

بررسی پارامتریک رفتار یک تیر همبند فولادی پیشنهادی در سازه‌های با دیوار برشی همبسته تحت بارگذاری چرخه‌یی

ابوالفضل عربزاده* (دانشیار)

احسان عمرانیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۳ (۱۳۹۳)
دوری ۲-۳، شماره ۲، ص. ۱۳۳-۱۴۱، یادداشت شفی

دیوارهای برشی همبسته با تیرهای همبند فولادی، مقاومت و سختی بیشتری نسبت به سیستم‌های همبسته‌ی بتنی دارند. با توجه به اهمیت تیرهای همبند در پاسخ لرزه‌یی این سازه‌ها، ارزیابی رفتاری چرخه‌یی آنها ضروری است. در این نوشتار، به منظور ارتقای عملکرد سازه‌ی دیوارهای همبسته، یک تیر همبند فولادی جدید با استفاده از سخت‌کننده‌ی قطری به جای سخت‌کننده‌ی قائم پیشنهاد شده است. پس از صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، مطالعه‌ی پارامتریک بر روی حدود 30° مدل با در نظر گرفتن دو پارامتر نسبت عمق به ضخامت جان و زاویه‌ی سخت‌کننده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سخت‌کننده‌ی قطری در تیرهای همبند، ظرفیت برشی، سختی و جذب انرژی سیستم را در مقایسه با سخت‌کننده‌ی قائم افزایش می‌دهد، که نتیجه‌ی آن رسیدن به مقطع با ارتفاع کمتر و کاهش مشکلات مربوط به محدودیت ارتفاعی در سیستم‌های همبسته خواهد بود. همچنین برای دستیابی به بهترین عملکرد سیستم، استفاده از زاویه‌ی 30° درجه توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: تیر همبند فولادی، دیوار برشی، سخت‌کننده‌ی قطری، بارگذاری چرخه‌یی، پاسخ لرزه‌یی.

arabzade@modares.ac.ir
ehsan.omranian@modares.ac.ir

۱. مقدمه

برشی و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی، المان‌های سازه‌یی ضروری در یک طرح لرزه‌یی هستند. بنابراین، مشخصه‌های هیستریزس تیرهای همبند اساساً در پاسخ کلی یک سیستم دیوار همبسته اثر می‌گذارند.^[۱]

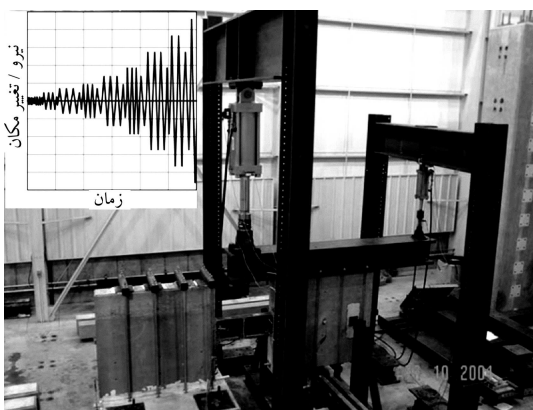
ظرفیت برشی محدود و نیز مکانیزم شکست از نوع کشش قطری و لغزش برشی در تیرهای همبند بتن مسلح با آرما تورگ‌گذاری معمولی و همچنین افزایش هزینه و مشکلات اجرایی در حین ساخت و نیز رسیدن به طرح‌های غیرعملی برای تیرهای با آرما تورگ‌گذاری قطری، استفاده از تیرهای بتنی را در این‌گونه سازه‌ها با مشکل مواجه کرده است.^[۲،۳] تیرهای فولادی به‌منزله‌ی جایگزینی مناسب برای تیرهای بتن مسلح انتخاب شده‌اند. انتهای تیرهای فولادی در داخل دیوار برشی مدفون و سیستم متوجه (دیوارهای بتنی متصل شده به وسیله‌ی تیرهای همبند فولادی) سیستم دیوار همبسته‌ی مرکب^۱ خوانده می‌شود. جذب انرژی بالا، سختی و نیز مقاومت بیشتر نسبت به تیرهای بتنی منجر به یک پاسخ چرخه‌یی پایدار برای تیرهای همبند فولادی شده است.^[۴،۵]

سیستم‌های دارای تیر همبند با رفتار خمشی حاکم نسبت به سیستم‌های با تیر همبند با رفتار برشی غالب نیاز به فولاد بیشتری در المان مرزی دارند، چون سهم بیشتری از لنگر واژگونی توسط دیوار حمل می‌شود. از طرف دیگر، برای تیرهای

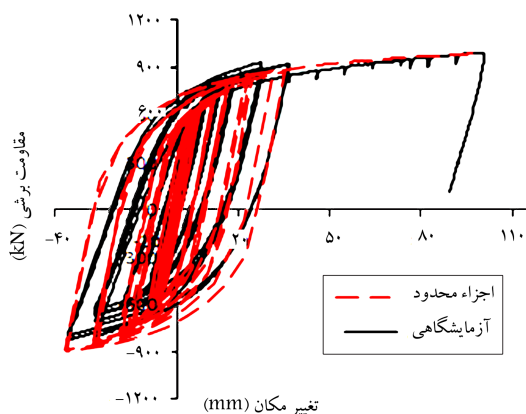
سازه‌های دارای دیوار برشی همبسته، که از اتصال دو دیوار برشی مجزا به یکدیگر به کمک تیرهای همبند پدید می‌آیند، سیستم‌های باربر جانبی مؤثری هستند که در صورت قرارگیری بازشده‌ی دیوار به‌طور منظم در ارتفاع ساختمان و طراحی مناسب این تیرهای رابط، سختی و مقاومت جانبی زیادی خواهند داشت. نیروی محوری کششی و فشاری ایجادشده در دیوارها ناشی از سختی تیرهای همبند با تشکیل کوپلی موجب تحمل بخش زیادی از لنگر واژگونی کل نسبت به حالت وجود دیوارهای تنها (بدون اتصال)، که انرژی ناشی از زلزله را فقط از طریق تغییرشکل‌های خمشی تلف می‌کنند، می‌شود. در نتیجه سیستم مقاوم و سخت‌تری به دست می‌آید.^[۱] این نیروهای محوری از طریق برش ایجادشده در تیر همبند منتقل می‌شوند. در سیستم‌های با دیوار برشی همبسته برای رسیدن به رفتار مطلوب باید تیرهای همبند به اندازه‌ی کافی سخت و قوی باشند و قبل از دیوارهای اطراف تسلیم شوند تا شکل‌پذیر رفتار کنند و خصوصیات جذب انرژی قابل توجهی نشان دهند.^[۱] این تیرها به علت توانایی زیاد در کاهش قابل ملاحظه‌ی لنگر خمشی در دیوارهای

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۱/۶/۶، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۱۲.



شکل ۱. شمایی از آزمایش صحت‌سنجی شده در این پژوهش.^[۹]



شکل ۲. مقایسه‌ی پاسخ آزمایشگاهی و اجزای محدود.

خردشدگی فشاری. همچنین این مدل برای بارگذاری دلخواه حتی بارگذاری چرخه‌یی مناسب است و کاهش سختی کشسان با در نظر گرفتن کرنش خمیری هم در کشش و هم در فشار توجیه می‌شود.^[۱۲]

میلگردها با المان‌های خربایی^۳ مدل می‌شوند که فقط دارای درجات آزادی انتقالی در امتداد محور عضو هستند. برای مدل‌سازی تیر فولادی از المان‌های پوسته‌یی^۴ مرتبه‌ی اول استفاده شده است. فولادها با استفاده از مدل خمیری با سخت‌شوندگی کینماتیک و به‌صورت غیرخطی که در Abaqus در دسترس است، مدل می‌شوند. در این پژوهش برای تعریف میلگرد داخل بتن و نیز قسمتی از تیر همبند که داخل دیوار برشی قرار می‌گیرد، از قید المان مدفون^۵ در Abaqus استفاده شده است. از این روش جهت جاسازی یک المان یا گروهی از آنها در المان‌های میزبان^۶ استفاده می‌شود.

در شکل ۲، نتایج حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود و مدل آزمایشگاهی در قالب منحنی نیروی برشی - تغییرمکان انتهای تیر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین دو مدل، هم از نظر مقاومت و هم سختی، وجود دارد و لذا می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به کمک مدل اجزاء محدود ایجادشده در این نوشتار اطمینان کرد. مقدار ظرفیت برشی محاسباتی (از روابط آیین‌نامه) برابر با ۵۷۸ kN بوده است. در حالی‌که بیشینه‌ی برش اندازه‌گیری شده در آزمایش برابر با ۹۹۴ kN و در مدل اجزاء محدود ۹۸۹ kN بوده است. همچنین مقدار سختی در آزمایش ۸۳ kN/mm و در مدل اجزاء محدود ۸۹ kN/mm به‌دست آمده است.

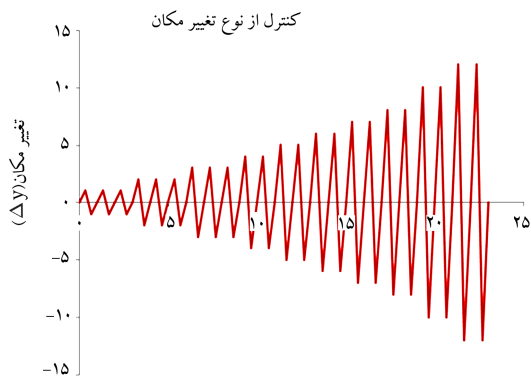
همبند طولانی‌تر (که رفتار خمشی حاکم است) ارضای ضوابط مورد نیاز اغلب با مقاطع نوردشده ممکن است؛ اما برای تیرهای با رفتار برشی غالب، مقاطع تیر ورق نیاز می‌شود.^[۲] با توجه به عملکرد بهتر تیرهای با رفتار برشی، در این تحقیق رفتار این‌گونه تیرها مورد ارزیابی قرار گرفته است. عملکرد تیرهای همبند شباهت زیادی به تیرهای پیوند در قاب EBF دارد. طراحی تیرهای همبند بر پایه‌ی مجموعه‌یی از تحقیقات گذشته قرار دارد.^[۸] فلسفه‌ی طراحی تیر همبند این است که بال‌های تیر، کشسان باقی بمانند و جان تیر در برش تسلیم شود. لذا در تعیین ابعاد بال از اثر جان در محاسبه‌ی مقاومت خمشی صرف‌نظر می‌شود. در نهایت، یک نسبت عمق به ضخامت مناسب برای بال و جان تعیین شود تا از کماتش موضعی بال یا جان جلوگیری شود.^[۸] مشابه آنچه که در مورد تیرهای پیوند در قاب‌های مهاربندی وجود دارد. تلاش پژوهشگران در این سال‌ها دستیابی به یک تیر همبند با ویژگی‌های مقاومت، سختی و شکل‌پذیری بالاتر نسبت به نمونه‌های مشابه بوده است. از جمله تیرهای همبند فولادی که تاکنون پیشنهاد و استفاده شده عبارت‌اند از: تیرهای همبند فولادی معمولی،^[۸] کامپوزیت،^[۷] تیر با ورق برشی جان،^[۱] تیر با مقطع فیوز،^[۹] تیرهای همبند با میلگردهای پیش‌تنیده و...^[۱۰]

اخیراً پژوهشی (۲۰۱۰) به‌طور آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار قاب‌های مهاربندی برون‌محور را، که در آنها از تیر پیوند با سخت‌کننده‌ی قطری استفاده شده است، بررسی کردند و با مقایسه‌ی آن با تیرهای پیوند متعارف مطابق با ضوابط AISC که از سخت‌کننده‌ی قائم استفاده می‌کند، عملکرد بهتر سیستم را از نظر ظرفیت برشی، سختی، و شکل‌پذیری نسبت به تیر با سخت‌کننده‌ی قائم نتیجه گرفتند.^[۱۱] سخت‌کننده‌ی قطری تاکنون در تیرهای همبند فولادی به کار نرفته است. در این نوشتار، استفاده از این نوع سخت‌کننده در جان تیرهای همبند فولادی با هدف افزایش ظرفیت برشی، سختی کلی سیستم و نیز جذب انرژی با تعداد سخت‌کننده‌ی کمتر، نسبت به تیرهای همبند مرسوم با سخت‌کننده‌ی استاندارد (قائم) مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا برای اعتباربخشی به مدل‌سازی، مدل اجزاء محدود یک نمونه‌ی آزمایشگاهی تیر همبند فولادی با سخت‌کننده‌ی استاندارد ایجاد و با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده است. سپس یک مطالعه‌ی پارامتریک با توجه به مقادیر مختلف زاویه‌ی سخت‌کننده‌ی قطری، عمق و ضخامت جان تیر انجام می‌شود تا بهترین وضعیت هندسی برای سخت‌کننده‌ی قطری به‌دست آید و در نهایت مراحل گام به گام طراحی تیر همبند فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری ارائه شده است.

۲. صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار Abaqus

نمونه‌ی آزمایشگاهی انتخاب‌شده برای صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود مربوط به آزمایشی است که در سال ۲۰۰۴ انجام شده است و متشکل از دو پایه‌ی دیوار است که با یک تیر همبند فولادی به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۱). ابتدا یک تاریخچه‌ی بارگذاری با کنترل نیرو و سپس بارگذاری به‌صورت تغییرمکانی اعمال می‌شود. در این آزمایش بارگذاری چرخه‌یی تا ۴٪ زاویه‌ی دوران اعمال و پس از آن نیروی برشی به‌صورت یکنواخت اضافه شد.^[۹]

در این نوشتار، برای مدل‌سازی مصالح بتن دیوار برشی از مدل بتن آسیب‌دیده‌ی خمیری^۲ استفاده شده است. این مدل از مفهوم آسیب‌دیدگی ایزوتروپیک در محدوده‌ی خطی در ترکیب با کشش ایزوتروپیک و فشار خمیری، جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده و دو مکانیزم اصلی برای شکست فرض می‌کند: ترک‌خوردگی کششی و



شکل ۴. تاریخچه‌ی بارگذاری تغییرمکانی مطابق ATC-۲۴.

تمام فولادهای در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع ST۳۷ با تنش تسلیم حدود ۲۴۰ MPa و تنش نهایی ۳۶۰ MPa و مدول کشسانی تقریباً برابر با ۲۰۰۰۰۰ MPa هستند. آرمانورها از نوع AII با تنش تسلیم حدود ۳۰۰ MPa و تنش نهایی ۴۴۰ MPa و مدول کشسانی ۱۸۶۰۰۰ MPa است. همچنین در تمام مدل‌های این پژوهش از بتن با مقاومت فشاری ۳۰ MPa استفاده شده است. طراحی دیوارها به روش آرمانورگذاری یکنواخت انجام شده است. با تحلیل سازه مشخص شد که لنگر و برش طراحی در تیرهای همبند در طبقه ۵ام بیشترین مقدار را دارد. لذا تیرهای همبند در این موقعیت با عنوان مدل تحت بررسی انتخاب شد.

برای انجام بارگذاری چرخه‌یی از دستورالعمل ATC-۲۴ استفاده شد. براساس این راهنما ابتدا چرخه‌های بارگذاری نیروکنترل برحسب نیروی برشی تسلیم قاب در دو گام و سپس تاریخچه‌ی بارگذاری برحسب کنترل تغییرمکان (برحسب تغییرمکان تسلیم) اعمال می‌شود.^[۱۴] در شکل ۴، بارگذاری اعمال شده نشان داده شده است. در فصل ششم ATC-۲۴ پارامترهای مفیدی برای ارزیابی عملکرد سازه‌ها معرفی شده است. در این پژوهش از ۳ معیار ارائه شده در این راهنما برای مقایسه و به‌طور کلی ارزیابی عملکرد نمونه‌های تحلیل شده (خصوصاً مدل‌های دارای سخت‌کننده‌ی قطری) استفاده شده است. این ۳ معیار عبارت‌اند از:

- معیار مقاومت؛
- معیار سختی؛
- معیار جذب انرژی.

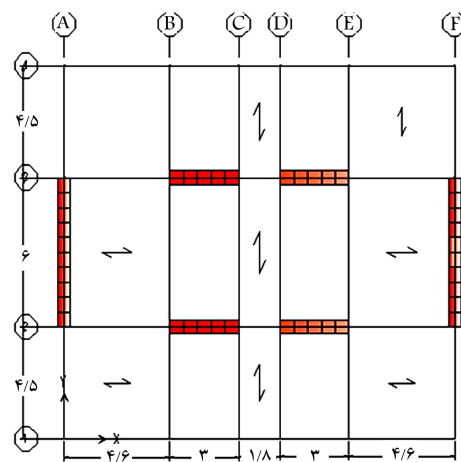
۴. نتایج مطالعات پارامتریک اجزاء محدود

در این پژوهش دو پارامتر بی‌بعد $\alpha = tg^{-1}(s/d)$ و $\beta = d/t_w$ در نظر گرفته شده‌اند. پارامتر β نسبت عمق به ضخامت جان تیر را بیان می‌کند و α زاویه‌ی سخت‌کننده‌ی قطری را نسبت به افق در نظر می‌گیرد. در جدول ۱، مدل‌های تحلیل شده در این مطالعه با توجه به مقادیر استفاده شده برای α و β معرفی شده‌اند. همچنین برای هر حالت β ی شرح داده شده‌ی فوق، نتایج مربوط به سازه‌ی دارای تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قائم هم ارائه شده است (ستون سوم جدول ۱). نحوه‌ی نام‌گذاری نمونه‌ها به این ترتیب بوده است که جمله‌ی اول، زاویه‌ی قطری و جمله‌ی دوم، نسبت عمق به ضخامت جان تیر در آن نمونه را بیان می‌کند. برای مثال، نمونه‌ی a۳۵.B۳۰ یعنی نمونه‌ی دارای سخت‌کننده‌ی قطری با زاویه‌ی ۳۵ درجه نسبت به افق در تیر با نسبت عمق به ضخامت جان برابر با ۳۰. نمونه‌ی

۳. مدل‌های استفاده شده در مطالعات پارامتریک

کمانش در تیرهای همبند سبب کاهش سریع مقاومت و سختی می‌شود و به‌طور قابل توجهی، توانایی جذب انرژی را در سیستم کاهش می‌دهد. سخت‌کننده‌های جان می‌توانند استفاده شوند تا کمانش جان را به تأخیر بیندازند. ضوابط موجود در آیین‌نامه‌ها برای تعیین سخت‌کننده‌ها، بر پایه‌ی تحقیقات انجام گرفته توسط پوپوف و همکاران (۱۹۸۶) به دست آمده است. آنها در رسیدن به این هدف، آزمایش‌هایی را بر روی ۳۰ نمونه‌ی آزمایشگاهی گوناگون، براساس مقادیر مختلف دو پارامتر بی‌بعد «نسبت ارتفاع به ضخامت جان و نسبت فاصله‌ی سخت‌کننده‌ها به ارتفاع جان» انجام دادند.^[۱۳] در این بخش، یک مطالعه‌ی تحلیلی با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار Abaqus (۶٫۱۰٫۱) بر روی رفتار چند نمونه‌ی تیر همبند فولادی تحت بارگذاری چرخه‌یی انجام شده است.

این نمونه‌ها شامل تیر فولادی مرسوم که مطابق ضوابط فصل سوم مقررات ملی ساختمان در آنها سخت‌کننده‌ی قائم (استاندارد) تعبیه شده و نیز یک تیر همبند پیشنه‌ی، که در آنها از سخت‌کننده‌ی قطری استفاده شده است، می‌باشد. یادآور می‌شود در این پژوهش، تمرکز بر روی تیرهای با رفتار برشی غالب است. ضوابط تعیین سخت‌کننده‌ها برای تیرهای همبند فولادی دقیقاً مطابق ضوابط مربوط به تیرهای پیوند در قاب‌های مهاربندی واگراست. هدف از استفاده از سخت‌کننده‌ی قطری در این نوشتار، افزایش سختی و نیز مقاومت تیر همبند فولادی نسبت به تیر همبند مرسوم با سخت‌کننده‌ی قائم با تعداد کمتر سخت‌کننده بوده است. برای انجام این مهم، یک مطالعه‌ی پارامتریک برای یافتن زاویه‌ی بهینه‌ی سخت‌کننده برای حدود ۳۰ مدل با در نظر گرفتن دو پارامتر «نسبت ابعاد عمق به ضخامت جان و زاویه‌ی سخت‌کننده‌ی قطری» تحت بارگذاری چرخه‌یی صورت گرفته و همچنین نتایج با وضعیت متناظر در تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قائم مقایسه شده است. مدل مورد بررسی از تحلیل یک سازه‌ی ۱۲ طبقه با سیستم دیوار برشی همبسته‌ی مرکب، که براساس ضوابط مبحث ششم و استاندارد ۲۸۰۰ به روش استاتیکی معادل بارگذاری و بر مبنای ضوابط مبحث نهم و دهم طراحی شده است، انتخاب شده است. در شکل ۳، پلان سازه (که برای همه‌ی طبقات مشترک است) نشان داده شده است. قاب پیرامونی فولادی به‌طور مفصلی به قاب‌های دیگر مرتبط می‌شود و در نتیجه، نقشی در باربری لرزه‌یی ایفا نمی‌کند.



شکل ۳. پلان سازه‌ی استفاده شده در این پژوهش.

جدول ۱. معرفی مدل‌های استفاده شده در مطالعه‌ی پارامتریک.

| $\beta = \frac{d}{t_w}$ | $\alpha = \tan^{-1}(\frac{e}{d})$ | | | | | نمونه‌ی استاندارد |
|-------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| | ۲۵ | ۳۰ | ۳۵ | ۴۰ | ۴۵ | |
| ۳۰ | a۲۵,B۳۰ | a۳۰,B۳۰ | a۳۵,B۳۰ | a۴۰,B۳۰ | a۴۵,B۳۰ | SS۳۰ |
| ۳۵ | a۲۵,B۳۵ | a۳۰,B۳۵ | a۳۵,B۳۵ | a۴۰,B۳۵ | a۴۵,B۳۵ | SS۳۵ |
| ۴۰ | a۲۵,B۴۰ | a۳۰,B۴۰ | a۳۵,B۴۰ | a۴۰,B۴۰ | a۴۵,B۴۰ | SS۴۰ |
| ۵۰ | a۲۵,B۵۰ | a۳۰,B۵۰ | a۳۵,B۵۰ | a۴۰,B۵۰ | a۴۵,B۵۰ | SS۵۰ |

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های DS و SS.

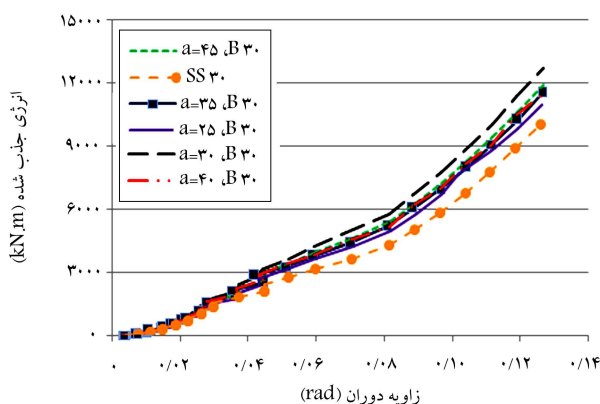
| DS | SS | |
|------|------|---|
| ۱۸۲۹ | ۱۴۳۲ | مقاومت برشی (کیلو نیوتن) |
| ۱۴٫۱ | ۱۲٫۹ | زاویه دوران (%) |
| ۲٫۲ | ۱٫۷ | نسبت برش تحلیلی به برش محاسباتی (آیین‌نامه) |

از روش مرجع^[۱۶] استفاده شده است. بر این اساس ظرفیت دورانی خمیری تیر همبند به نقطه‌ی گفته می‌شود که مقاومت برشی به ۸۰٪ مقاومت بیشینه‌ی سیستم، کاهش یافته باشد. با این تعریف، نمونه‌ی SS دارای ظرفیت دورانی ۱۲٫۹٪ رادبان و نمونه‌ی DS دارای ظرفیت دورانی بیش از ۱۴٫۱٪ خواهد بود. یادآور می‌شود که حد اعمال بارگذاری چرخه‌ی برای نمونه‌های مورد بحث در این نوشتار، رسیدن به ظرفیت دورانی پیش‌بینی شده براساس تعریف فوق است.

مقدار پیشنهادی آیین‌نامه برای ظرفیت دورانی تیرهای با رفتار برشی غالب، ۸٪ رادبان است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ظرفیت دورانی پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه، مقدار محافظه‌کارانه‌ی را نتیجه می‌دهد. البته در این مطالعه رفتار جوش‌ها و امکان گسیختگی برای نمونه مدل نشده است.

۲.۴. توزیع انرژی جذب شده توسط تغییر شکل خمیری در تیرهای همبند

در شکل ۶، نمودار توزیع انرژی جذب شده توسط تغییر شکل‌های خمیری تیر همبند را در نمونه‌های مختلف برای حالت $\beta = 30^\circ$ مشاهده می‌کنید. با وجود نزدیکی رفتار نمونه‌ها در مراحل آغازین، در ادامه‌ی بارگذاری، میزان جذب انرژی بسته به وضعیت سخت‌کننده متفاوت می‌شود. میزان انرژی جذب شده توسط نمونه با قطری ۳۰ درجه در انتهای تحلیل حدود ۳۵٪ بیش از نمونه‌ی دارای سخت‌کننده‌ی استاندارد است.



شکل ۶. توزیع انرژی جذب شده در تیر همبند در نمونه‌های با $\beta = 30^\circ$.

SS۳۰ یعنی تیر با سخت‌کننده‌ی استاندارد با نسبت عمق به ضخامت جان برابر با ۳۰. همچنین مدل‌های دیگری برای $\beta = 50^\circ$ آورده شده است که در بخش ۵ به تفصیل در مورد آن‌ها صحبت خواهد شد. جزئیات مدل‌های تحت بررسی در این پژوهش در مرجع^[۱۵] آورده شده است.

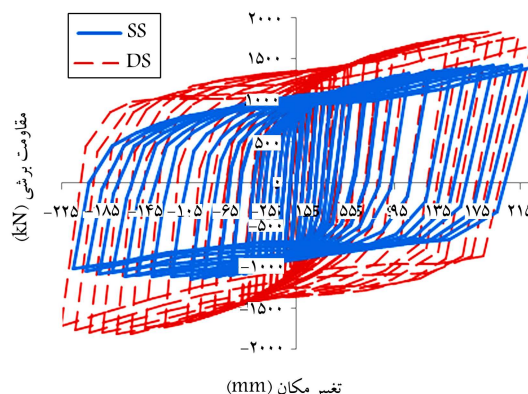
با توجه به نبود ضابطه‌ی طراحی برای سخت‌کننده‌ی قطری در آیین‌نامه‌ها، ضخامت آن‌ها در این پژوهش، ۱۰ mm (کمینه‌ی ضخامت مجاز آیین‌نامه برای سخت‌کننده‌ی استاندارد) در نظر گرفته شده است. ضخامت نمونه‌های دارای سخت‌کننده‌ی استاندارد طبق آیین‌نامه از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$t_{w_{ss}} = \max(10 \text{ mm}, 0.75t_w) = 10.5 \text{ mm} \quad (1)$$

۱.۴. پاسخ چرخه‌ی نیرو - تغییر مکان مدل‌ها

در شکل ۵، پاسخ چرخه‌ی دو مدل SS۳۵ و a۳۰, B۳۵ برحسب نیروی برشی - تغییر مکان برشی در انتهای تیر در محل اتصال به دیوار ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نصب سخت‌کننده‌ی قطری توانایی سازه را در جذب انرژی افزایش می‌دهد. همچنین ظرفیت برشی تیر با سخت‌کننده‌ی قطری نیز در این حالت بهبود می‌یابد. در هر دو نمودار رفتار پایداری برای سازه در چرخه‌های مختلف بارگذاری دیده می‌شود بدون کاهش قابل توجه در سختی و مقاومت که مزیت به‌کارگیری تیرهای فولادی را نشان می‌دهد.

در جدول ۲، ظرفیت تحلیلی (به دست آمده از تحلیل مدل در آباکوس) به همراه زاویه‌ی برشی متناظر ایجاد شده در تیر همبند و نیز نسبت ظرفیت تحلیلی به ظرفیت محاسبه شده براساس روابط آیین‌نامه آورده شده است. از مقادیر جدول معلوم می‌شود، مدل با سخت‌کننده‌ی قطری (DS) ظرفیت برشی بیشتری نسبت به مدل با سخت‌کننده‌ی استاندارد (SS) دارد و حدود ۲۸٪ برش بیشتر تحمل می‌کند. برای تعیین میزان زاویه‌ی چرخش خمیری قابل تحمل در تیر همبند در این مطالعه



شکل ۵. منحنی هیستریزس نمونه‌های DS و SS.

جدول ۳. مقادیر عددی انرژی جذب‌شده.

| β | α | | | |
|---------|----------|------|------|------|
| | ۴۵ | ۴۰ | ۳۵ | ۳۰ |
| ۳۰ | ۱٫۲۶ | ۱٫۰۱ | ۱٫۱۳ | ۱٫۳۵ |
| ۳۵ | ۰٫۸۹ | ۰٫۹۳ | ۱٫۱۱ | ۱٫۰۶ |
| ۴۰ | ۰٫۹۶ | ۰٫۸۸ | ۰٫۸۹ | ۱٫۰۵ |

جدول ۴. مقادیر مقاومت برشی در نمونه‌های مختلف.

| β | α | | | |
|---------|----------|------|------|------|
| | ۴۵ | ۴۰ | ۳۵ | ۳۰ |
| ۳۰ | ۱٫۰۷ | ۱٫۰۷ | ۱٫۱۱ | ۱٫۱۳ |
| ۳۵ | ۱٫۲۷ | ۱٫۲۷ | ۱٫۲۵ | ۱٫۲۷ |
| ۴۰ | ۱٫۰۴ | ۱٫۰۴ | ۱٫۱۳ | ۱٫۱۳ |

۴.۴. مشخصات سختی در چرخه‌های مختلف

این سیستم مشابه یک سیستم طره عمل می‌کند. لذا سختی کشسان تئوری برای سیستم مورد بحث، K_e ، از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید که I_{eq} در آن همان اینرسی معادل تیر همبند برای در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های برشی است و از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$K_e = \frac{3EI_{eq}}{l^3} \quad (2)$$

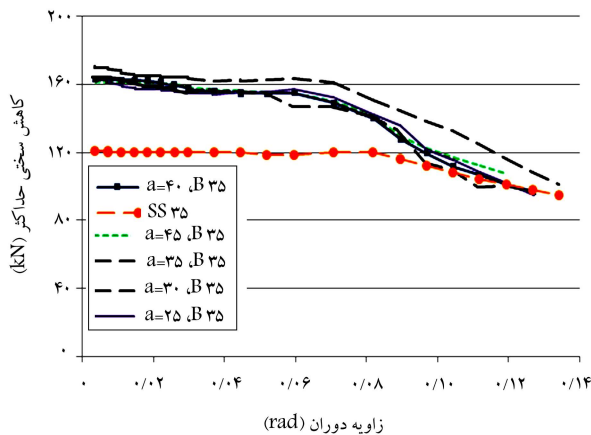
$$I_{eq} = \frac{I_b}{1 + \frac{3EI_b}{l^2GA} \lambda} \quad (3)$$

λ در این رابطه، ضریب شکل مقطع عرضی برابر با نسبت اساس مقطع خمیری عضو به اساس مقطع کشسان آن است که برای تیر همبند با ابعاد مورد نظر برابر است با ۱٫۱۲. نهایتاً با توجه به رابطه‌های ۲ و ۳، سختی تئوری محاسبه می‌شود، مثلاً برای $\beta = 35$ خواهیم داشت: $K_e = 144 \frac{kN}{mm}$. [۱۵]

در جدول ۵، برای نسبت عمق به ضخامت مورد نظر، نتایج مربوط به نمونه‌های استاندارد و قطری ۳۰ درجه آورده شده است. از مقایسه‌ی مقادیر سختی تئوری از رابطه‌ی ۲ و نیز مقادیر جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که سخت‌کننده‌ی قائم تأثیر چندانی در سختی کل سیستم ندارد و بیشتر نقش پایداری را برای تیر ایفا می‌کند. اما سخت‌کننده‌ی قطری علاوه بر پایداری، در افزایش سختی سیستم نیز مؤثر است. در شکل ۸، تغییرات سختی پیشینه در چرخه‌های متناوب بارگذاری برای نمونه‌ها

جدول ۵. سختی اولیه در نمونه‌ها (برای $\beta = 35$).

| DS | SS | |
|-------|------|-----------------------------|
| ۱۶۵٫۳ | ۱۴۹ | سختی تحلیلی ابتدایی (kN/mm) |
| ۱٫۱۹ | ۱٫۰۳ | نسبت سختی تحلیلی به تئوری |



شکل ۸. توزیع سختی در نمونه‌ها ($\beta = 35$).

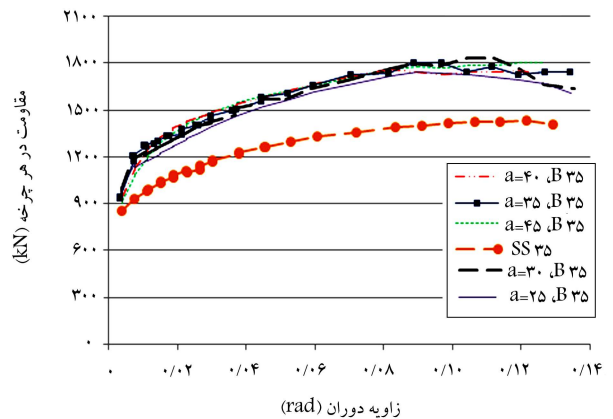
در میان نمونه‌های قطری، نمونه‌ی دارای سخت‌کننده‌ی قطری با زاویه‌ی ۳۰ درجه میزان جذب انرژی بیشتری دارد. در جدول ۳، مقادیر عددی انرژی جذب‌شده در انتهای تحلیل برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. اعداد جدول به مقادیر متناظر در نمونه‌ی استاندارد مقیاس شده‌اند.

یادآوری می‌شود که در همه‌ی مدل‌های این بخش، فقط از دو عدد سخت‌کننده‌ی قطری در هر طرف استفاده شده است. همان‌طور که از مقادیر جدول مشخص است با افزایش نسبت عمق به ضخامت جان میزان انرژی جذب‌شده در نمونه‌های قطری کاهش و در نمونه‌های استاندارد افزایش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان به وقوع کمانش بیشتر و شدیدتر در نمونه‌های با نسبت عمق به ضخامت بالا ارتباط داد. در این مورد، در بخش ۵ به‌طور مفصل صحبت خواهد شد. در میان نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی قطر مدل دارای قطری ۳۰ درجه در همه‌ی نسبت‌ها بیشترین جذب انرژی را دارد.

۳.۴. تغییرات مقاومت برشی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف

در شکل ۷، نمودار تغییرات مقاومت برشی بر حسب زاویه‌ی چرخش در سازه برای حالت $\beta = 35$ نشان داده شده است. در این شکل، رفتار نزدیکی بین نمونه‌های قطری دیده می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های استاندارد کفایت نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی قطری آشکار است. برای مثال، در زاویه‌ی دوران 8° رادیان، نمونه با قطری ۳۰ درجه حدود ۲۶٪ ظرفیت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌ی استاندارد دارد. با افزایش نسبت عمق به ضخامت، پدیده‌ی کمانش رخ می‌دهد که در بخش ۵ به تفصیل در مورد آن صحبت خواهد شد.

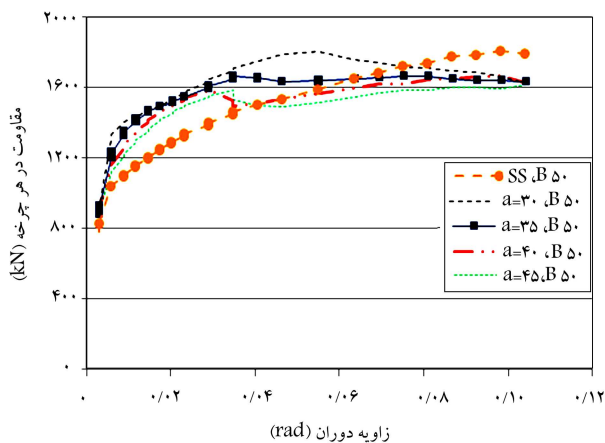
در جدول ۴، مقدار مقاومت برشی در نمونه‌های مختلف دیده می‌شود. اعداد جدول به مقادیر متناظر در نمونه‌ی استاندارد نرمال شده‌اند. باز هم وضعیت بهتر در نمونه‌ی دارای قطری ۳۰ درجه، نسبت به سایر نمونه‌ها حاکی از بهینه‌بودن عملکرد سازه‌ی مدل در این زاویه است. وضعیت بهتر نسبت به نمونه‌ی استاندارد هم مشهود است.



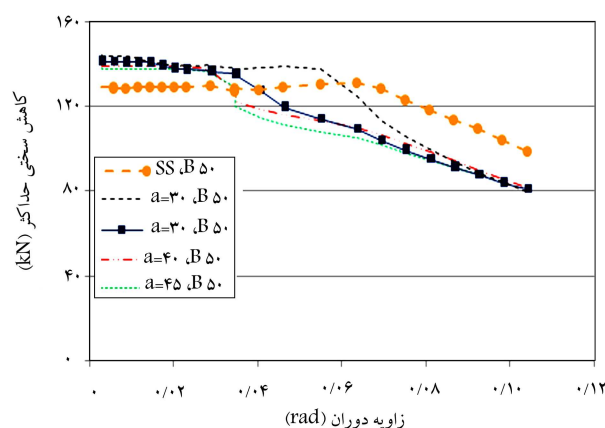
شکل ۷. توزیع مقاومت برشی بر حسب زاویه‌ی رادیان.

جدول ۶. مقادیر سختی اولیه برای نمونه‌ها.

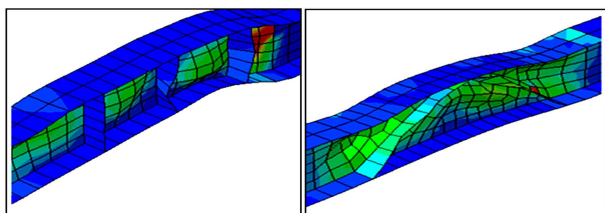
| | | α | | | | β |
|------|------|----------|------|------|------|---------|
| | | ۴۵ | ۴۰ | ۳۵ | ۳۰ | ۲۵ |
| ۱/۱۵ | ۱/۱۶ | ۱/۱۹ | ۱/۲۱ | ۱/۲۱ | ۱/۰۷ | ۳۰ |
| ۱/۰۸ | ۱/۰۹ | ۱/۱۰ | ۱/۱۱ | ۱/۱۱ | ۱/۱۰ | ۳۵ |
| ۱/۰۹ | ۱/۱۳ | ۱/۱۲ | ۱/۱۵ | ۱/۱۵ | ۱/۱۶ | ۴۰ |



شکل ۹. تغییرات مقاومت برشی ($\beta = 50^\circ$).



شکل ۱۰. تغییرات سختی برای نمونه ($\beta = 50^\circ$).



شکل ۱۱. نمایش وضعیت پس از کمانش در تیر همبند.

مربوط به سخت‌کننده‌های قائم تبعیت کرده است. طبق ضوابط آیین‌نامه برای تیرهای با رفتار برشی غالب، برای رسیدن به زاویه‌ی دوران 0.08 رادیان، فاصله‌ی $(30tw-d/5)$ و برای زاویه‌ی 0.02 رادیان، فاصله‌ی $(52tw-d/5)$ استفاده می‌شود. در شکل ۱۲، این وضعیت جدید برای تیر همبند نشان داده شده است. در شکل ۱۳، نمودار مقاومت برشی مربوط به مدل‌های با ۴ سخت‌کننده در هر طرف دیده می‌شود. جهت مقایسه، نتایج مربوط به نمونه‌ی استاندارد هم در این شکل آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سخت‌کننده، ظرفیت برشی نمونه افزایش می‌یابد و نیز برای نسبت‌های عمق به ضخامت جان بالا ($\beta = 50^\circ$) سیستم دارای تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قطری مجدداً رفتار بهتری نسبت به سیستم با سخت‌کننده‌ی قائم نشان می‌دهد. بدیهی است با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، طول آزاد تیر همبند (طولی که بین دو سخت‌کننده قرار می‌گیرد) کوتاه‌تر است و کمانش کمتری رخ می‌دهد و لذا افت مقاومت حتی در زاویه‌ی دوران‌های

در وضعیت $\beta = 35^\circ$ دیده می‌شود. نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی قطری، سختی ابتدایی بالاتری نسبت به نمونه‌ی SS دارند. در چرخه‌های انتهایی، افت سختی در تمام نمونه‌های قطری شیب بیشتری نسبت به نمونه‌های استاندارد نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان به کمانش بیشتر در نمونه‌های قطری در انتهای بارگذاری نسبت داد. همچنین به دلیل کمانش کمتر در نمونه‌های 30° درجه، این نمونه وضعیت بهتری نسبت به سایر زوایای سخت‌کننده دارد. در جدول ۶، مقادیر سختی اولیه در نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

اعداد جدول به مقادیر متناظر در نمونه‌ی استاندارد مقیاس شده‌اند. با توجه به مقادیر جدول در میان همه‌ی نمونه‌ها، نمونه با قطری 30° درجه بیشترین سختی اولیه را داراست، خصوصاً در β های بالاتر.

چنانکه مشاهده می‌شود در همه‌ی حالات، نمونه با قطری 30° درجه بیشترین جذب انرژی، مقاومت برشی و سختی را در بین سایر نمونه‌های قطری داراست و لذا این زاویه، به عنوان زاویه‌ی بهینه انتخاب می‌شود. پس نتایج حاصل از این بخش، یک تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قطری با یک زاویه در محدوده‌ی 30° درجه را پیشنهاد می‌کند.

۵. وضعیت نمونه‌ها با افزایش نسبت سختی عمق به جان

تعداد سخت‌کننده‌های عرضی براساس طول تیر همبند و همچنین فاصله‌ی آن‌ها، که براساس میزان دوران پیش‌بینی شده و عمق تیر به دست می‌آید، تعیین می‌شود. با توجه به اینکه هنوز ضوابطی در آیین‌نامه در مورد تعداد سخت‌کننده‌ی قطری وجود ندارد، لذا در این مطالعه فقط از دو عدد سخت‌کننده‌ی قطری در هر طرف استفاده شده است. در نتیجه، با افزایش نسبت عمق به ضخامت جان، طول بیشتری از جان تیر در فضای بدون سخت‌کننده قرار می‌گیرد و در نتیجه احتمال کمانش افزایش می‌یابد. برای مثال، به نمودارهای به‌دست‌آمده از نمونه‌های مختلف برای $\beta = 50^\circ$ برای ظرفیت برشی و سختی مدل‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ توجه کنید.

با توجه به این شکل‌ها می‌توان گفت زمانی که فقط از دو سخت‌کننده‌ی قطری در هر طرف استفاده می‌شود، برای نمونه‌های با زاویه‌ی بزرگ‌تر طول بیشتری از تیر در فضای بدون سخت‌کننده قرار می‌گیرد. در نتیجه با افزایش میزان بار، نمونه‌های قطری کاهش سختی و مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های استاندارد دارند، که این مسئله را می‌توان به کمانش سریع‌تر و بیشتر در این نمونه‌ها ارتباط داد. همچنین با افزایش زاویه‌ی قطری، فضای بیشتری از جان تیر بدون سخت‌کننده خواهد بود و لذا در زاویه‌ی 30° درجه، کمانش کمتری نسبت به تیرهای با زوایای دیگر سخت‌کننده رخ می‌دهد. لذا، در میان نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی قطری، بیشترین افت برای نمونه با قطر $a = 45$ رخ می‌دهد. در شکل ۱۱، نمایی از کمانش اتفاق افتاده در جان تیر همبند در دو حالت، با سخت‌کننده‌ی قطری و قائم مشاهده می‌شود.

برای حل این مشکل در تیرهای با نسبت عمق به ضخامت بالا از ۴ سخت‌کننده‌ی قطری در هر طرف استفاده شده است. فاصله‌ی بین قطری‌های از همان ضوابط

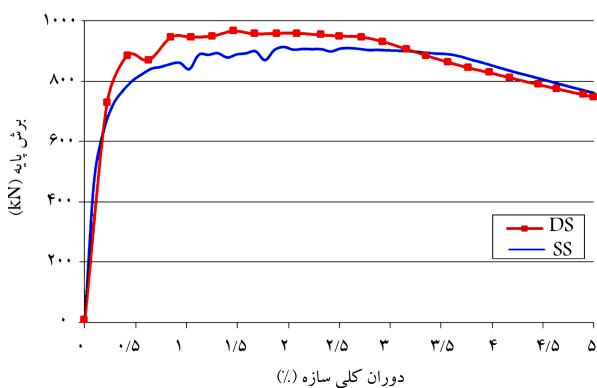
تفاوت رفتار نمونه با قطری ۴۵ درجه (a۴۵-۴stif) و بهبود وضعیت سختی نسبت به نمونه‌ی متناظر با ۲ سخت‌کننده در هر طرف، (شکل ۱۰ نمونه‌ی a۴۵, B۵۰) در شکل ۱۴ واضح است. افت سختی در این نمونه از زاویه‌ی دوران ۷٪ شروع شده است، در حالی که در شکل ۱۰، از مقدار ۳٪ رادیان افت شدید مشاهده می‌شود.

۶. مقایسه‌ی عملکرد سازه‌ی ۶ طبقه با تیرهای همبند با سخت‌کننده‌ی استاندارد و قطری

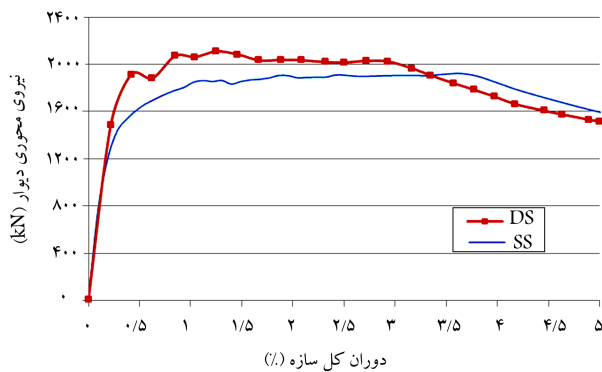
در این بخش نتایج یک بررسی تحلیلی روی رفتار یک سازه‌ی ۶ طبقه که تحت بارگذاری یکنوای جانبی قرار گرفته است، برای دو حالت ارائه می‌شود. در یک حالت از تیرهای همبند فولادی با سخت‌کننده‌ی استاندارد و در حالت دیگر از تیرهای همبند فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری در سرتاسر ارتفاع سازه استفاده شده است. بارگذاری به صورت یکنوا از نوع کنترل تغییرمکان بوده است که به بام سازه اعمال می‌شود. در همه‌ی نمودارها DS بیانگر سازه با تیر همبند دارای سخت‌کننده‌ی قطری است و SS بیانگر سازه با تیر دارای سخت‌کننده‌ی استاندارد را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۵، نمودار تغییرات برش پایه برحسب دوران کل سازه نشان داده شده است. تا زمانی که سازه در مرحله‌ی ارتجاعی قرار دارد، رفتار دو سازه یکسان است؛ اما با افزایش تغییرمکان جانبی، سازه‌ی دارای تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قطری، دارای مقاومت جانبی بیشتری از سازه‌ی SS است و در انتهای بارگذاری نیز (پس از افت) مجدداً رفتار مشابهی برای دو سازه دیده می‌شود. به هر حال در مجموع تفاوت چندانی بین رفتار دو سازه دیده نمی‌شود.

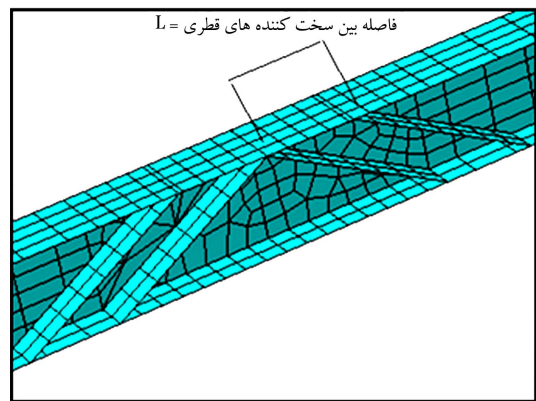
در شکل ۱۶، نمودار تغییرات نیروی محوری به وجود آمده در دیوار طبقه‌ی اول



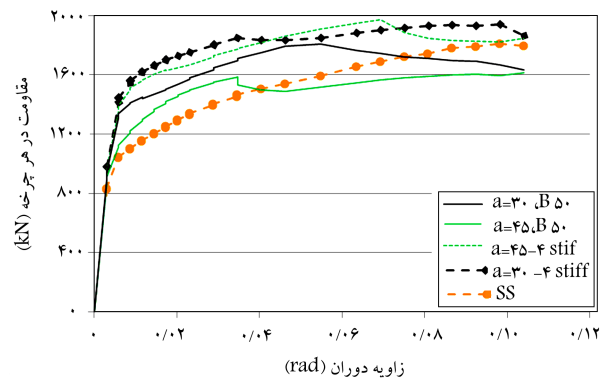
شکل ۱۵. مقایسه‌ی برش پایه‌ی سازه‌های DS و SS.



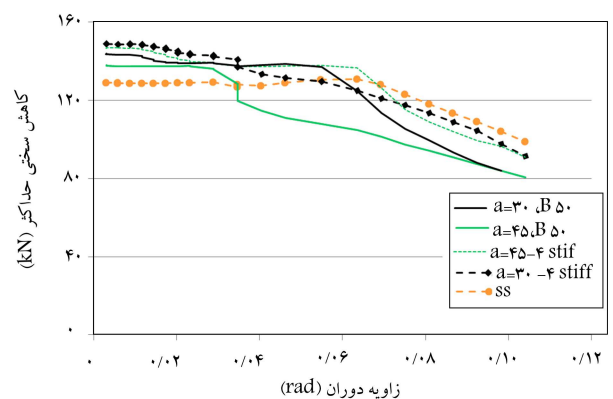
شکل ۱۶. نمودار نیروی محوری در دو سازه‌ی دارای DS و SS.



شکل ۱۲. نمونه‌ی قطری با ۴ سخت‌کننده در هر طرف.



شکل ۱۳. توزیع مقاومت برشی برای نمونه‌های استاندارد و قطری با ۴ سخت‌کننده.



شکل ۱۴. توزیع سختی برای تیرهای با ۴ سخت‌کننده‌ی قطری.

بالا نیز کم می‌شود، برخلاف آنچه که در نمونه‌های با فقط دو عدد سخت‌کننده‌ی قطری مطابق شکل ۹ (مثلاً نمونه‌ی a۴۵, B۵۰) مشاهده شد. خصوصاً کفایت مدل با سخت‌کننده‌ی قطری با زاویه‌ی ۳۰ درجه (a۳۰-۴stif) نسبت به مدل با قطری ۴۵ درجه (a۴۵-۴stif) که در زاویه‌ی دوران ۰٫۰۶ افت مقاومت آن شروع می‌شود، در این شکل آشکار است.

در شکل ۱۴، توزیع سختی در نمونه‌های دارای ۴ سخت‌کننده‌ی قطری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش سخت‌کننده‌ها رفتار بهتری را خصوصاً برای نمونه با سخت‌کننده‌ی قطری با زاویه‌ی ۴۵ درجه موجب می‌شود. در این حالت، شیب کاهش سختی در نمونه‌ها تقریباً یکسان است.

سخت‌شدگی کرنشی در برش باشد (رابطه‌های ۵ و ۶):

$$\phi_b M_n = \left(\frac{L_b}{\lambda} + c \right) V_p \quad (5)$$

$$M_n = F_y \times Z_{req} \quad (6)$$

که در این رابطه‌ها، V_p بیشینه ظرفیت برشی جان (با در نظر گرفتن پدیده سخت‌شدگی) که مقدار آن براساس توصیه مرجع^[۸] برابر است با: $V_p = 1.25 V_n$ ، همچنین $\phi_b = 0.9$ مطابق توصیه می‌گردد.

لازم به توضیح است در انتخاب مقطعی که ظرفیت لنگر مورد نیاز را می‌دهد، سهم جان باید نادیده گرفته شود؛ چون فرض بر این است که جان در برش تسلیم خواهد شد و لذا باربری خمشی چندانی نخواهد داشت.

گام سوم: کنترل ضوابط مربوط به کمانش بال و جان (رابطه‌ی ۷):

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 0.73 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (7)$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

گام چهارم: کنترل رفتار تیر برای اطمینان از اینکه به صورت برشی رفتار می‌کند. بر این اساس باید داشته باشیم (رابطه‌ی ۸):

$$L \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (8)$$

گام پنجم: تعیین سخت‌کننده‌های مورد نیاز:

ابتدا پارامتر بی‌بعد β را تعیین می‌کنیم: $\beta = d/t_w$ ، اگر $\beta < 40$ ، از دو سخت‌کننده قطری با زاویه 30° در غیر این صورت از ۴ سخت‌کننده قطری با زاویه 30° درجه نسبت به افق استفاده می‌کنیم. ضخامت سخت‌کننده رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید.

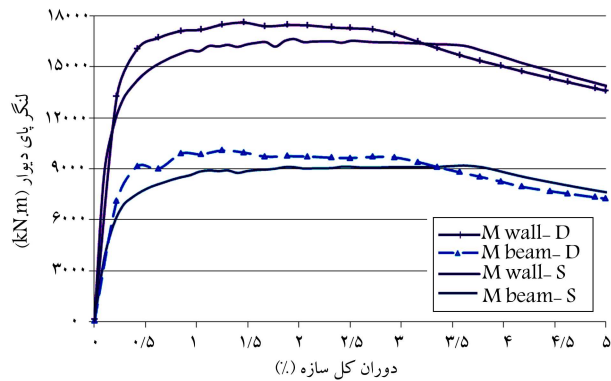
گام ششم: تعیین طول مدفون مورد نیاز طوری که مقاومت برشی ضریب خورده‌ی ناحیه مدفون، ϕV_c ، بزرگ‌تر از ظرفیت برشی تیر همبند، V_p ، شود. مقدار طول مدفون تیر داخل دیوار مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$V_p = \frac{0.185 f_c' b_{eff} L_e}{1 + \frac{V_p e}{L_e}} \quad (9)$$

که در آن، L_e طول مدفون تیر $e = \frac{L}{4} + \frac{L_e}{4} + c$ عمق تیر همبند، h_w ارتفاع جان تیر (بین دو بال)، t_f ضخامت بال، t_w ضخامت جان تیر، b_f عرض بال تیر، c پوشش بتن و L طول آزاد تیر همبند.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، یک مطالعه پارامتریک اجزاء محدود برای تیرهای همبند فولادی با رفتار برشی حاکم با در نظر گرفتن حدود ۳۰ مدل مختلف انجام شد تا امکان استفاده از سخت‌کننده‌ی قطری را در تیرهای همبند فولادی به جای سخت‌کننده‌ی استاندارد (مطابق با ضوابط آیین‌نامه) بررسی کند. دو پارامتر بی‌بعد «نسبت عمق به ضخامت جان و زاویه سخت‌کننده‌ی قطری با راستای افق» انتخاب شد تا بهترین وضعیت هندسی برای سخت‌کننده‌ها به دست آید. در انتهای نوشتار، هم مراحل گام به گام



شکل ۱۷. نمودار لنگر مقاوم سازه‌های DS و SS.

برحسب دوران کل سازه نشان داده شده است. رفتار مشابهی در ابتدای بارگذاری دیده می‌شود، اما رفته‌رفته با افزایش جابجایی جانبی، سازه‌ی دارای سخت‌کننده‌ی قطری نیروی محوری بیشتری می‌تواند تحمل کند. پس از افت، اگرچه عملکرد نزدیکی وجود دارد، اما سازه با سخت‌کننده‌ی استاندارد رفتار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد.

در شکل ۱۷، لنگرهای خمشی دیوارها در تراز پایه بر حسب دوران کل نشان داده شده است. همچنین در این شکل، سهم لنگر تحمل شده توسط تیرهای همبند ناشی از عمل کوپلینگ نیز آورده شده است (Mbeam). از این شکل مشخص می‌شود که تیرهای همبند نقش زیادی در باربری جانبی سازه بازی می‌کنند.

روندی مشابه آنچه که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ توضیح داده شد، در این نمودار (شکل ۱۷) نیز دیده می‌شود. در ابتدا، دو سازه مشابه یکدیگر عمل می‌کنند؛ اما در ادامه، بارگذاری سازه‌ی SS مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش مقاومت در سازه‌ی DS دیرتر از سازه‌ی SS رخ می‌دهد، اگر چه تفاوت چندانی بین دو سازه دیده نمی‌شود. اختلاف بین دو نمودار (سهم لنگر تیر همبند و لنگر کل) لنگر تحمل شده توسط عمل خمشی دیوارها را بیان می‌کند. مشاهده می‌شود که بیش از نیمی از لنگر در هر دو حالت توسط تیر همبند تحمل می‌شود؛ که این مطلب به‌طور کلی کفایت سیستم‌های همبسته را در مقابل سیستم‌های غیرهمبسته، که لنگر ناشی از نیروی جانبی به‌طور کامل توسط دیوارها تحمل می‌شود، می‌رساند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه سازه دارای سخت‌کننده‌ی قطری، عملکرد بهتری در ابتدای بارگذاری در کلیه حالات از خود نشان می‌دهد، اما به هر حال تفاوت چشمگیری بین دو سازه وجود ندارد. برای مقایسه‌ی بهتر نیاز به بررسی سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر احساس می‌شود، که در این نوشتار به آن پرداخته نشده است.

در انتها، مراحل طراحی تیر همبند فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری براساس نتایج به‌دست‌آمده از این نوشتار، به صورت گام به گام برای استفاده‌ی مهندسان طراح ارائه شده است:

گام اول: تعیین ابعاد جان برای مقاومت در برابر برش مورد نیاز (V_u) (رابطه‌ی ۴):

$$V_u \leq \phi_v V_n = \phi_v \times 0.6 h_w t_w F_y C_v \quad (4)$$

که در این رابطه، ضریب C_v نسبت تنش کمانشی جان به تنش تسلیم برشی فولاد جان است.

گام دوم: تعیین لنگر مقاوم مورد نیاز که باید بزرگ‌تر یا مساوی لنگر متناظر با توسعه‌ی

- برای حل این مشکل از تعداد بیشتری سخت‌کننده‌ی قطری برای وضعیت $B=5^\circ$ استفاده شده است (۴ سخت‌کننده در هر طرف)، فاصله‌ی بین سخت‌کننده‌ها از همان ضوابط مربوط به سخت‌کننده‌ی قائم تعیین شد. تحلیل‌های چرخه‌یی انجام‌گرفته مجدداً رفتار بهتری از نمونه‌ی دارای تیر همبند با سخت‌کننده‌ی قطری نسبت به تیر با سخت‌کننده‌ی استاندارد، البته این بار با ۴ قطری، در هر طرف را نشان می‌داد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش تعداد قطری‌های تأثیر چندانی روی سختی سیستم نداشته است، اما ظرفیت برشی سیستم در این حالت بیشتر شد.
- همچنین رفتار تیرهای همبند با سخت‌کننده‌ی قطری برای 5° زاویه‌ی «۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه» نسبت به افق بررسی شد. رفتار نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف حاکی از عملکرد بهتر نمونه‌های با قطری 3° درجه برحسب سختی، ظرفیت برشی و جذب انرژی بود. لذا زاویه‌ی بهینه‌ی به دست آمده در این پژوهش برای رسیدن به بهترین عملکرد در سازه‌های همبسته مرکب با تیر همبند دارای سخت‌کننده‌ی قطری، مقداری حدود 3° درجه دارد.
- طراحی تیر به همراه یافتن جزئیات بهینه‌ی سخت‌کننده‌ی قطری ارائه شده است. مهم‌ترین نتایج مطالعه‌ی پارامتریک انجام‌گرفته به این شرح است:
- نصب سخت‌کننده‌ی قطری، عملکرد تیر را در محدوده‌ی دوران‌های مورد انتظار این‌نامه از نظر ظرفیت برشی و سختی اولیه و نیز جذب انرژی بهبود می‌بخشد، در حالی‌که سخت‌کننده‌ی قائم اثری روی سختی سیستم نداشته است و بیشتر نقش پایداری را در تیر ایفا می‌کند.
- با توجه به اینکه ابتدا فقط از دو سخت‌کننده‌ی قطری در تمام نمونه‌ها استفاده شده است، با افزایش نسبت عمق به ضخامت تیر معلوم شد که به دلیل فضای آزاد به‌وجودآمده بیشتر بین دو سخت‌کننده، کماتش بیشتری رخ می‌دهد و لذا با افزایش نسبت عمق به ضخامت (تا $B=5^\circ$) در زاویه‌ی دوران‌های بزرگ (بیش از ۸٪) افت مقاومت و سختی در نمونه‌های قطری بیش از نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی استاندارد و نسبتاً شدید بود. بنابراین، استفاده از دو سخت‌کننده‌ی قطری در هر طرف فقط تا نسبت عمق به ضخامت ($B=4^\circ$) مؤثر است.

پانویس‌ها

1. hybrid coupled wall
2. damaged plasticity concrete
3. truss
4. shell
5. embedded element
6. host element

منابع (References)

1. Fortney, P.J. "The next generation of coupling beams", PhD Dissertation, University of Cincinnati (2005).
2. Harries, K.A., Gong, B. and Shahrooz, B.M. "Behavior and design of reinforced concrete, steel and steel-concrete coupling beams", *Earthquake Spectra*, **16**(4), pp. 775-799 (2000).
3. El-Tawil, S., Harries, K., Fortney, P.J., Shahrooz, B.M. and Kurama, Y. "Seismic design of hybrid coupled wall systems: State of the art", *Structural Engineering*, **136**(7), pp. 755-769 (2010).
4. Fortney, P.J., Shahrooz, B.M. and Rassati, G.A. "Seismic performance evaluation of coupled core walls with concrete and steel coupling Beams", *Steel and Composite Structures*, **7**(4), pp. 279-301 (2007).
5. Harries, K.A. "Ductility and deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls", *Earthquake Spectra*, **17**(3), pp. 457-478 (2001).
6. El-Tawil, S., Kuenzli, C. and Hassan, M. "Pushover of hybrid coupled walls. I: Design and modeling", *Structural Engineering*, **128**(10), pp. 1272-1281 (2002).
7. Gong, B. and Shahrooz, B.M. "Steel-concrete composite coupling beams-behavior and design", *Engineering Structures*, **23**(11), pp. 1480-1490 (2001).
8. Harries, K.A., Mitchell, D., Cook, W.D. and Redwood, R.G. "Seismic response of steel beams coupling concrete walls", *Structural Engineering*, **119**(12), pp. 3611-3629 (1993).
9. Fortney, P.J., Shahrooz, B.M. and Rassati, G.A. "Large-scale testing of a replaceable "Fuse" steel coupling beam", *Structural Engineering*, **133**(12), pp. 1801-1807 (2007).
10. Shen, Q. "Seismic analysis, behavior, and design of unbonded post-tensioned hybrid coupled wall structures", PhD. Dissertation, University of Notre Dame (2006).
11. Yurisman, P., Budiono, B., Mustopo, M. and Suarjana, M. "Behavior of shear link of WF section with diagonal web stiffener of eccentrically braced frame (EBF) of steel structure", *ITBJ. Eng. Sci.*, **42**(2), pp. 103-128 (2010).
12. ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.10.1. (2010).
13. Kasai, K. and Popov, E. "Cyclic web buckling control for shear link beams", *Structural Engineering*, **112**(3), pp. 505-523 (1986).
14. ATC-24, *Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures*, Applied Technology Council (1992).
15. Omranian, E. "investigation of behavior of Steel coupling beams in concrete shear walls under cyclic loading", MSC Thesis, University of Tarbiat Modares, Iran (2012).
16. Richards, P.W. and Uang, C. "Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity", *Structural Engineering*, **131**(10), pp. 1546-1552 (2005).