشکیل مفصل الاستیک در آن، بقیه اعضا در حالت الاستیک باقی می‌مانند. در نتیجه در صورت خرابی، می‌توان با تعویض عضو زانویی سیستم مهاربندی را تعمیر و دوباره استفاده نمود.

(۲) بهترین نوع مهاربند همگرا کدام است؟

هریک از مهاربندهای همگرا مزایا و معایب بخصوصی دارند و از نظر سختی، شکل‌پذیری، محدودیت‌های اجرایی و معماری قابل بحث می‌باشند. به طور کلی مهاربندهای ضربدری و شورون بهترین و متداول‌ترین مهاربندهای همگرا می‌باشند.

(۳) به منظور کاهش نیروی نامتوازن کننده تیر در مهاربندهای همگرای شورون چه اقدامی می‌توان انجام داد؟

استفاده از ستون‌های دوخت یا استفاده از سیستم ترکیبی مهاربندهای شورون هفتی و هشتی به عنوان دو راهکار مؤثر شمرده می‌شوند.



۴) آیا استفاده از مهاربند همگرای دروازه‌ای ممنوع است؟

خیر. مهاربند همگرای دروازه‌ای فعلاً وارد آیین‌نامه نشده و ضوابط آیین‌نامه‌ای ندارد، اما بایستی از استفاده از آن به دلیل پتانسیل حرکت‌های خارج از صفحه و غیراقتصادی بودن تا حد امکان اجتناب نمود.

۵) دلیل ممنوعیت استفاده از مهاربندهای k شکل در مبحث دهم مقررات ملی چیست؟

به دلیل شکل ظاهری مهاربندهای k شکل و اتصال مستقیم به وسط ستون، این مهاربندها پتانسیل ایجاد مفصل پلاستیک در ستون را بالا می‌برند که امری نامطلوب و خطرناک است.

نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله سیستم مهاربندی همگرا مورد مطالعه قرار داده شد و ۶ نوع مهاربند همگرا از نظر ویژگی‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. مهاربند ضربدری با بالاترین میزان سختی به عنوان متداول‌ترین نوع مهاربند همگرا معرفی شد که در مقابل دارای شکل‌پذیری کم و محدودیت‌های معماری می‌باشد. از این رو، مهاربندهای شورون هفتی و هشتی با مرتفع ساختن محدودیت‌های ایجاد باز شو و سیستم‌های نوین مهاربندی نظیر مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با پوشش دیگر معایب سیستم‌های همگرا مورد بررسی قرار گرفتند. براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، دلیل ممنوعیت استفاده از مهاربند K و طبقه‌بندی مهاربندهای همگرا از نظر شکل‌پذیری شرح داده شد. همچنین، رفتار هریک از مهاربندهای همگرا در هنگام وقوع زلزله مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت نکاتی در مورد ترسیم دستی و سریع انواع مهاربندهای همگرا در نرم‌افزار ETABS ارائه شد.

منابع

۱. [مبحث دهم مقررات ملی ساختمان \(ویرایش ۱۴۰۱\)](#)
۲. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ها (استاندارد ۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش ۴
۳. طراحی کاربردی سازه‌های فولادی، محسن گرامی، ۱۴۰۱
۴. تحلیل و طراحی سازه‌های فولادی با تأکید بر روش‌های حالات حدی، هاشمی، علیرضایی و احمدی، ۱۳۹۵
۵. طراحی سازه‌های فولادی به روش حالات حدی (جلد پنجم)، ازهری، عموشاهی، میرباقری، ۱۳۹۶
6. Seismic provisions for structural steel buildings, AISC341-22.
7. Specification for Structural Steel Buildings, An American National Standard, AISC 360-22.

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

