سری عمران

# پیوست چهارم

## معرفی سیستم‌های سازه‌ای

قسمت اول: سیستم دیوارهای برشی

قسمت دوم: سیستم مهاربندهای فولادی

قسمت سوم: سیستم قاب خمشی و سیستم‌های دوگانه

قسمت چهارم: سیستم‌های با کاربرد خاص

در قسمت اول این پیوست، چه خواهیم خواند؟

در این قسمت قصد داریم به معرفی انواع سیستم دیوارهای برشی شامل دیوارهای برشی بتن مسلح، دیوار برشی فولادی و دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح پرداخته، جزئیات آنها را به‌صورت اجمالی بررسی کنیم و مقایسه‌ای در مورد رفتار لرزه‌ای آنها با یکدیگر داشته باشیم.

## A-۱- کلیات

دیوار یکی از قدیمی‌ترین اجزای ساختمان‌ها می‌باشد که در گذشته در ساختمان‌های بنایی استفاده می‌شد و وظیفهٔ انتقال بارهای ثقلی را بر عهده داشت. با توسعهٔ صنعت ساخت و ساز و تغییر نگرش مهندسین عمران در جهت اهمیت دادن به بحث بارهای جانبی ناشی از باد و به ویژه زلزله، استفاده از دیوارهای سازه‌ای مانند دیوارهای بنایی مسلح و دیوارهای بتنی مسلح برای تحمل بارهای جانبی به‌صورت گسترده مورد توجه قرار گرفت. همچنین در سال‌های اخیر، دیوارهایی با مصالح فولادی نیز به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی نوین به جامعهٔ مهندسی عمران معرفی شده است.

سیستم دیوارهای برشی
- دیوار برشی بتن مسلح
- دیوار برشی فولادی
- دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح

به‌طور کلی دیوارهای سازه‌ای می‌توانند در هنگام وقوع زلزله، تمام یا بخش اعظم نیروی برشی ایجاد شده در طبقات ساختمان را تحمل کنند و از همین‌رو است که به آنها دیوارهای برشی گفته می‌شود. دیوارهای برشی باعث ایجاد سختی جانبی زیادی در سازه شده و معمولاً شکل‌پذیری قابل قبولی از خود نشان می‌دهند. جالب است بدانید که تاکنون درصد بسیار کمی از ساختمان‌هایی که به تعداد کافی دیوار برشی داشته ولی حتی جزئیات برخی از آنها به‌طور دقیق اجرا نشده، در حین زلزله به‌طور کامل فروریخته‌اند. در ادامهٔ این قسمت، ویژگی‌های مرتبط با هر یک از سیستم‌های دیوار برشی را بررسی خواهیم کرد.

## A-۲- دیوار برشی بتن مسلح

سیستم دیوار برشی بتن مسلح، پرکاربردترین نوع دیوارهای برشی در صنعت ساختمان کشور عزیزمان است. این سیستم متشکل از یک دیوار بتنی است که درون آن شبکه‌هایی از آرماتوربندی افقی و قائم وجود دارد و در صورت نیاز می‌توان حفره‌هایی به نام بازشو جهت ایجاد در و پنجره نیز در آن ایجاد کرد.

زیر شاخه‌های اصلی قسمت اول

A-۱- کلیات
A-۲- دیوار برشی بتن مسلح
A-۳- دیوار برشی فولادی
A-۴- دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح

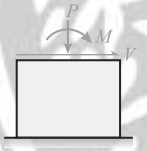
شکل ۱: استفاده از دیوار برشی بتن مسلح در سازه و نحوهٔ آرماتوربندی آن

در ادامه به بررسی نحوهٔ عملکرد سازه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح پرداخته و چند مورد از جزئیات اجرایی را نیز دربارهٔ آنها مرور می‌کنیم.

### A-۲-۱- عملکرد دیوار برشی بتن مسلح

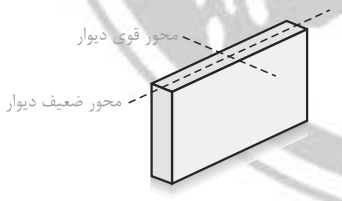
به‌طور کلی در یک سیستم دیوار برشی که تحت اثر بارهای ثقلی و بارهای جانبی زلزله قرار دارد، سه نوع تلاش داخلی ایجاد می‌شود:

۱) نیروی محوری فشاری که ناشی از بارهای ثقلی طبقات بوده که به دیوار منتقل می‌شود.
۲) نیروی برشی ناشی از نیروهای جانبی زلزله که حداکثر مقدار آن در پایین‌ترین طبقه می‌باشد.
۳) لنگر خمشی ناشی از نیروهای جانبی زلزله که حداکثر مقدار آن در پایین‌ترین طبقه می‌باشد.




شکل ۲: تلاش‌های داخلی در مقطع یک دیوار برشی

دیوارهای برشی بتن مسلح مورد استفاده در ساختمان‌ها، اعضایی با ضخامت کم و عرض و ارتفاع زیاد هستند که این موضوع سبب می‌شود تا سختی درون صفحهٔ آنها قابل ملاحظه بوده و در اصطلاح به آنها «دیافراگم قائم» گفته شود. این دیوارها دارای دو محور ضعیف و قوی بوده که در راستای محور قوی در برابر نیروهای جانبی مقاومت می‌کنند. معمولاً ظرفیت دیوار در راستای محور ضعیف نسبت به محور قوی ناچیز است و در نظر گرفته نمی‌شود.

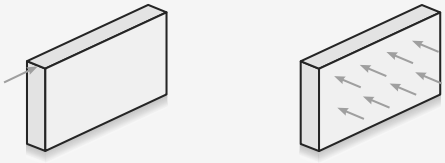



شکل ۳: محورهای قوی و ضعیف دیوار

**دید مهندسی**

به منظور طراحی یک دیوار برشی بتن مسلح در برابر لنگر خمشی و نیروی برشی وارد بر آن، بهتر است به نکات زیر دقت شود:

۱) اگر دیوار صرفاً تحت بارهای درون صفحه‌ای قرار گرفته باشد، رفتار برشی دیوار مشابه یک تیر بوده و می‌توان از اصول کلی طراحی تیرهای بتنی در مقابل نیروی برشی استفاده کرد، به‌طوری‌که ظرفیت برشی بتن و آرماتور برشی به‌صورت جداگانه محاسبه شده و با هم جمع خواهد شد. در مقابل اگر در راستای عمود بر محور اصلی به دیوار نیرو وارد شود، طراحی دیوار شبیه دال خواهد بود.

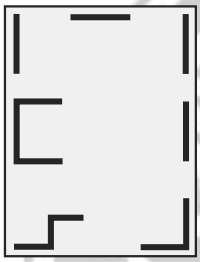


دیوار تحت بار جانبی خارج از صفحه　　دیوار تحت بار جانبی درون صفحه

شکل ٤: بارهای وارد بر یک دیوار

۲ در طراحی خمشی یک دیوار برشی بتنی، در صورتی‌که نیروی محوری نیز بر دیوار اثر کند، طراحی دیوار شبیه ستون خواهد بود و می‌توان از نمودارهایی مشابه با نمودارهای اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی ستون‌ها استفاده کرد، ولی اگر دیوار تحت لنگر خمشی خالص قرار گرفته باشد رفتاری شبیه تیر طرهٔ قائم داشته و طراحی خمشی آن مانند طراحی یک تیر بتنی صورت می‌گیرد.

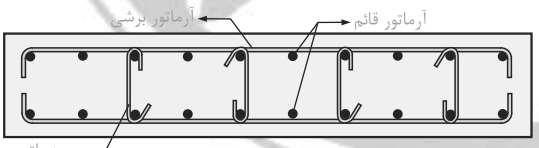
### A-۲-۲- جزئیات اجرایی دیوار برشی بتن مسلح



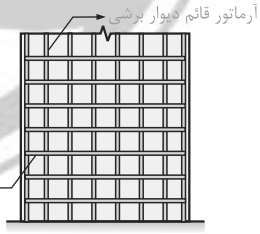
شکل ۵: حالت‌های مختلف برای مقطع دیوار برشی بتن مسلح

دیوارهای برشی عمدتاً به‌عنوان دیوارهای خارجی ساختمان یا بعضاً دیوارهای داخلی ساخته می‌شوند و در بسیاری از موارد نیز محوطهٔ آسانسور یا پله‌ها را در بر می‌گیرند. مقطع یک دیوار برشی بتن مسلح غالباً به‌صورت مستطیلی، $L$ شکل و یا $U$ شکل بوده که البته بسته به معماری ساختمان می‌تواند شکل‌های دیگری نیز داشته باشد که در پلان مقابل می‌توانید انواع مقاطع متداول دیوار برشی را مشاهده کنید:

بتن‌ریزی دیوارهای برشی بتنی غالباً به‌صورت درجا بوده و همراه با سقف اجرا می‌شوند. از طرفی آرماتوربندی دیوار برشی بتنی دارای دو شبکهٔ آرماتور اصلی است که شامل آرماتورهای قائم و افقی می‌باشد. آرماتورهای قائم دیوار باعث افزایش مقاومت خمشی آن می‌شوند و آرماتورهای افقی در باربری برشی دیوار سهم دارند. همچنین به منظور مهار کردن آرماتورهای قائم دیوار، اغلب از آرماتورهای سنجاقی به‌صورت یک در میان و در ارتفاع دیوار استفاده می‌شود.




مقطع یک دیوار برشی بتن مسلح و آرماتورهای استفاده شده در آن



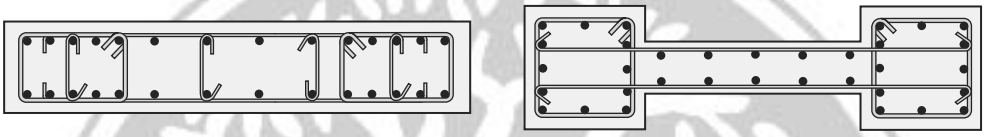

نمایی از آرماتورگذاری یک دیوار برشی بتن مسلح

شکل ٦: جزئیات آرماتورگذاری یک نمونه از دیوار برشی

**دقت:** مقطع دیوار برشی نشان داده شده در شکل بالا، دیوار برشی مستطیل شکل با آرماتورگذاری یکنواخت نامیده می‌شود. این نوع دیوار از لحاظ اجرا ساده‌ترین شکل دیوار برشی است اما از لحاظ عملکرد سازه‌ای چندان مطلوب نمی‌باشد. البته شایان ذکر است که دیوار برشی با آرماتورگذاری یکنواخت در برخی از ساختمان‌ها که اصطلاحاً ساختمان‌های با قاب‌های بتنی پیوسته (قالب تونلی) گفته می‌شوند کاربرد فراوانی دارد.

شکل ۷: ساختمان با سیستم قالب تونلی

یکی از راه‌های بهبود رفتار لرزه‌ای دیوار برشی بتنی، استفاده از آرماتورگذاری قائم فشرده در دو انتهای دیوار است که به اصطلاح «المان مرزی» یا «المان لبه‌ای» نامیده می‌شوند. ضخامت دیوار در محل المان مرزی می‌تواند بزرگتر از ضخامت دیوار بوده و یا با ضخامت دیوار یکسان باشد، از طرف دیگر باید گفت که ضوابط آرماتورگذاری این قسمت از دیوار، مشابه ضوابط آرماتورگذاری ستون‌ها بوده و دارای خاموت برشی بسته می‌باشد.



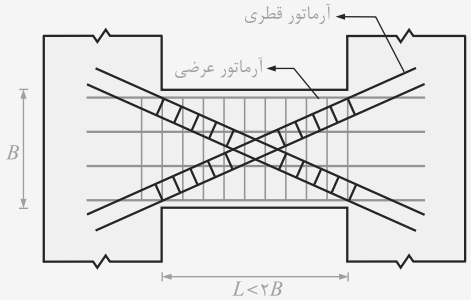
المان مرزی با ضخامت بیشتر از دیوار (دیوار برشی I شکل یا دمبلی) — المان مرزی هم ضخامت با دیوار

شکل ۸: جزئیات آرماتورگذاری المان مرزی در دیوار برشی

● **دقت:** دیوارهای برشی با آرماتورگذاری متمرکز در دو انتها، هر چند از لحاظ اجرایی دشوارتر از دیوارهای با آرماتورگذاری یکنواخت هستند ولی عملکرد سازه‌ای آنها مطلوب‌تر بوده و می‌توانند با مقدار فولاد کمتری که در دو انتهای آنها قرار گرفته است، لنگر خمشی بیشتری را تحمل کنند.

دید مهندسی

آرماتور قطری نوع دیگری از آرماتورگذاری در دیوارهای برشی بتنی است و غالباً در نواحی بین دو بازشو که نسبت طول دهانهٔ آزاد به ارتفاع مقطع آنها کمتر از ۲ است قرار می‌گیرد. در این نواحی عملکرد دیوار بتنی نظیر یک تیر عمیق بوده که رفتار برشی در آن حاکم است و به‌همین دلیل عمدهٔ مقاومت برشی آنها توسط آرماتورهای قطری تأمین می‌گردد.




شکل ۹: جزئیات آرماتورگذاری قطری در دیوارهای برشی

● **دقت:** در لبهٔ یک بازشو در دیوارهای برشی بتنی، معمولاً آرماتورگذاری طولی دیوار باید تقویت شود که در صورت بزرگ بودن ابعاد بازشو، این تقویت ممکن است به شکل المان مرزی اجرا گردد.

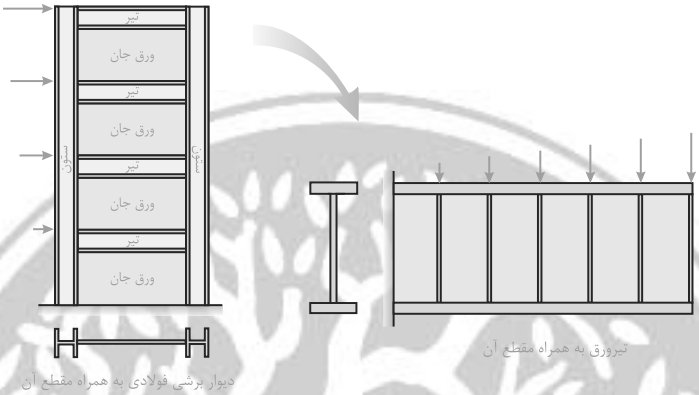
## A-۳- دیوار برشی فولادی

شکل ۱۰: نمونه‌ای از کاربرد دیوار برشی فولادی

در چند دههٔ گذشته، استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم اقتصادی و کارآمد در سطح جهان رواج یافته و ضوابط طراحی آن در سال‌های اخیر در آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی بیان شده است.

در سیستم دیوار برشی فولادی، یک ورق فولادی که معمولاً ضخامت آن از ۳ تا ۱۲ میلی‌متر است، در داخل چشمهٔ قاب قرار گرفته و با اتصال به تیر و ستون‌های اطراف چشمه به سختی قاب می‌افزاید.

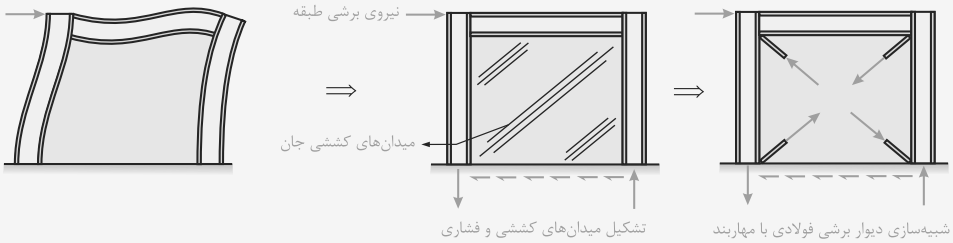
عملکرد یک دیوار برشی فولادی بسیار شبیه به یک تیرورق است، به‌طوری‌که ستون‌ها به‌عنوان بال‌های تیرورق و ورق جان دیوار شبیه جان تیرورق عمل کرده و تیرهای افقی طبقه را نیز می‌توان به‌عنوان سخت‌کننده‌های عرضی تیرورق در نظر گرفت.




شکل ۱۱: تشابه دیوار برشی فولادی با یک تیر طره‌ای

دید مهندسی

در شکل زیر مدل ساده شده‌ای از نحوهٔ انتقال نیرو در یک دیوار برشی فولادی نشان داده شده است:




شکل ۱۲: تأثیر نیروی جانبی بر دیوار برشی فولادی و تشابه عملکرد آن با سیستم‌های مهاربندی

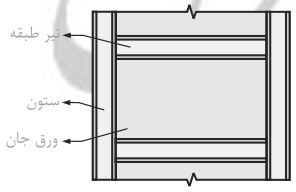
همان‌طورکه در شکل بالا مشاهده می‌کنید، اعمال برش طبقه به این دیوار سبب می‌شود که نواحی کششی در ورق جان ایجاد شود (عملاً برش توسط میدان کششی قطری در ورق فولادی تحمل می‌شود) و ستون‌ها در برابر لنگر واژگونی مقاومت خواهند کرد. همچنین جالب است بدانید که عملکرد این نوارها شبیه عملکرد مهاربندها در قاب‌های مهاربندی شده است. از سوی دیگر نوارهای کششی به‌وجود آمده در ورق فولادی جان، نیروی برشی را به اجزای مرزی شامل تیر و ستون منتقل می‌کنند. توجه کنید که در راستای عمود بر میدان کششی قطری، میدان فشاری قطری نیز ایجاد می‌شود که ممکن است ورق جان تحت اثر آن کمانش کند.

**نکته:** به‌منظور کاهش نیروی انتقال یافته از ورق جان به اجزای مرزی دیوار، استفاده از ورق‌های فولادی با تنش تسلیم پایین‌تر بسیار مناسب است زیرا در این حالت، عمدهٔ تغییرشکل‌ها و شکل‌پذیری مورد نیاز دیوار در ورق جان متمرکز شده و نیروی وارد به تیر و ستون‌ها کاهش خواهد یافت.

### A-۳-۱- انواع دیوار برشی فولادی

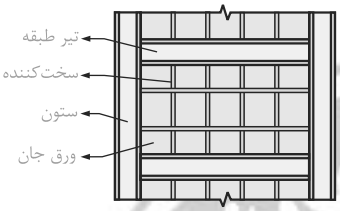
به‌طور کلی دیوارهای برشی فولادی براساس میزان مقاومت ورق جان در برابر کمانش قطری در سه دستهٔ زیر قرار می‌گیرند:

۱) **دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده:** در این نوع از دیوار، نیروی برشی وارد بر دیوار، عمدتاً توسط عملکرد میدان‌های کششی در ورق جان تحمل می‌شود.




شکل ۱۳: دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده

۲ **دیوار برشی فولادی به همراه سخت‌کننده:** در این دیوارها با استفاده از ورق‌های سخت‌کنندهٔ افقی و قائم که عمود بر مقطع ورق جان قرار می‌گیرند، عملاً ظرفیت کمانشی ورق جان افزایش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت باربری جانبی این نوع دیوار بیشتر از دیوارهای بدون سخت‌کننده خواهد بود. شایان ذکر است که نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شکل‌پذیری تأمین شده توسط این دیوارها ممکن است کمتر از دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده باشد.



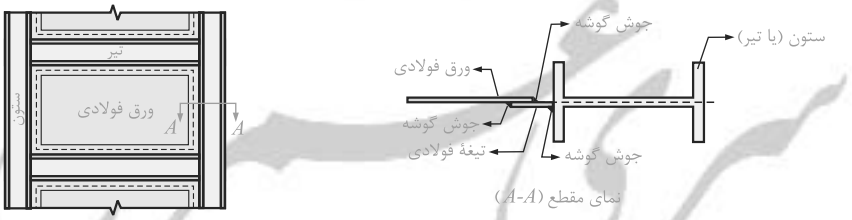
شکل ۱۴: دیوار برشی فولادی به همراه سخت‌کننده

۳ **دیوار برشی فولادی مرکب (ترکیب فولاد و بتن):** در این نوع از دیوارهای برشی فولادی، از پوشش بتنی به‌عنوان سخت‌کنندهٔ دیوار در یک یا دو طرف ورق جان استفاده می‌شود. این لایهٔ بتن سختی جانبی مناسبی را برای ورق فولادی ایجاد کرده و از کمانش آن جلوگیری می‌کند. معمولاً ضخامت مناسب این لایهٔ بتن برای پوشش دو طرف ورق جان برابر $10cm$ و برای پوشش یک طرف ورق جان برابر $20cm$ توصیه می‌شود. به این نکته دقت کنید که برای عملکرد مشترک فولاد و بتن در این‌گونه از دیوارها، استفاده از برشگیر الزامی خواهد بود.

شکل ۱۵: نمونه‌ای از جزئیات دیوار برشی فولادی با پوشش بتنی (به‌صورت شماتیک)

### A-۳-۲- جزئیات اجرایی دیوار برشی فولادی

در دیوارهای برشی فولادی، اتصال ورق فولادی جان به تیرها و ستون‌های اطراف خود می‌تواند توسط پیچ و یا جوش صورت گیرد. برای این منظور، معمولاً شیوهٔ اجرای این سازه‌ها به این صورت است که یک تیغهٔ فولادی به تیر و ستون جوش داده شده و سپس ورق جان به این تیغه متصل خواهد شد. توصیه می‌شود در صورتی‌که از جوش برای اجرای این اتصال استفاده می‌شود، جوش به‌صورت پیوسته و در تمام طول ورق اجرا گردد.



شکل ۱۶: نمونه‌ای از اتصالات دیوار برشی فولادی به ستون یا تیر

### A-۳-۳- مزایای دیوار برشی فولادی

هر چند غالباً دیوار برشی بتنی در سازه‌های بتنی و دیوار برشی فولادی در سازه‌های فولادی استفاده می‌شوند، ولی می‌توان به‌طور نسبی مزیت‌هایی را برای دیوارهای برشی فولادی نسبت به بتنی در نظر گرفت که عبارتند از:

۱- **کاهش وزن سازه:** مصالح فولادی بسیار سبک‌تر از مصالح بتنی هستند و به‌همین دلیل استفاده از دیوار برشی فولادی می‌تواند باعث کاهش بارهای ثقلی ساختمان و در نتیجه کاهش بارهای جانبی زلزله شود.

۲- **افزایش سرعت اجرا:** در اجرای ساختمانی با سیستم دیوار برشی بتنی، عملاً اجرای کف‌های هر طبقه از ساختمان وابسته به اجرای دیوارهای متصل به آن کف می‌باشد، ولی دیوارهای برشی فولادی در کارخانه تولید شده و همزمان با نصب اسکلت ساختمان فولادی اجرا می‌شوند که این موضوع باعث سرعت بیشتر در اجرای بتن‌ریزی سقف‌ها می‌شود.

۳- **افزایش فضای مفید معماری:** ضخامت ورق جان در دیوارهای برشی فولادی از $3\,mm$ تا $12\,mm$ متغیر است، در حالی‌که ضخامت دیوارهای برشی بتنی به‌طور معمول از $30\,cm$ شروع شده و می‌تواند تا $80\,cm$ و یا حتی بیش از آن افزایش یابد. در نتیجه واضح است که دیوارهای برشی فولادی فضای معماری بسیار کمتری را اشغال می‌کنند.

۴- **شکل‌پذیری بالا:** اصولاً مصالح فولادی دارای ظرفیت شکل‌پذیری مناسب‌تری نسبت به مصالح بتنی هستند که این موضوع باعث افزایش توان اتلاف انرژی توسط یک دیوار برشی فولادی نسبت به یک دیوار برشی بتنی (در شرایط تقریباً برابر) خواهد شد.

## A-۴- دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح

در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران، یکی از سیستم‌های رایج ساخت و ساز در بافت‌های روستایی و حتی شهرهای کم جمعیت، سیستم‌های ساختمانی با مصالح بنایی می‌باشد. در این مناطق، سیستم‌های بنایی به‌دلیل دسترسی راحت به مصالح آنها و اجرای آسان و هزینهٔ نسبتاً پایین، پر طرفدار هستند و از این‌رو ساختمان‌های بنایی بسیاری در سطح کشور ساخته شده است. از طرف دیگر، در زلزله‌های مخرب سال‌های گذشته، نظیر زلزلهٔ طبس، زلزلهٔ رودبار- منجیل و همچنین زلزلهٔ دلخراش بم، این سازه‌ها عملکرد بسیار ضعیفی از خود نشان داده و غالباً تخریب شده‌اند.

شکل ۱۷: خرابی یک نمونه از سازهٔ بنایی در زلزله

آسیب‌های مالی و جانی بسیار زیادی که در طی این حوادث در سالیان گذشته ایجاد شده است، جامعهٔ مهندسی و علمی کشور را بر آن داشته تا راه‌کارهایی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی موجود نظیر مدارس قدیمی، بیمارستان‌ها و آثار تاریخی ارائه داده و همچنین جزئیات مناسبی را برای باربری جانبی ساختمان‌های بنایی که در آینده اجرا می‌شوند طراحی کنند. با توجه به این موضوع، استاندارد ۲۸۰۰ ضوابطی را برای مسلح کردن ساختمان‌های بنایی و افزایش شکل‌پذیری آنها ارائه کرده و مطابق با آن، دو نوع ساختمان بنایی را پیشنهاد می‌دهد:

۱- ساختمان با دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح

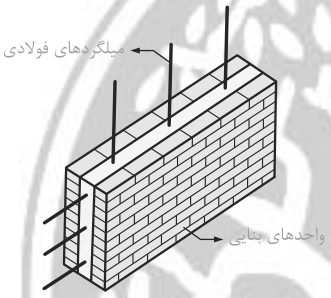
۲- ساختمان بنایی محصور شده با کلاف

در مورد ساختمان بنایی محصور شده با کلاف به‌طور کامل در فصل دهم این کتاب بحث شده است، به‌همین دلیل در اینجا نکاتی را در ارتباط با ساختمان‌های با دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح به شما عزیزان ارائه می‌کنیم.

### A-۴-۱- ساختمان با دیوار بنایی مسلح

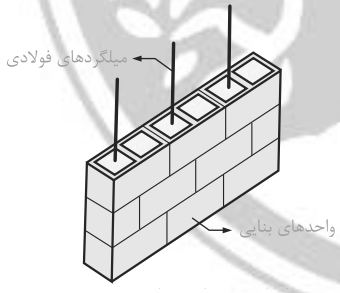
ساختمان با دیوار بنایی مسلح ساختمانی است که با استفاده از مصالحی نظیر آجر، سنگ، بلوک سیمانی و یا ترکیبی از آنها ساخته شده و در دیوارهای آن از میلگردهای فولادی برای افزایش مقاومت جانبی و شکل‌پذیری استفاده می‌شود. در حقیقت می‌توان گفت که مسلح کردن دیوارهای بنایی در این ساختمان‌ها به دو روش می‌تواند انجام شود که در ادامه آنها را بررسی می‌کنیم.

۱) **دیوار بنایی مسلح با ملات روان:** در این نوع از دیوار بنایی مسلح، در دو وجه دیوار مصالحی مانند آجر رسی، آجر سیمانی توپر یا قطعات سنگی قرار داده می‌شود و در حد فاصل بین آنها با ملات روان پر می‌گردد (اصطلاحاً ملات تزریق می‌شود). در فضای پر شده با ملات روان آرماتورهای فولادی برای تقویت به کار برده شده که نقش پیوستگی و ارتباط دو وجه دیوار را به هم دارند. در مجموع می‌توان گفت که در دیوار بنایی مسلح با ملات روان، یک هستهٔ بتنی مسلح بین دو لایهٔ مصالح بنایی قرار می‌گیرد که می‌تواند سختی و مقاومت مورد نیاز در برابر بارهای جانبی را ایجاد کند.



شکل ۱۸: دیوار بنایی مسلح با ملات روان

۲) **دیوار بنایی مسلح با آجر مجوف:** در این نوع از دیوار بنایی مسلح، آرماتورهای قائم فولادی درون حفره‌های مصالح بنایی مجوف (مانند آجر رسی یا سیمانی مجوف) قرار می‌گیرد و سپس این حفره‌ها توسط ملات یا بتن پر می‌شوند. همچنین آرماتورهای افقی فولادی نیز در داخل بندهای افقی بین آجرها یا در داخل آجرهای عرضی قرار می‌گیرند.



شکل ۱۹: دیوار بنایی مسلح با آجر مجوف

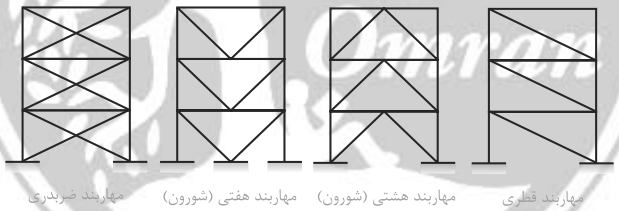
در قسمت دوم این پیوست، چه خواهیم خواند؟

در این قسمت می‌خواهیم با سیستم مهاربندهای فولادی که یکی از مهمترین و پرکاربردترین سیستم‌های باربر جانبی در سازه‌های فولادی هستند، آشنا شویم. همچنین مهاربندهای کمانش‌تاب و نیز برخی از جزئیات اجرایی در سیستم مهاربندهای فولادی را بررسی خواهیم کرد.

## B-۱- انواع مهاربندهای فولادی

در سازه‌های فولادی یکی از متداول‌ترین راه‌کارهایی که برای انتقال بار جانبی وارد بر سازه به فونداسیون به‌کار می‌رود، استفاده از مهاربند در قاب‌ها می‌باشد[۱]. به‌طور کلی مهاربندهای فولادی براساس محل تقاطع محور طولی مهاربند با محور طولی تیر (و یا ستون) به دو دستهٔ مهاربندهای همگرا و مهاربندهای واگرا تقسیم می‌شوند که در ادامه دربارهٔ آنها صحبت می‌کنیم.

**۱- مهاربندهای همگرا:** اگر محور طولی مهاربندها از محل تقاطع تیر و ستون‌ها عبور کند یا نقطهٔ انتهایی دو مهاربند موجود در یک قاب در یک محل مشترک به تیر برخورد کنند، به آنها مهاربندهای همگرا گفته می‌شود. این دسته از مهاربندها شامل انواع مختلفی هستند که کاربردی‌ترین آنها را در شکل‌های زیر مشاهده می‌کنید:




شکل ۲۰: انواع مهاربندهای همگرا (مناسب برای مناطق لرزه‌خیز)

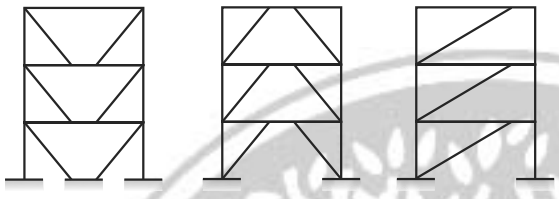
**تذکر:** مهاربندهای $K$ شکل، دروازه‌ای و نیم دروازه‌ای از دیگر انواع مهاربندهای همگرا هستند که مبحث دهم مقررات ملی ساختمان آنها را به‌عنوان سیستم باربر جانبی تحت بار زلزله نمی‌پذیرد، اما در سازه‌هایی که نیروی باد به‌عنوان نیروی جانبی بحرانی شناخته می‌شود (مانند سوله‌ها) می‌توان از این نوع مهاربندها نیز استفاده کرد.

شکل ۲۱: برخی از انواع مهاربندهای همگرا (نامناسب برای مناطق لرزه‌خیز)

۱- به ندرت پیش می‌آید که از مهاربندهای فولادی در ساختمان‌های بتنی نیز استفاده شود، هر چند استفاده از این روش برای طرح‌های مقاوم‌سازی قاب‌های بتنی (با شرایط خاص) چندان دور از انتظار نیست.

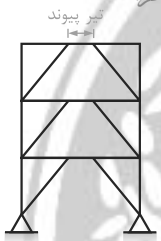
زیر شاخه‌های اصلی قسمت دوم
B-۱- انواع مهاربندهای فولادی
B-۲- عملکرد قاب‌های مهاربندی شده
B-۳- مهاربندهای کمانش‌تاب
B-۴- جزئیات اجرایی قاب‌های مهاربندی شده

**۲- مهاربندهای واگـرا:** در قـاب‌هـای مهاربنـدی شدهٔ واگرا، محل تقاطع محور طولی مهاربند و تیر فاصلهٔ اندکی با اتصال تیر و سـتون دارد و یـا دو مهاربنـد در یـک قـاب از یـک نقطـهٔ مشترک در تیر عبور نمی‌کنند. این دسته نیـز شامل حالت‌های مختلفی از مهاربنـدها اسـت که مهمترین آنها به‌صورت روبرو می‌باشند:



شکل ۲۲: برخی از انواع مهاربندهای واگرا

در یک قاب مهاربندی شدهٔ واگرا به قسمتی از تیر کـه بـین انتهـای مهاربنـد و محـل اتصال تیر و ستون یا بین انتهای دو مهاربند روی محور تیر قرار مـی‌گیـرد، تیـر پیونـد گفته شده و طول آن با پارامتر «$e$» نشان داده می‌شود.

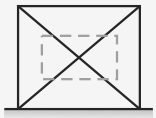


شکل ۲۳: ناحیهٔ تیر پیوند

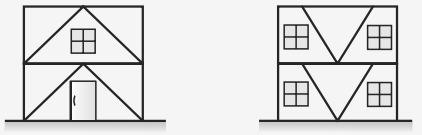
دید مهندسی

یکی از مواردی‌که همواره در استفاده از مهاربند در ساختمان‌های فولادی مورد توجه قرار می‌گیرد، چگـونگی طرح معماری ساختمان و عدم تداخل مهاربندها با عناصر معماری نظیر در و پنجره است. دربارهٔ این موضـوع می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱- در صورت استفاده از مهاربند همگـرای ضـربدری در یـک چـشمه از قـاب، عمـلاً فضایی برای ایجاد در یا پنجره در آن چشمه وجود ندارد و اصطلاحاً چـشمه کـور می‌شود.


شکل ۲۴: تداخل مهاربند ضربدری با عناصر معماری مانند پنجره

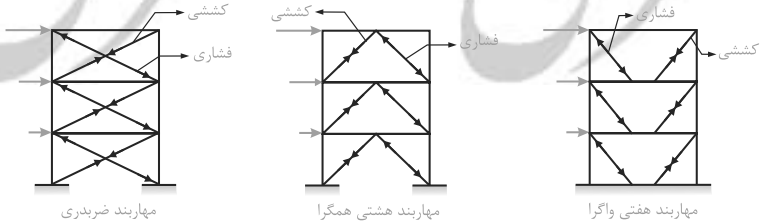
۲- استفاده از مهاربندهای ۷ و ۸ می‌تواند از لحاظ معمـاری امکـان ایجـاد بازشـوهای مناسـبی را بـرای تعبیـهٔ در و پنجـره‌هـا فراهم کند.



شکل ۲۵: امکان عدم تداخل مهاربندهای شورون با عناصر معماری

## B-۲- عملکرد قاب‌های مهاربندی شده

در سیستم قاب‌های مهاربندی شده، بار جانبی توسط رفتار محوری مهاربندها تحمل شده و به ستون‌های اطراف قاب و در نهایت فونداسیون انتقال می‌یابد. برای درک بهتر این موضوع به شکل‌های زیر توجه کنید:



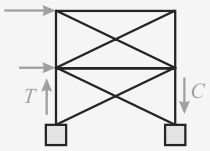
شکل ۲۶: نیروهای کششی و فشاری ایجاد شده در اعضای مهاربندی تحت بارهای جانبی وارد بر سازه

در قاب‌های شکل صفحهٔ قبل مشاهده می‌کنید که در اثر اعمال بار جانبی، مهاربندهایی که دارای شیب هم جهت با نیروی جانبی هستند تحت کشش قرار گرفته و مهاربندهایی که در جهت مخالف قرار دارند تحت فشار قرار می‌گیرند. شایان ذکر است از آنجا که نیروی زلزله به‌صورت رفت و برگشتی به سازه اعمال می‌شود، با عوض شدن جهت نیروی زلزله رفتار مهاربندها نیز معکوس خواهد شد.

● **دقت:** رفتار مهاربندهای قطری نیز شبیه مهاربندهای ضربدری بوده با این تفاوت که تمام برش وارد بر قاب به‌صورت فشاری یا کششی توسط مهاربند قطری موجود در قاب تحمل خواهد شد. از همین‌رو برای پایداری بهتر قاب در مقابل اثر زلزله در هر دو جهت، توصیه می‌شود که مهاربندهای قطری به‌صورت زوج در قاب به‌کار روند.

**دید مهندسی**

در قاب‌های مهاربندی شده، معمولاً نیروهای کششی و فشاری به‌وجود آمده در مهاربندها به ستون‌های اطراف دهانهٔ مهاربندی شده منتقل می‌شوند. بنابراین ستون‌هایی که در کشش قرار می‌گیرند، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کنترل تنش‌های زیر خاک فونداسیون گذاشته و ممکن است باعث بلند شدن آن شوند که برای رفع این مشکل بعضاً نیاز است تا تدابیری نظیر استفاده از شمع‌های کششی اندیشیده شود.

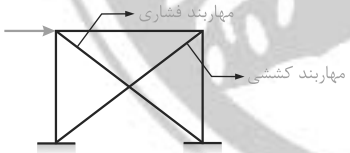


شکل ۲۷: تأثیر نیروی محوری در ستون‌های قاب مهاربندی شده

در ادامهٔ بحث، رفتار مهاربندهای همگرا و واگرا را بیشتر بررسی خواهیم کرد.

### B-۲-۱- مهاربندهای همگرا

در یک قاب مهاربندی شدهٔ همگرا، هنگامی‌که نیروی جانبی به سازه وارد می‌شود یکی از مهاربندها در کشش بوده و دیگری به فشار می‌افتد. تحقیقات آزمایشگاهی و مطالعات دقیق مهندسی در چنین قاب‌هایی دو حالت رفتاری را نشان می‌دهد که به‌صورت زیر بیان می‌شوند:



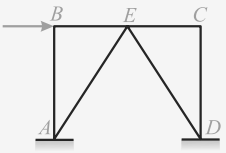
شکل ۲۸: قاب با مهاربند ضربدری

۱) اگر بارگذاری جانبی وارد بر سازه ناشی از اثر باد یا اثر زلزله‌های خفیف و متوسط باشد، رفتار مهاربندها در محدودهٔ ارتجاعی می‌باشد. در این حالت با توجه به اینکه مصالح فولادی، مصالحی با رفتار یکسان در کشش و فشار هستند (اصطلاحاً رفتاری همسانگرد دارند)، هر دو مهاربند سختی و مقاومت یکسانی از خود نشان می‌دهند.

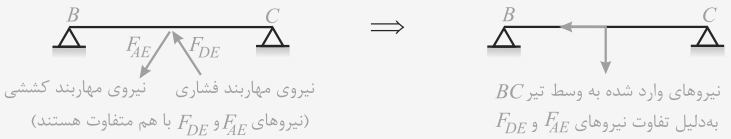
۲) اگر بارگذاری جانبی ناشی از اثر زلزله‌ای قوی باشد، نیروی محوری وارد شده به مهاربندها زیاد بوده و مهاربند فشاری غالباً کمانش می‌کند. در این شرایط با افت سختی و مقاومت در مهاربند فشاری، سهم نیروی مهاربند کششی بیشتر شده و ممکن است مهاربند کششی در مقابل این نیروی افزایش یافته، تسلیم شود. کمانش مهاربند فشاری و تسلیم مهاربند کششی در هنگام زلزله‌های بزرگ حالتی است که در قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرا به وفور ایجاد می‌شود و به همین دلیل آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های فولادی ضوابطی را برای در نظر گرفتن اثرات ناشی از این نوع رفتار در قاب‌های همگرا ارائه می‌کنند که نمونه‌ای از آن را در ادامه بررسی می‌کنیم.

دید مهندسی

قاب شکل مقابل که در آن از مهاربندهای همگرای هشتی استفاده شده است را در نظر بگیرید. در اثر اعمال نیروی جانبی کم به سازه، رفتار هر دو مهاربند ارتجاعی بوده و نیروی محوری ایجاد شده در آنها با یکدیگر برابر خواهد بود. از سوی دیگر در اثر اعمال نیروی زلزله‌ای قوی به سازه می‌توان گفت که پس از کمانش مهاربند فشاری (مهاربند $DE$)، مقدار نیروهای کششی و فشاری در دو مهاربند با یکدیگر متفاوت شده و این مسئله باعث می‌شود تا نیروهای جدیدی به تیر $BC$ وارد شود که در شکل زیر آنها را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۹: قاب با مهاربند همگرای هشتی



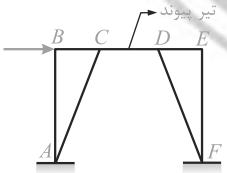
شکل ۳۰: تأثیر نیروهای نامتعادل‌کننده مهاربند همگرای هشتی بر تیر

با توجه به این موضوع، آیین‌نامهٔ طرح لرزه‌ای سازه‌های فولادی ضوابطی را ارائه می‌دهد که مطابق با آنها باید اثرات نیروهای نامتعادل‌کننده که ناشی از کمانش مهاربند فشاری است را در طراحی در نظر بگیریم.

### B-۲-۲- مهاربندهای واگرا

قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرا دارای سختی مناسبی در برابر بارهای جانبی هستند، ولی تحقیقات مهندسین عمران نشان می‌دهد که شکل‌پذیری آنها ایده‌آل نیست. برای بهبود شکل‌پذیری قاب‌های مهاربندی شده می‌توان از مهاربندهای واگرا استفاده نمود، البته باید توجه داشت که هزینه‌های اجرایی قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرا (در صورت طراحی و اجرای صحیح) غالباً بیشتر از قاب‌های مهاربندی شدهٔ همگرا می‌باشد.

یک قاب مهاربندی شدهٔ واگرا را مطابق شکل مقابل در نظر بگیرید. هنگامی‌که این قاب تحت اثر نیروهای جانبی قرار می‌گیرد، در ناحیهٔ تیر پیوند علاوه بر لنگر خمشی و نیروی برشی کم ناشی از بارهای ثقلی، لنگر خمشی و نیروی برشی بسیار بزرگتری به‌وجود می‌آید. با توجه به این موضوع طراحی قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرا طوری انجام می‌شود که:



شکل ۳۱: قاب با مهاربند واگرای هشتی

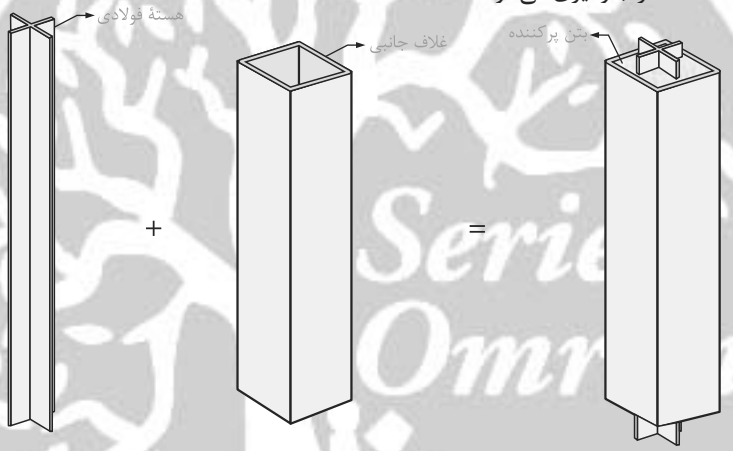
۱- مهاربندهای $AC$ و $FD$ رفتاری ارتجاعی داشته باشند، به این معنی که مقاومت آنها آنقدر بالا باشد که تحت فشار کمانش نکرده و تحت کشش جاری نشوند.

۲- در تیر پیوند $CD$ به‌دلیل نیروی برشی و لنگر خمشی زیاد، باید رفتار غیر ارتجاعی (اصطلاحاً مفصل پلاستیک) به‌وجود آید. در این‌صورت نقش اصلی جذب و استهلاک انرژی ناشی از زلزله در تیر پیوند خواهد بود.

۳- در صورتی‌که طول تیر پیوند کوتاه باشد، تأثیر نیروی برشی در آن بیشتر از تأثیر لنگر خمشی است و اصطلاحاً می‌گوییم تیر پیوند رفتار برشی دارد، در غیر این‌صورت اگر طول تیر پیوند زیاد باشد، رفتار خمشی در آن غالب می‌شود.

## B-۳- مهاربندهای کمانش‌تاب

یکی از نقاط ضعفی که همواره برای مهاربندهای متداول فولادی عنوان می‌شود، اختلاف بین ظرفیت آنها تحت نیروی فشاری و کششی است، به‌طوری‌که اغلب قبل از جاری شدن مهاربند کششی و رسیدن آن به ظرفیت نهایی خود، مهاربند فشاری کمانش کرده و در نتیجه سختی و مقاومت قاب کاهش خواهد یافت. راه‌کار جالبی که مهندسین عمران در سال‌های اخیر برای رفع این مشکل پیشنهاد کرده‌اند، ایدهٔ استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب (*BRB*)[1] می‌باشد. در این مهاربندها با قرار گرفتن یک غلاف بتنی روی هستهٔ فولادی، از کمانش قطعهٔ مرکزی فولادی تحت فشار جلوگیری می‌شود.

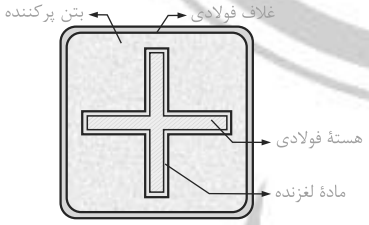


شکل ۳۲: اجزای تشکیل‌دهندهٔ مهاربند کمانش‌تاب

قسمت‌های اصلی یک مهاربند کمانش‌تاب با توجه به شکل بالا عبارتند از:

۱) **هستهٔ فولادی:** این قسمت از مهاربند وظیفهٔ تحمل بارهای محوری را داشته و به‌گونه‌ای طراحی شده است که تحت بارهای فشاری یا کششی تسلیم شود.

۲) **غلاف محصورکنندهٔ مهاربند:** به‌منظور محدود کردن هستهٔ مرکزی مهاربند در برابر کمانش، آن را داخل یک لوله یا قوطی فولادی قرار می‌دهند که با استفاده از بتن و یا ملات، درون آن پر خواهد شد. همچنین برای جلوگیری از انتقال نیروی محوری مهاربند از هستهٔ فولادی به بتن اطراف آن، ماده‌ای غیرچسبنده ولی لغزنده بین هستهٔ فولادی و بتن اطراف آن قرار می‌گیرد تا اصطکاک بین بتن و فولاد حذف گردد.



شکل ۳۳: جزئیات مقطع مهاربند کمانش‌تاب

۳) **ناحیهٔ اتصال:** در صورتی‌که غلاف بتنی تا محل اتصال مهاربند به قاب ادامه یابد، مقداری از نیروی محوری مهاربند به آن منتقل خواهد شد، بنابراین برای جلوگیری از انتقال این نیرو، غلاف بتنی تا ناحیهٔ اتصال ادامه نمی‌یابد و به‌جای آن مقطع مهاربند در این ناحیه تقویت خواهد شد (برای جلوگیری از متمرکز شدن تنش‌ها در ناحیه اتصال).

---

1- *Buckling Restrained Brace*

شکل ۳۴: کاربرد مهاربندهای کمانش‌تاب

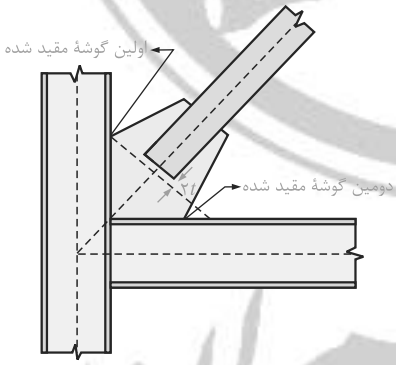
● **دقت:** با توجه به اینکه مقطع مهاربندهای کمانش‌تاب نسبت به مهاربندهای معمول بزرگ‌تر بوده و عملاً امکان جداسازی مقطع آنها در طول مهاربند وجود ندارد، برای استفاده از آنها در ساختمان‌های فولادی لزوماً باید از سیستم مهاربند قطری یا شورون استفاده شود و نمی‌توان سیستم مهاربندی ضربدری را استفاده کرد. در شکل مقابل نمونه‌ای از کاربرد مهاربندهای کمانش‌تاب را مشاهده می‌کنید.

## B-۴- جزئیات اجرایی قاب‌های مهاربندی شده

در قاب‌های مهاربندی شده، اتصال مهاربند به تیر و ستون‌های قاب، توسط جوش یا پیچ و از طریق ورق‌های ثانویهٔ اتصال (گاست پلیت) صورت می‌گیرد. نتایج آزمایش‌های مختلف روی این نوع از اتصالات که با ورق انجام می‌شود، نشان می‌دهد که آنها عملاً رفتاری مفصلی دارند و لنگر خمشی را انتقال نمی‌دهند. در ادامه به بررسی دقیق‌تری از جزئیات اتصالات مهاربندها می‌پردازیم:

### B-۴-۱- اتصال مهاربندهای همگرا به محل تقاطع تیر و ستون

در این اتصالات معمولاً ورق اتصال به‌صورت مربعی، مستطیل شکل یا کشیده در نظر گرفته شده و مهاربند با استفاده از جوش یا پیچ به آن متصل می‌شود. از طرف دیگر طبق توصیهٔ آیین‌نامه‌های طراحی اعضای فولادی در مهاربندهای همگرا که امکان کمانش برون صفحهٔ مهاربند وجود دارد، باید شرایطی در محل اتصال فراهم شود تا ورق اتصال بتواند شکل‌پذیری مناسبی را از خود نشان دهد. به‌همین دلیل توصیه شده است که بین انتهای مهاربند تا اولین گوشهٔ مقید شدهٔ مهاربند (که در شکل مقابل با خطچین نشان داده شده است)، فاصلهٔ عمودی به اندازهٔ حداقل دو برابر ضخامت ورق اتصال (اصطلاحاً فاصلهٔ $2t$) وجود داشته باشد تا ورق اتصال بتواند به راحتی حول آن خم شود.



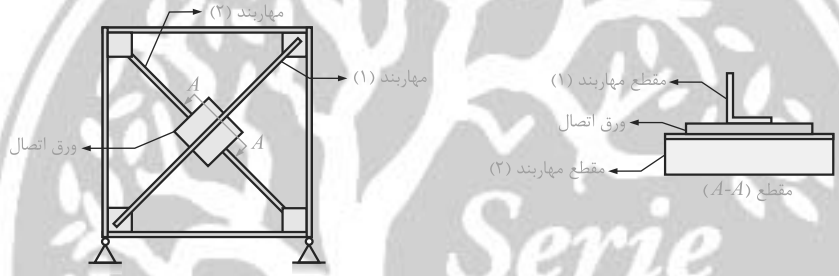

شکل ۳۵: رعایت فاصلهٔ $2t$ در محل اتصال مهاربند

### B-۴-۲- اتصال میانی در مهاربندهای ضربدری

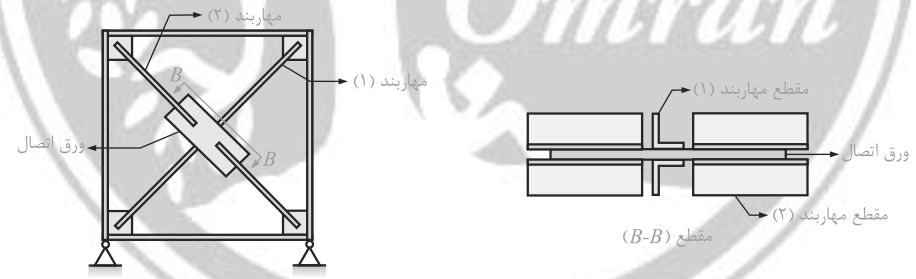
معمولاً در سازه‌های فولادی مقطع مورد استفاده برای مهاربندها به‌صورت یکی از شکل‌های زیر می‌باشد:

- دوبل نبشی (⊥⊥ و ◇)
- دوبل ناودانی ([ [ و ] ])
- مقاطع نورد شده (□ و I)
- تک نبشی (L)

در یک قاب با مهاربند ضربدری، در مواردی‌که مقطع مهاربند از یک پروفیل تک تشکیل شده باشد، هر یک از مهاربندها در یک سمت ورق میانی اتصال قرار گرفته و برخوردی با یکدیگر ندارند. اما در صورتی‌که مقطع مهاربند از دو پروفیل تشکیل شده باشد یا به‌صورت یک مقطع بسته باشد، یکی از مهاربندها باید در وسط دهانه به‌طور کامل قطع شده و توسط ورق اتصال میانی پیوستگی آن کامل گردد. در این حالت کل نیروی انتقالی عضو قطع شده در مقطع میانی، توسط ورق اتصال انتقال می‌یابد (در این حالت برای پیوستگی بهتر مهاربند قطع شده پیشنهاد می‌شود که این ناحیه از اتصال تقویت گردد).




شکل ۳۶: جزئیات اتصال میانی در یک قاب با مهاربند ضربدری از مقطع تک نبشی

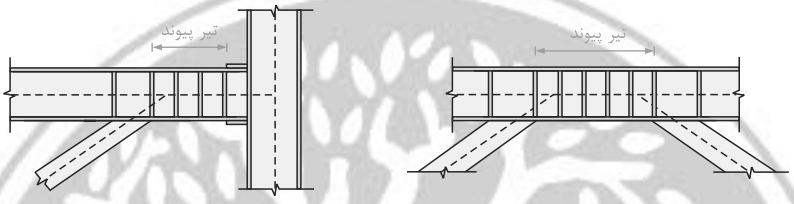



شکل ۳۷: جزئیات اتصال میانی در یک قاب با مهاربند ضربدری از مقطع دو پل نبشی

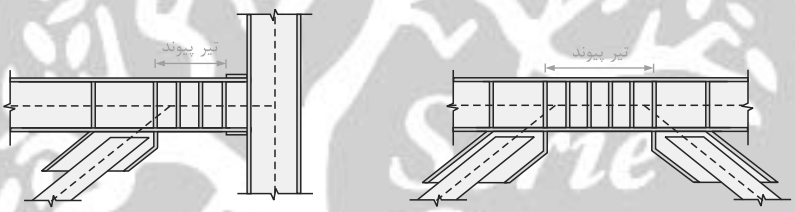
### B-۴-۳- اتصالات در قاب مهاربندی شدهٔ واگرا

مهاربندهای قطری یا شورون واگرا می‌توانند به‌صورت مستقیم و با استفاده از جوش به تیر متصل شوند و یا اینکه با استفاده از ورق اتصال به‌صورت مفصلی به تیر وصل شوند (توجه کنید که در صورت اتصال مستقیم مهاربند به تیر، اتصال این دو به یکدیگر مفصلی نیست، البته این نوع از اتصال به دلیل پیچیدگی‌های اجرایی، در ایران مرسوم نمی‌باشد). همچنین تیر پیوند در قاب‌های مهاربندی شدهٔ واگرا می‌تواند به‌صورت مفصلی یا گیردار به ستون مجاور خود متصل شود، به‌طوری‌که اگر تیر پیوند در کنار ستون قرار گیرد (در قاب با مهاربندهای واگرای قطری)، اتصال آن به‌ستون باید از نوع خمشی باشد ولی اگر تیر پیوند در میانهٔ تیر طبقه و بین انتهای دو مهاربند واقع شده باشد (در قاب با مهاربندهای واگرای هفتی یا هشتی)، تیر طبقه می‌تواند به‌صورت مفصلی نیز به ستون متصل شود، هر چند در این حالت پتانسیل استهلاک انرژی و شکل‌پذیری سیستم کاهش می‌یابد.

در شکل‌های زیر انواع مختلف اتصال مهاربند به تیر پیوند و سخت‌کننده‌های استفاده شده در تیر پیوند را مشاهده می‌کنید.




شکل ۳۸: اتصال مهاربند واگرا به‌صورت مستقیم به تیر (به همراه سخت‌کننده‌های استفاده شده در تیر)




شکل ۳۹: اتصال مهاربند واگرا با ورق اتصال به تیر (به همراه سخت‌کننده‌های استفاده شده در تیر)

● **دقت:** در اتصالات انتهای مهاربندهای واگرا نیازی به در نظر گرفتن فاصلهٔ $2t$ مشابه مهاربندهای همگرا نیست، زیرا مهاربندهای واگرا به‌صورت ارتجاعی طراحی می‌شوند و نباید در آنها کمانشی اتفاق بیفتد.

در قسمت سوم این پیوست، چه خواهیم خواند؟

در این قسمت می‌خواهیم با سیستم سازه‌ای قاب خمشی آشنا شویم که به‌عنوان یکی از مهمترین سیستم‌های باربر جانبی محسوب می‌شود. همچنین در انتهای این قسمت سیستم‌های دوگانه را که ترکیبی از سیستم قاب خمشی با سیستم‌های معرفی شده در قسمت‌های قبل (سیستم دیوار برشی یا مهاربندی) می‌باشند را به شما عزیزان معرفی می‌کنیم.

## C-۱- سیستم قاب خمشی

قاب‌های خمشی یکی از سیستم‌های رایج در سازه‌های فولادی و بتنی هستند که در آنها از اتصالات صلب تیر به ستون استفاده می‌شود. در یک سیستم قاب خمشی به‌دلیل استفاده نکردن از مهاربند یا دیوار برشی در قاب‌ها، فضای بین چشمه‌های قاب محدود نشده و امکان بسیار مناسبی برای ایجاد طرح‌های دلخواه در اختیار مهندس معمار قرار می‌گیرد. سیستم قاب‌های خمشی عموماً دارای رفتاری شکل‌پذیر با قابلیت استهلاک انرژی مناسبی هستند. از سوی دیگر در قاب‌های خمشی به واسطهٔ سختی جانبی نسبتاً کم، معمولاً تغییرمکان جانبی بیشتری نسبت به قاب‌های مهاربندی شده در آنها ایجاد می‌گردد و این موضوع باعث می‌شود که در بیشتر مواقع، کنترل تغییرمکان جانبی در این سیستم‌ها کنترل کنندهٔ طراحی سازه شود.

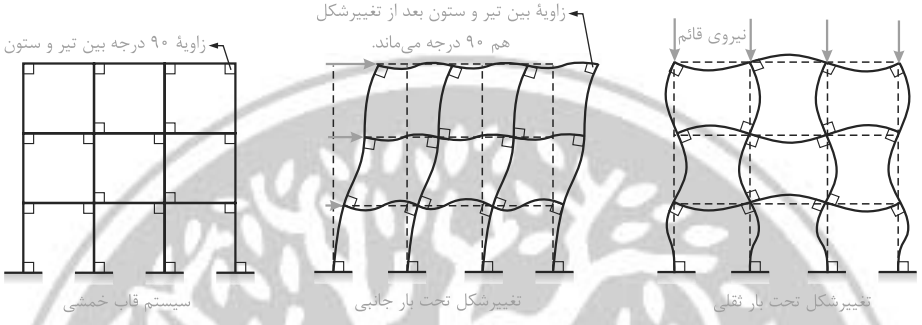
### C-۱-۱- عملکرد قاب‌های خمشی

ویژگی اصلی و متمایزکنندهٔ سیستم قاب خمشی با سایر سیستم‌های سازه‌ای، اتصال صلب تیر به ستون و همچنین ستون به فونداسیون می‌باشد که در نتیجهٔ این اتصالات، نیروهای جانبی توسط رفتار خمشی - برشی ستون‌ها و تیرها تحمل خواهند شد. همان‌طورکه همهٔ شما می‌دانید در یک اتصال صلب از چرخش اعضاء نسبت به هم جلوگیری شده و عملاً زاویهٔ اجزای متصل شونده (یعنی زاویهٔ بین تیر و ستون) قبل و بعد از بارگذاری ثابت باقی می‌ماند[1]. در شکل‌های صفحهٔ بعد، نحوهٔ تغییرشکل یک ساختمان با قاب خمشی تحت بارهای ثقلی و جانبی را مشاهده می‌کنید.

۱- به این نکته دقت کنید که عملاً هیچ اتصالی صد درصد صلب و یا مفصلی نبوده و همواره رفتاری بین این دو حالت مشاهده می‌شود، هر چند برای ساده‌سازی تحلیل و طراحی، معمولاً اتصالات به‌صورت صد درصد صلب و یا مفصلی در نظر گرفته می‌شوند.



زیر شاخه‌های اصلی قسمت سوم
C-۱- سیستم قاب خمشی
C -۲- سیستم‌های دوگانه




شکل ۴۰: نحوهٔ تغییرشکل قاب خمشی تحت بار ثقلی و جانبی

**دقت:** هنگامی‌که یک قاب خمشی تحت نیروهای جانبی قرار می‌گیرد، به‌دلیل اتصالات صلب تیر و ستون به یکدیگر، لنگر خمشی و نیروی برشی در تیرها و ستون‌ها ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر بارهای جانبی به علت پیوستگی اعضاء در قاب خمشی، به‌صورت خمش و برش در تیرها و ستون‌ها تحمل شده و سپس به تکیه‌گاه‌های سازه منتقل می‌شوند.

دید مهندسی

قاب‌های خمشی از لحاظ مسائل معماری بسیار مطلوب بوده و آزادی عمل بالایی را ایجاد می‌کنند و همچنین به دلیل عدم وجود اعضای قطری و دیوارهای برشی، امکان تقسیم‌بندی فضاهای داخلی را به‌صورت مناسب‌تری فراهم می‌کنند. با این وجود برخی از ویژگی‌های قاب‌های خمشی، استفاده از آنها را در برخی از پروژه‌ها محدود می‌کند که این موارد عبارتند از:

۱- اتصالات گیردار به‌خصوص در قاب‌های فولادی باید با ضوابط خاصی طراحی و اجرا شوند، به‌همین دلیل معمولاً پر هزینه‌تر و دشوارتر از اتصالات مفصلی می‌باشند.

۲- سختی جانبی قاب‌های خمشی به نسبت قاب‌های با مهاربندی و دیوار برشی کمتر است و به همین دلیل کنترل تغییرشکل‌های جانبی این سازه‌ها در روند طراحی سخت‌تر انجام می‌شود.

۳- برای عملکرد مطلوب قاب‌های خمشی توصیه می‌شود که ستون‌گذاری در پلان این سازه‌ها تا حد ممکن به‌صورت منظم باشد تا ستون‌ها تقریباً در یک ردیف قرار داشته باشند و اجرای اتصالات تیر به ستون بهتر انجام شود. بنابراین می‌توان گفت که نیازمندی قاب‌های خمشی برای ستون‌گذاری تقریباً منظم، نوعی محدودیت برای این سیستم به شمار می‌رود.

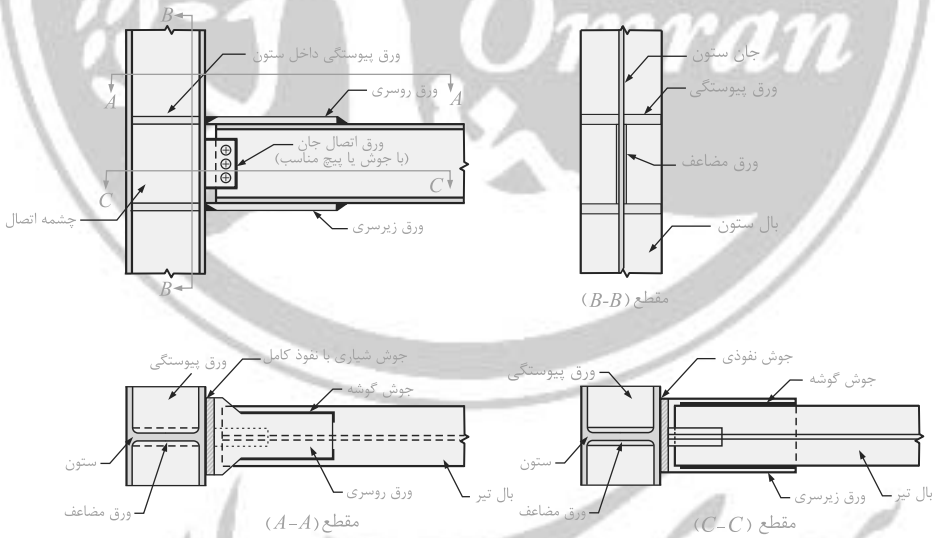
### C-۱-۲- جزئیات اجرایی

در سازه‌های بتنی که با استفاده از بتن‌ریزی درجا ساخته می‌شوند، اصولاً اتصال مفصلی وجود نداشته و همواره اتصال تیر به ستون از نوع گیردار است، به‌همین دلیل می‌توان گفت که در همهٔ سازه‌های بتنی غالباً قاب خمشی وجود دارد. این در حالی است که در سازه‌های فولادی با وجود اینکه امکان ایجاد اتصالات صلب و قاب‌های خمشی وجود دارد، قاب‌های ساده با اتصال مفصلی نیز می‌توانند استفاده شوند که با استفاده از مهاربندها پایدار خواهند شد. به‌همین دلیل می‌توان گفت که در سازه‌های فولادی برای ایجاد اتصال صلب باید جزئیات خاص‌تری برای اتصال در نظر گرفته شود. در ادامه به بررسی نکاتی در ارتباط با جزئیات اجرایی در قاب‌های خمشی می‌پردازیم.

### C-۱-۳- اتصالات قاب خمشی در سازه‌های فولادی

در یک قاب خمشی تمامی سختی و پایداری جانبی قاب، ناشی از اتصالات صلب تیر به ستون است و بـه همـین دلیل می‌توان گفت که مهمترین مسئله در قاب‌های خمشی فولادی، تأمین سـختی و مقاومـت کـافی در محـل اتصال تیر به ستون برای انتقال مناسب لنگر خمشی و نیروی برشی از تیر به ستون می‌باشد. در حـال حاضـر در کشور ما، رایج‌ترین اتصال گیردار در قاب‌های فولادی استفاده از ورق‌های روسری و زیرسری بـرای انتقـال لنگـر خمشی از تیر به ستون و استفاده از اتصال جان تیر به بال ستون برای انتقال نیروی برشی می‌باشد. در ایـن نـوع از اتصال، ورق‌های روسری و زیرسری باید با استفاده از جوش نفوذی به بال ستون متصل شوند و ورق جـان (یـا نبشی جان) با استفاده از پیچ یا جوش به بال ستون متصل خواهد شد.

**دقت:** لنگر خمشی در یک تیر از قاب خمشی به صورت نیروهای محوری داخل ورق‌هـای زیرسـری و روسـری می‌باشد که به بال‌های ستون وارد شده و باعث ایجاد برش در جان ستون (اصطلاحاً **چـشمهٔ اتـصال**) مـی‌شـود. ورق‌های تقویت چشمهٔ اتصال که **ورق‌های مضاعف** گفته می‌شوند، برای کاهش تنش برشی در جان ستون به کار می‌روند و در صورت اجرای جزئیات خاص می‌توانند از ناپایداری جان ستون نیز جلوگیری کننـد. از سـوی دیگـر برای افزایش مقاومت بال و جان ستون در برابر نیروهای منتقل شده به آنها توسط ورق‌های روسری و زیرسـری، از **ورق‌های پیوستگی** در مقابل ورق‌های اتصال استفاده می‌شـوند. دقـت کنیـد کـه لـزوم اسـتفاده از ورق‌هـای پیوستگی و مضاعف در چشمهٔ اتصال باید با استفاده از ضوابط طرح لرزه‌ای سازه‌های فولادی بررسی گردد.

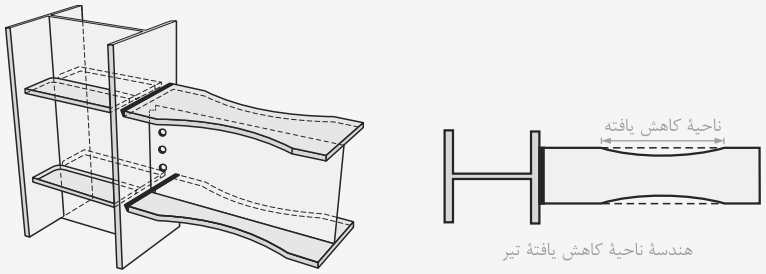



شکل ۴۱: جزئیات اتصال صلب تیر به ستون با ورق روسری و زیرسری

**دید مهندسی**

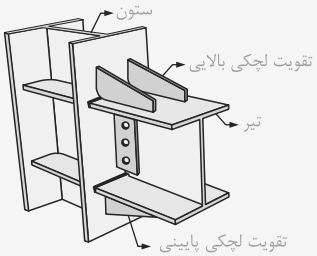
تحقیقات مهندسان عمران در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که در اتصالات قاب خمـشی فـولادی اگـر محـل تشکیل مفصل پلاستیک تیر با فاصله‌ای مناسب از بر ستون باشد و عملاً جوش اتصال تیر به ستون به‌صـورت الاستیک باقی بماند، رفتار بسیار مناسب‌تری در هنگام زلزله در قـاب ایجـاد مـی‌شـود. بـه‌همـین منظـور در سازه‌های فولادی یکی از دو روش زیر برای دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از اتصال تیر بـه سـتون پیشنهاد می‌شود:

۱) **تضعیف تیر:** در این روش، عرض بال تیر در فاصله‌ای مناسب از بر ستون کاهش می‌یابد تا تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی در ناحیهٔ ضعیف شده متمرکز شوند. این نوع از اجرای مقطع تیر در نزدیکی محل اتصال که اصطلاحاً به آن $RBS$[1] گفته می‌شود، در سالیان اخیر بسیار مورد توجه آیین‌نامه‌ها بوده است، زیرا تحقیقات آزمایشگاهی نشان‌دهندهٔ رفتار مناسب آنها تحت نیروهای ناشی از زلزله می‌باشد.




شکل ۴۲: اجرای مقطع تیر با بال کاهش یافته در نزدیکی محل اتصال ($RBS$)

۲) **تقویت محل اتصال:** در این روش، محل اتصال تیر به ستون با افزودن اجزایی نظیر چند لچکی بر روی بال‌های تیر تقویت می‌شود که در نتیجه سختی و مقاومت اتصال افزایش می‌یابد.




شکل ۴۳: نمونه‌ای از اتصال صلب با روش تقویت محل اتصال

● **دقت:** آیین‌نامه‌های روز دنیا تمایل بیشتری به رویکرد اول که با تضعیف تیر خارج از محل اتصال انجام می‌شود نشان داده‌اند و آن را بیشتر توصیه می‌کنند.

### C-۱-۴- قاب خمشی در سازه‌های بتنی

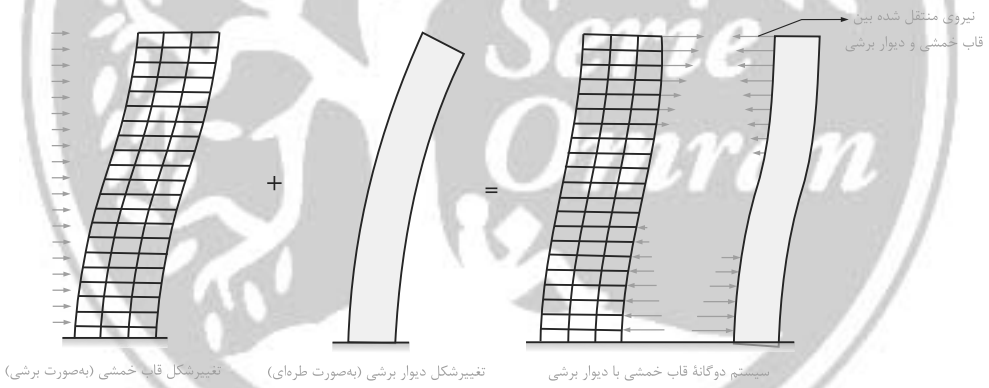
در سازه‌های بتنی نیز مانند سازه‌های خمشی فولادی توصیه می‌شود تا ناحیهٔ اتصال تیر به ستون از سختی و مقاومت کافی برای انتقال لنگر خمشی و نیروی برشی برخوردار باشد. به‌همین منظور آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی با ارائهٔ ضوابطی پیشنهاد می‌کنند تا در تیرهای اصلی یک سازهٔ بتنی در طولی حداقل معادل دو برابر ارتفاع تیر از بر ستون باید آرماتورگذاری عرضی ویژه صورت گیرد. در ستون‌ها نیز در ناحیهٔ بحرانی نزدیک اتصال باید این آرماتورگذاری برشی ویژه اجرا گردد که طول این ناحیه در یک ستون، به ارتفاع ستون و ابعاد مقطع آن وابسته است.

1- *Reduced Beam Section*

## C-۲- سیستم‌های دوگانه

سیستم‌های ساختمانی دوگانه در سازه‌های فولادی یا بتنی، متشکل از قاب‌های خمشی به همراه دیوار برشی یا مهاربند می‌باشند. در این نوع از سیستم سازه‌ای، بارهای ثقلی عموماً توسط قاب‌های ساختمانی تحمل شده و دیوار برشی یا قاب‌های مهاربندی شده عمدهٔ سختی و مقاومت جانبی سازه را در برابر بارهای جانبی ایجاد می‌کنند.

در یک سیستم دوگانه به‌دلیل عملکرد همزمان قاب خمشی و دیوار برشی (یا مهاربندها)، برش طبقه به نسبت سختی که هر یک از این سیستم‌ها در سازه ایجاد می‌کنند بین آنها توزیع می‌شود. البته به این نکتهٔ مهم دقت کنید که نحوهٔ عملکرد قاب خمشی با عملکرد دیوار برشی (یا مهاربند) کاملاً متفاوت است، به این معنی که دیوارهای برشی (یا مهاربندها) تحت بارهای جانبی رفتاری طره‌ای (خمشی) دارند و از سوی دیگر قاب‌های خمشی با یک رفتار برشی تغییرشکل می‌دهند و این تفاوت عملکرد باعث تغییر سهم باربری جانبی قاب‌های خمشی و دیوار برشی (یا مهاربندها) در ارتفاع سازه خواهد شد.




شکل ٤٤: مقایسهٔ عملکرد مستقل و یکپارچهٔ قاب خمشی و دیوار برشی

در قسمت چهارم این پیوست، چه خواهیم خواند؟

پس از بررسی متداول‌ترین سیستم‌های سازه‌ای تا به اینجای پیوست، در این قسمت قصد داریم چند سیستم خاص که برای باربری جانبی در سازه‌ها می‌توانند استفاده شوند را به شما عزیزان معرفی کنیم. این سیستم‌های سازه‌ای از این جهت خاص هستند که ضوابط و محدودیت‌های ویژه‌ای دربارهٔ چگونگی استفاده از آنها وجود دارد و عملاً تنها در ساختمان‌های کوتاه مرتبه می‌توانند به کار برده شوند. این سیستم‌های سازه‌ای شامل قاب‌های سبک فولادی، دیوارهای بتن پاششی سه بعدی و سیستم کنسولی می‌باشند.

## D-۱- سیستم قاب‌های سبک فولادی

سیستم قاب سبک فولادی یا اصطلاحاً سیستم ***LSF***[1]، یکی از روش‌های صنعتی در ساخت و ساز سریع سازه‌ها است که در سال‌های اخیر در کشور ما نیز جای خود را باز کرده است. در سازه‌های *LSF* از مقاطع فولادی سرد نورد شده با ضخامت کم (معمولاً بین ۱ تا ۳ میلی‌متر) استفاده می‌شود که توسط اتصالاتی پیچی به یکدیگر متصل می‌شوند.

شکل ٤٥: یک سازهٔ در حال ساخت با سیستم *LSF*

مزیت اصلی این سیستم نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای، سرعت اجرای بالای آن است، به‌گونه‌ای که سرعت احداث یک ساختمان با سیستم *LSF* نسبت به یک سازهٔ فولادی متداول به‌طور متوسط ۳ تا ۵ برابر بیشتر است و از طرف دیگر با کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی مصرف فولاد، وزن سازه نیز می‌تواند کاهش یابد. از سوی دیگر و با توجه به محدودیت‌های سازه‌ای در سیستم‌های *LSF* باید گفت که کاربرد اصلی این نوع از سیستم‌ها عمدتاً در انبوه‌سازی ساختمان‌های کوتاه مرتبه، دفاتر و ساختمان‌های تجاری کوچک و سالن‌های صنعتی یا ورزشی یک طبقه است. از سوی دیگر باید به این نکته دقت شود که این سیستم در همهٔ سازه‌ها قابل استفاده نبوده و دارای محدودیت ارتفاع سازه می‌باشد، همچنین از نظر حداکثر بارهای ثقلی کف‌ها و دهانه‌های سقف نیز محدودیت‌هایی برای این سیستم وجود دارد.

1- *Light Steel Framing*



زیر شاخه‌های اصلی قسمت چهارم
D-۱- سیستم قاب‌های سبک فولادی
D-۲- سیستم دیوارهای بتن پاششی سه بعدی
D-۳- سیستم کنسولی

### D-۱-۱- عملکرد سیستم LSF

در سیستم *LSF* برای انتقال بارهای ثقلی به فونداسیون از تعدادی ستونک با مقطع *C* شکل به نام وادار قائم (*Stud*) که به فاصلهٔ ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. قرارگیری وادارها در فواصل نزدیک به هم، دیوارهای باربری را ایجاد می‌کند که به‌خوبی توانایی انتقال بارهای ثقلی را دارا هستند. وادارها در تراز هر طبقه به اجزایی افقی به نام رانر (*Runner*) متصل می‌شوند که عموماً دارای مقاطع *U* شکل و یا *C* شکل هستند. شایان ذکر است که به منظور ایجاد پایداری و سختی جانبی مناسب در سیستم قاب سبک فولادی، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که مهمترین آنها عبارتند از:

۱) **دهانه‌های مهاربندی شده با تسمه‌های فولادی:** در این حالت تسمه‌هایی فولادی به‌صورت قطری در محل‌های مورد نظر قاب قرار گرفته و بر روی وادارهای قائم پیچ می‌شوند. دقت کنید که عملکرد این تسمه‌های فولادی شبیه مهاربندهای ضربدری می‌باشد و عملاً باعث افزایش سختی و باربری جانبی سازه خواهند شد.

۲) **دهانه‌های مهاربندی شده با صفحات پوششی فولادی:** در این حالت برای ایجاد سختی جانبی برای سازه، از صفحات پوششی فولادی با ضخامت کم استفاده می‌شود که عملکرد آنها تقریباً مشابه با دیوارهای برشی فولادی است.

شکل ٤٦: استفاده از دهانه‌های مهاربندی شده یا صفحات پوششی فولادی برای پایداری جانبی سیستم *LSF*

**نکته:** سیستم دیوار باربر با پوشش *OSB*[1] نوعی دیگر از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی برای سازه‌های *LSF* می‌باشد. مصالح *OSB* نوعی ورقهٔ چوبی است که به‌صورت مصنوعی ساخته شده و از رشته‌های جهت‌دار شدهٔ چوب که با استفاده از یک چسب ضد آب به هم چسبیده‌اند تشکیل می‌شود.

### D-۱-۲- جزئیات اجرایی سیستم‌های LSF

پروفیل‌های فولادی سرد نورد شده جزء اصلی اسکلت سازه در سیستم‌های *LSF* هستند که از ورق‌های فولادی گالوانیزهٔ نازک ساخته می‌شوند و معمولاً به‌صورت مقاطع زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- پروفیل *C* (⊏)
- پروفیل *U* (⊔)
- پروفیل نبشی (∟)
- پروفیل *Z* (⌐)

1- *Oriented Strand Board*

ورق‌های فولادی گالوانیزهٔ مورد استفاده در سیستم *LSF* معمولاً دارای ضخامتی در حدود ۱ تا ۳ میلی‌متر هستند که با عبور آنها از بین یک سری غلتک، تغییرشکل‌های مورد نظر در آنها ایجاد شده و ورق به فرم پروفیل موردنظر در می‌آید. در انتها این پروفیل‌ها در ابعاد مورد نیاز برش خورده و در صورت نیاز برای عبور تأسیسات مکانیکی و برقی، سوراخ‌هایی نیز در آنها ایجاد می‌شود.

همانطورکه در قسمت قبل بیان کردیم ویژگی اصلی سیستم‌های *LSF*، سهولت و سرعت بالای اجرای آنها می‌باشد که این سرعت اجرای بالا ناشی از پیش‌ساخته بودن همهٔ قطعات مورد استفاده در این سیستم‌ها است. اعضای سازهٔ یک سیستم *LSF* پس از ساخت در کارخانه، در محل اجرای ساختمان توسط افراد آموزش دیده مونتاژ می‌شوند به‌طوری‌که زمان اجرای اسکلت این ساختمان‌ها با احتساب زمان لازم برای نازک‌کاری و نصب تأسیسات مورد نیاز، در حدود ۱/۵ ماه به ازای هر طبقه است. همچنین یکی دیگر از دلایل بالا بودن سرعت اجرای سازه‌های *LSF*، استفاده از اتصالات پیچی در این سیستم است که با استفاده از پیچ‌های خودکار کوچک انجام می‌شود. این اتصالات علاوه بر دقت و کیفیت مناسب، به سرعت قابل اجرا هستند.

دید مهندسی

یکی از معایب اصلی قاب‌های سبک فولادی، آسیب‌پذیری اسکلت آنها در برابر آتش‌سوزی است. مقاطع فولادی مورد استفاده در این سازه‌ها به‌دلیل ضخامت کم به‌شدت در برابر آتش‌سوزی ضعیف بوده و دچار افت مقاومت شدید خواهند شد. همچنین در مناطق گرم و مرطوب ممکن است کارایی این سیستم به دلیل مباحث خوردگی کاهش یابد. در این مورد می‌توان گفت که هر چند پانل‌هایی که معمولاً به‌عنوان روکش و نمای اسکلت مورد استفاده قرار می‌گیرند تا حدودی از نفوذ رطوبت و حرارت به اسکلت سازه جلوگیری می‌کنند، ولی برای تأمین ایمنی کافی، استفاده از عایق‌های رطوبتی و حرارتی مناسب بر روی اسکلت سازهٔ این ساختمان‌ها توصیه شده است.

### D-۲- سیستم دیوارهای بتن پاششی سه بعدی

شکل ۴۷: نمونه‌ای از یک دیوار بتن پاششی سه بعدی (قبل از بتن پاشی)

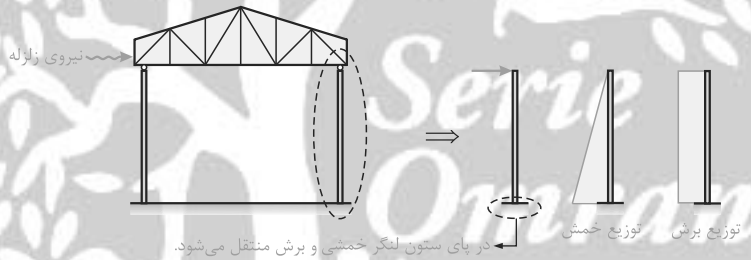
سیستم دیوارهای بتن پاششی سه بعدی، غالباً به‌صورت نیمه پیش‌ساخته اجرا شده و برای ساختمان‌های کوتاه تا ۳ طبقه کاربرد دارد. برای ساخت دیوارهای باربر جانبی در این سازه‌ها، روش‌های متفاوتی وجود دارد که براساس یکی از آنها که در ایران مرسوم است ابتدا در کارخانه، یک لایهٔ پلی‌استایرن به ضخامت ۴ الی ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده و در دو طرف آن، شبکه‌ای جوش شده از میلگردهای فولادی (میلگردهای ساده با قطر کم) نصب می‌شود. پس از حمل این پانل‌های پیش‌ساخته به کارگاه و نصب آنها در محل‌های موردنظر، دو سمت پانل‌ها توسط بتن ریزدانه، بتن پاشی می‌شود تا لایه‌ای از بتن مسلح به ضخامت ۴ تا ۷ سانتی‌متر در طرفین دیوار ایجاد شود.

از مزایای سیستم دیوارهای بتن پاشی سه بعدی می‌توان به مواردی نظیر انعطاف‌پذیری هندسهٔ پانل‌ها برای ایجاد شکل‌های مختلف دیوار و بازشو، کاهش زمان اجرای پروژه و آکوستیک بودن دیوارها اشاره کرد. دقت کنید که لایهٔ پلی‌استایرن استفاده شده در پانل‌های این سیستم، علاوه بر نقش قالب‌بندی، در عایق کاری حرارتی، برودتی و صوتی نیز مؤثر است.

## D-۳- سیستم کنسولی

شاید اولین تصویری که با شنیدن واژهٔ کنسول به ذهن هر مهندس عمران می‌رسد، تصویر یک تیر طره است که در یک سمت دارای تکیه‌گاه گیردار و در سمت دیگر بدون تکیه‌گاه است. از طرفی باید گفت که ستون‌ها نیز می‌توانند مانند تیرها عملکردی طره‌ای داشته باشند، به‌طوری‌که این ستون‌ها در پای خود به‌صورت گیردار به فونداسیون متصل هستند و هیچگونه تیر و یا مهاربندی به‌عنوان تکیه‌گاه جانبی در ارتفاع ستون به آن متصل نیست.

سازه‌های کنسولی با استفاده از این ایده طراحی می‌شوند و در آنها ستون‌ها عملکردی مشابه یک ستون طره دارند و به‌عنوان تنها عنصر باربر، بارهای جانبی ناشی از زلزله و باد را تحمل می‌کنند. به‌طور مثال در شکل زیر، سازه‌ای را مشاهده می‌کنید که در آن از سیستم کنسولی برای مقابله با نیروهای جانبی استفاده شده است. دقت کنید که در این سازه، سقف خرپایی استفاده شده تنها عملکردی ثقلی دارد و نمی‌تواند به پایداری جانبی آن کمک کند.




شکل ۴۸: تلاش‌های ایجاد شده در ستون یک سازهٔ کنسولی

دربارهٔ نحوهٔ عملکرد سیستم‌های سازه‌ای کنسولی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- ستون‌ها در این سیستم با عملکرد محوری خود، بارهای ثقلی را منتقل کرده و با عملکرد خمشی - برشی، بارهای جانبی را به تراز فونداسیون انتقال می‌دهند.

۲- همان‌طورکه می‌دانید ستون‌ها به تنهایی و بدون حضور تیر، دارای سختی جانبی کمی هستند، در نتیجه سیستم‌های کنسولی سختی جانبی نسبتاً پایینی دارند و عموماً برای سازه‌های کوتاه مرتبه با سقف فضاکار، پمپ بنزین‌ها و یا سالن‌های صنعتی مورد توجه قرار می‌گیرند.

شکل ۴۹: سازهٔ یک پمپ بنزین با سیستم کنسولی

۳- باید به این نکته دقت کنید که در یک سیستم کنسولی، ستون‌ها علاوه بر باربری جانبی به‌عنوان عنصر باربر ثقلی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین نباید تحت بارهای جانبی تغییرشکل‌های زیادی در ستون‌ها به‌وجود آید تا در صورت وقوع زلزله، پایداری سازه حفظ شود.