

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی فولادی

مسعود خزایی پول* (کارشناسی ارشد)

عرفان علوی (دکتری)

فریبرز ناطقی الهی (استاد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران: شریف
دوری ۲-۲۸، شماره ۴، ص. ۱۴۷-۱۵۴، (پادداشت نشانی)

تحقیقات گذشته نشان داده است که ورق‌های نازک فولادی در برش عملکرد مطلوبی دارند که با توجه به این ویژگی، از این مکانیزم در سیستم‌های مقاوم جانبی مانند دیوار برشی فولادی استفاده می‌شود. در این مطالعه، برای بهبود عملکرد لرزه‌ی قاب‌های مهاربندی همگرا از پانل برشی فولادی استفاده شده است. از این رو، یک سیستم ترکیبی توسعه داده شده و رفتار غیرخطی آن به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شده است. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، یک مدل پانل برشی یک طبقه با اتصال مفصلی اعضای مرزی در ۴ گوشه‌ی قاب و همچنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده انتخاب شده است. نمونه‌ی مورد بررسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش نشان‌دهنده‌ی عملکرد لرزه‌ی مطلوب سیستم، جذب انرژی مناسب، و رفتار پایدار در نواحی غیرخطی است. تحلیل اجزای محدود نمونه‌ی آزمایشگاهی انجام و نتایج آن ارائه و انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی آزمایشگاهی، پانل برشی فولادی، هیستریزس، تحلیل غیرخطی، مهاربند همگرا.

m.khazaei.poul@gmail.com

e.alavi@iiees.ac.ir

nat.eghi@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

به دلیل اینکه طراحی سازه‌ها به صورت کشسان غیراقتصادی است، سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که تحت بارهای لرزه‌ی متوسط تا شدید، وارد ناحیه‌ی غیرکشسان شوند تا بخشی از انرژی تحریک ورودی را سختی و مقاومت سازه، و بخشی دیگر را تغییر مکان‌های غیرکشسان سازه تحمل کند. در این نوع طراحی بعد از زلزله‌های شدید، خسارات شدیدی به اعضای اصلی سازه وارد می‌شود؛ به طوری که بعد از زلزله قابلیت بهره‌برداری از سازه ممکن نیست و یا این امر با هزینه‌های بسیار زیادی که غیراقتصادی است، امکان‌پذیر می‌شود. برای کاهش خسارات وارده به سازه‌ی اصلی، در دهه‌های گذشته تحقیقات زیادی بر روی نوعی میراگرهای صفحه‌ی فلزی (عناصر قربانی) انجام شده است تا به وسیله‌ی این المان‌ها بخش زیادی از انرژی تحریک ورودی را مستهلک کنند. بعد از زلزله این نوع فیوزها به آسانی و کمترین هزینه و زمان ممکن قابل تعویض هستند. از این المان‌ها به گونه‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. این المان‌ها به صورت دیوارهای برشی فولادی با تنش تسلیم پایین، دیوارهای برشی ستونی که بخشی از دهانه را پوشش می‌دهند و همچنین سیستم‌های مهاربندی مرکب با پانل‌های فلزی در سازه‌ها استفاده می‌شود. در سال ۱۹۹۶ به صورت آزمایشگاهی به بررسی رفتار چرخه‌ی دیوار برشی از جنس فولاد با تنش جاری شدن پایین،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۲۷/۱۳۸۹، اصلاحیه ۱۲/۱۶/۱۳۸۹، پذیرش ۳/۲۴/۱۳۹۰.

به صورت پایدار و پدیده‌ی باریک‌شدگی در این حالت ناچیز است و همچنین تسلیم در کل سطح ورق اتفاق می‌افتد.

پانل‌های برشی با مکانیزم برشی خالص قادر به بهبود و بالا بردن سختی و ظرفیت سیستم هستند و به منزله‌ی یک وسیله‌ی قربانی و فداکار، قادر به مستهلک کردن مقدار بزرگی از انرژی وارد شده‌ی ناشی از بارهای لرزه‌ی‌اند و با تمرکز خسارات در خود پانل، خسارات وارده به سازه‌ی اصلی را کاهش می‌دهند.

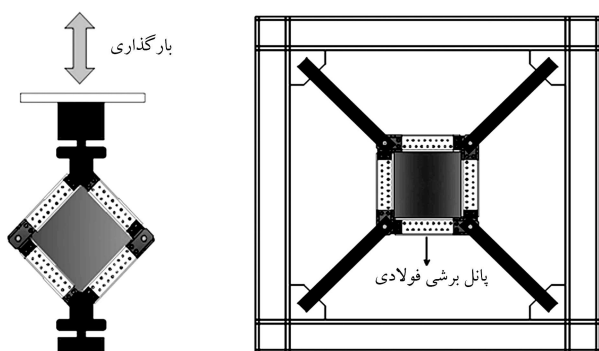
برای داشتن مکانیزم برش خالص، پانل برشی باید طوری طراحی شود که از هر نوع پدیده‌ی کماتش در محدوده‌ی کشسان جلوگیری شود تا پانل وارد تغییر شکل‌های خمیری برشی شود. بدین منظور پانل برشی را با یک سری سخت‌کننده با پشت‌بند افقی، عمودی، و یا قطری برای جلوگیری از پدیده‌ی کماتش و یا کاهش اثرات آن در محدوده‌ی کشسان مسلح می‌کنند.^[۱۲،۹]

از طرف دیگر در مکانیزم میدان کششی، کماتش برشی زودرس در حالت کشسان اتفاق می‌افتد و در این حالت نیروی برشی جانبی توسط تنش‌های کششی قطری ایجاد شده در ورق پرکننده تحمل می‌شود. در این حالت جذب انرژی نسبت به مکانیزم میدان‌های برشی کمتر است، ولی با این حال ظرفیت جذب انرژی سیستم قابل توجه است و از لحاظ اقتصادی این نوع سیستم نسبت به سیستم سخت‌شده به مراتب اقتصادی‌تر است.

۳. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده بر روی نوعی سیستم مهاربندی همگراست که در محل برخورد دو مهاربند از یک پانل برشی فولادی (مطابق شکل ۲) استفاده شده است. هدف از قرارگیری این پانل، بهبود رفتار هیستریزس سیستم مهاربندی همگرا و تمرکز خسارات در این پانل برشی فولادی است.

پانل برشی به صورت یک قاب فولادی مربع‌شکل با اتصال مفصلی اعضاست. اتصال ورق پرکننده به اعضای مرزی با تعداد زیادی پیچ با مقاومت بالا انجام شده است، به طوری که اتصال بین ورق و قاب فولادی پانل به صورت گیردار رفتار می‌کند. اتصال مهاربند به پانل برشی به صورت مفصلی انتخاب شده است و عملاً اعضای مهاربندی در ظرفیت سیستم بی‌تأثیرند. یکی از نکات مهم در طراحی این نوع



الف) سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی؛

ب) سیستم مهاربندی مرکب با پانل برشی معادل انتخاب شده برای مطالعه آزمایشگاهی.

شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری پانل برشی فولادی در قاب فولادی و چیدمان آزمایشگاهی آن.

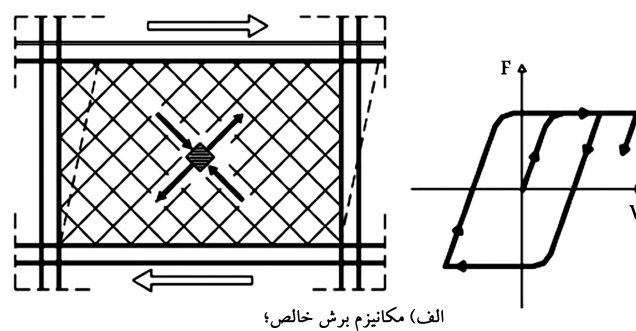
مستهلک کننده‌ی انرژی انجام شده است.^[۱۱] در مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی انجام شده بر روی ترکیب سخت‌کننده‌های قطری با بازشوی استراتژیک در دیوار برشی فولادی نتیجه گرفته شده است که این سیستم دارای جذب انرژی بالا و رفتار لرزه‌ی مناسب است.^[۱۲] به علاوه روابط نظری جهت تخمین ظرفیت دیوار برشی فولادی با شرایط مختلف لاغری و با توجه به نقش سختی اعضای مرزی نیز ارائه شده است.^[۱۳]

در این پژوهش نیز عملکرد سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی فولادی به منظور تمرکز خسارات سازه‌ی در پانل برشی و همچنین بهبود رفتار هیستریزس سیستم مهاربندی همگرا به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مطالعه شده است.

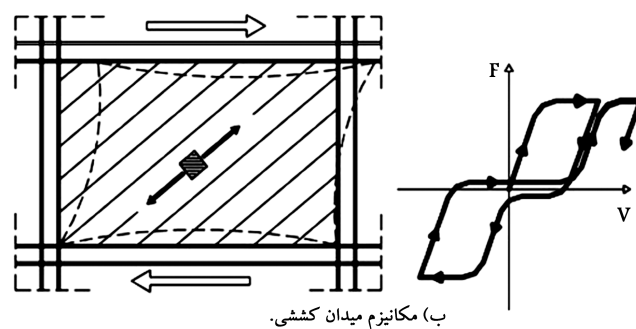
۲. عملکرد پانل‌های برشی

ورق‌های فولادی نازک اگر تحت بارگذاری برشی قرار گیرند، توانایی ایجاد سختی و مقاومت زیاد به وسیله‌ی میدان‌های کششی قطری مورب ایجاد شده در ورق را خواهند داشت. امروزه از این ایده در دیوارهای برشی فولادی استفاده می‌شود و این سیستم در مقایسه با سیستم‌های مهاربندی، رفتار به مراتب مطلوب‌تری دارد. رفتار هیستریزس این نوع سیستم نسبتاً پایدار و میزان جذب انرژی آن بالاست. در سیستم‌های سخت‌شده با پشت‌بند، مقدار پدیده‌ی لاغرشدگی در منحنی هیستریزس کاهش می‌یابد. به علت جذب بالای انرژی این نوع سیستم‌ها می‌توان پانل‌های برشی فولادی را جزو دسته‌ی میراگرها محسوب کرد.

مکانیزم جذب انرژی در پانل‌های برشی به ۲ صورت است:^[۹] ۱. مکانیزم برش خالص؛ ۲. مکانیزم میدان کششی. شکل ۱، این دو مکانیزم جذب انرژی در پانل برشی (میراگرهای صفحه‌ی) را نشان می‌دهد. از بین این دو رفتار، مکانیزم برش خالص دارای رفتار مطلوب‌تری است. رفتار چرخه‌ی غیرکشسان در این نوع مکانیزم



الف) مکانیزم برش خالص؛



ب) مکانیزم میدان کششی.

شکل ۱. مکانیزم استهلاک انرژی در پانل‌های برشی.^[۹]

انتخاب شده است. ورق پرکننده‌ی استفاده شده در این پانل به صورت مربعی با بعد ۰/۴ متر از جنس فولاد با تنش جاری شدن پایین انتخاب شده است. ضخامت ورق پرکننده برابر با ۰/۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و اتصال این ورق به اعضای مرزی با ۲ ردیف پیچ با مقاومت بالا صورت گرفته است و به صورت گیردار عمل می‌کند.

برای به دست آوردن مشخصات دقیق مکانیکی از جمله رفتار تنش-کرنش مصالح، بر روی مصالح مصرفی در اعضای مرزی و همچنین ورق پرکننده‌ی آزمایش آزمون کشش^۳ براساس استاندارد ۳۷۰-۰۵ ASTM انجام شد.^[۱۶] در جدول ۱، خلاصه‌ی نتایج حاصل از آزمون کشش ساده ارائه شده است.

۲.۳. چیدمان آزمایش و بارگذاری

بعد از ساخت نمونه و کنترل ابعاد، نمونه در دستگاه بارگذاری محوری (universal) قرار گرفت و آماده‌ی بارگذاری شد. وسایل ثبت دقیق پاسخ‌ها مانند کرنش‌سنج‌ها و

سیستم این است که ظرفیت اعضای مهاربند باید از ظرفیت پانل برشی بیشتر باشد تا پانل بتواند وارد تغییرشکل‌های خمیری شود.

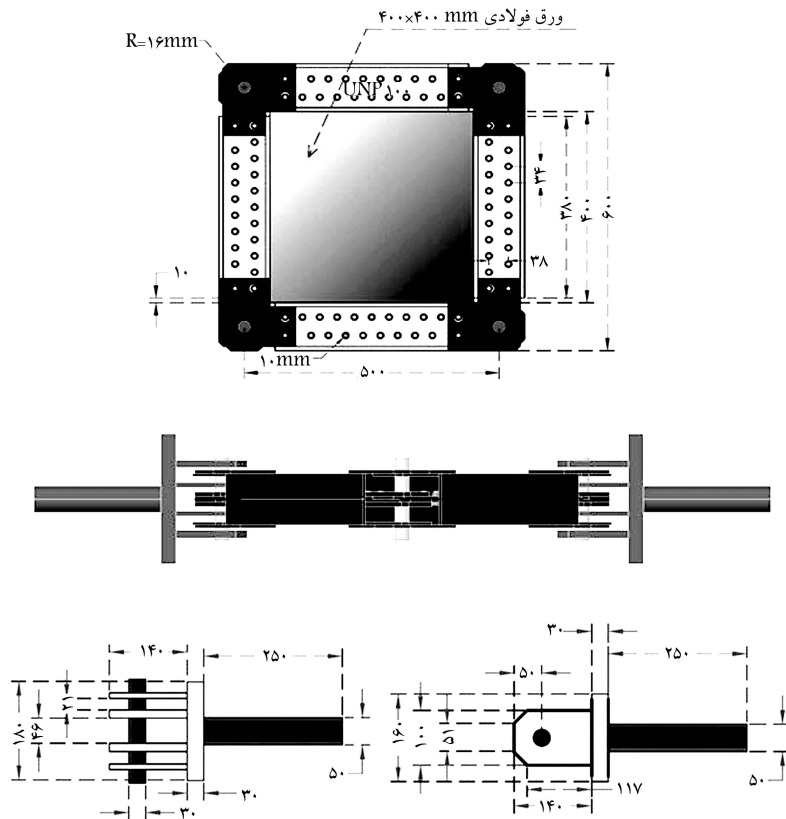
نمونه‌ی آزمایشگاهی سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی شکل ۲ الف به صورت شکل ۲ ب معادل‌سازی شد. بارگذاری وارد بر نمونه به صورت قطری شکل ۲ ب، و نوع بارگذاری وارد بر نمونه به صورت استاتیکی معادل (سیکلی) و براساس پروتکل^[۱۵] ATC-۲۴ و به صورت کنترل-تغییر مکان منظور شد.

۱.۳. مشخصات پانل برشی فولادی

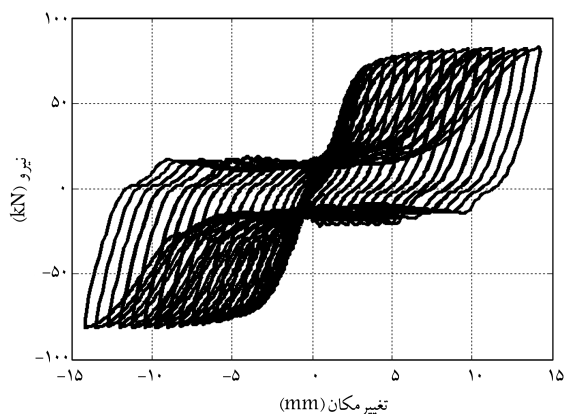
جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده‌ی پانل برشی فولادی در شکل ۳ نشان داده شده است. اعضای مرزی این پانل برشی متشکل از ۴ بازو با طول یکسان و برابر با ۰/۶ متر طراحی شده است. هر بازو از ۲ پروفیل UNP۱۰۰ تشکیل شده است که از قسمت جان توسط ۲ ردیف پیچ با قطر ۱۰ میلی‌متر و با مقاومت بالا متصل شده است. اتصال این ۴ بازو که تشکیل یک قاب مربعی می‌دهند، به صورت مفصلی

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی مصالح مصرفی در پانل برشی.

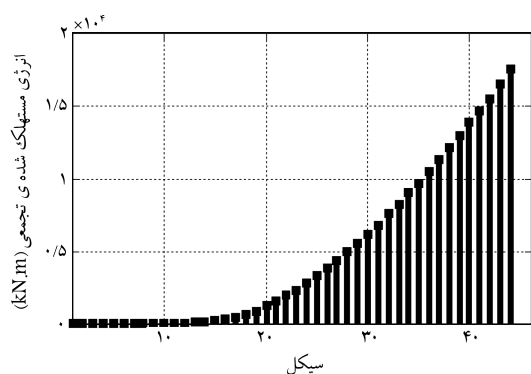
نوع مصالح	مدول کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	کرنش تسلیم (%)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)	کرنش گسیختگی (%)
ورق با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر	۲۰۴	۱۸۰	۲۷	۳۱۰/۷	۲۹	۳۲
ناودانی ۱۰۰	۲۰۳	۳۱۰	۲۳	۴۶۰/۵	۱۸	۱۹



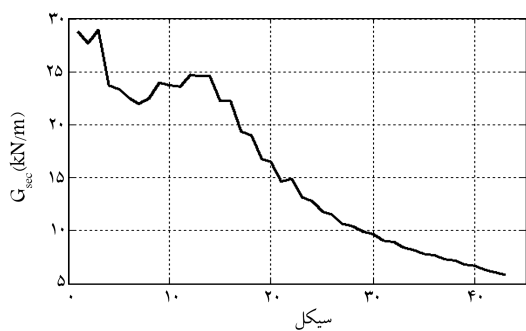
شکل ۳. جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده‌ی پانل برشی فولادی نمونه‌ی آزمایشگاهی (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۶. منحنی هیستریزس پانل برشی فولادی (آزمایشگاهی).



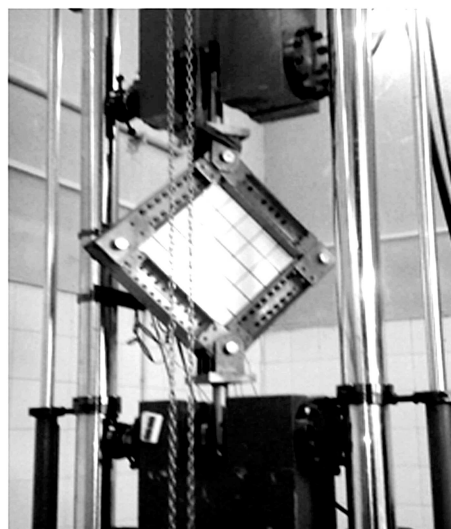
شکل ۷. انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی در طی سیکل‌های بارگذاری در نمونه‌ی آزمایشگاهی.



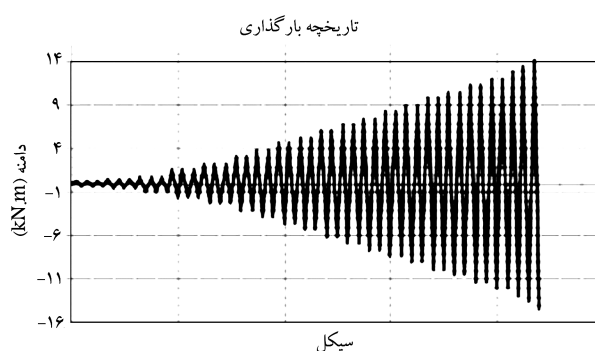
شکل ۸. سختی سکانت نمونه‌ی آزمایشگاهی.

ناچیز است. با افزایش بارگذاری و ورود پانل به ناحیه‌ی غیرخطی، میزان انرژی جذب‌شده در سیکل‌هایی با دامنه‌ی بیشتر افزایش یافته است. در شکل ۸، روند تغییرات سختی سکانت پانل برشی فولادی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی بارگذاری سختی سکانت سیستم کاهش می‌یابد.

شکل ۹، ضریب میرایی و اسکور معادل را برای پانل برشی فولادی در هر سیکل نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده می‌شود که با ورود پانل فولادی به ناحیه‌ی خمیری میزان این ضریب افزایش یافته است و به حدود متوسط ۱۵٪ می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی میزان مشارکت نسبتاً بالای پانل برشی فولادی در جذب انرژی ورودی به سیستم است و دلالت بر توانایی پانل برشی در تمرکز خسارات در خود دارد.



شکل ۴. نمونه‌ی قرار گرفته‌شده در دستگاه بارگذاری محوری برای انجام آزمایش.



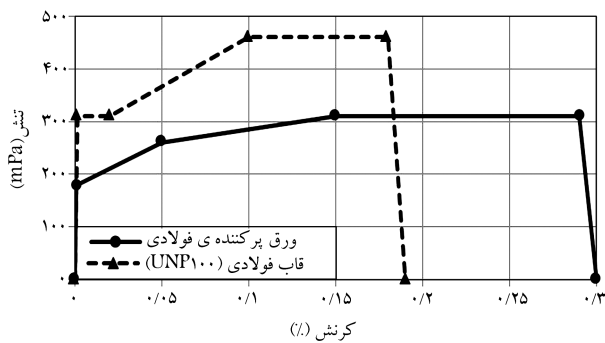
شکل ۵. تاریخچه‌ی بارگذاری وارد بر نمونه‌ی آزمایشگاهی (ATC-۲۴).

جابجایی سنج‌ها با دقت بر روی نمونه نصب شدند. در شکل ۴، نمونه‌ی آماده‌شده برای آزمون نشان داده شده است. انتخاب نوع پروتکل بارگذاری بستگی به هدف آزمایش، نوع نمونه‌ی مورد آزمایش و مود قالب شکست نمونه (زوال مقاومتی سریع^۴، زوال مقاومتی آهسته^۵، کماتش عضو و...) دارد. در این مطالعه، پروتکل ۱۹۹۲^[۱۵] ATC-۲۴ استفاده شده است و بارگذاری وارد بر نمونه به صورت شبه‌استاتیکی سیکلی و از نوع کنترل‌شونده‌ی تغییر مکان^۶ انتخاب شده است. تاریخچه‌ی بارگذاری در بارگذاری در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳.۳. نتایج آزمایش

بعد از شروع بارگذاری در شروع سیکل دهم (جابجایی ۱٫۵ میلی‌متر) کماتش موضعی در ورق جان مشاهده شد و بعد از این لحظه افزایش ظرفیت نمونه با تشکیل میدان‌های کششی قطری در ورق جان به وقوع پیوست. منحنی‌های هیستریزس پانل برشی فولادی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود به علت عدم استفاده از سخت‌کننده در این پانل پدیده باریک‌شدگی در منحنی هیستریزس قابل ملاحظه است. مقاومت برشی نهایی سیستم براساس نتایج آزمایش، ۸٫۲ تن به‌دست آمد.

در شکل ۷، میزان انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی در طی سیکل‌های بارگذاری برای پانل برشی مورد مطالعه ارائه شده است. در سیکل‌های اول بارگذاری به علت اینکه هنوز پانل فولادی در محدوده‌ی ناحیه‌ی کشسان است، میزان انرژی مستهلک‌شده



شکل ۱۱. رفتار تنش-کرنش تعریف شده برای فولاد مصرفی در ورق پرکننده و اعضای مرزی در مدل المان محدود براساس نتایج آزمون کشش.

مدل سازی شده است. در این نوع رفتار از مدل بسلینگ استفاده و اثر پوشینگر در نظر گرفته شده است. طبق اصل سخت شونده گی سینماتیکی در صورت عوض شدن جهت بارگذاری در محدوده ی غیرخطی، میزان اختلاف بین تنش های کششی و فشاری در یک نقطه از منحنی رفتاری مصالح مقداری ثابت و مساوی با ۲ برابر تنش تسلیم کششی آن است که در فولاد نرمه ی ساختمانی برابر با $2\sigma_y$ است.^[۱۷]

۲.۴. روش تحلیل و بارگذاری

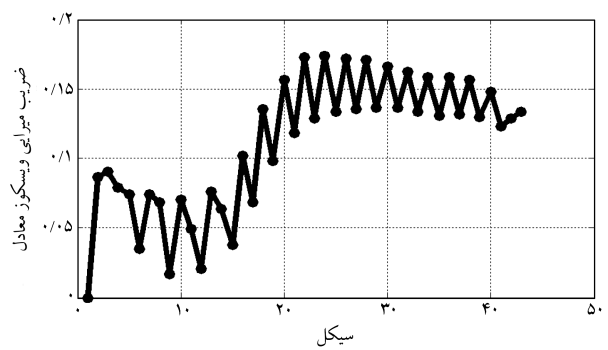
در تحلیل های عددی با نرم افزار ANSYS برای حل عددی دیوارهای برشی فولادی به دو روش می توان عمل کرد. در روش اول ابتدا یک تجزیه و تحلیل کماتش مقادیر ویژه^۹ برای پیدا کردن مودهای کماتشی ورق جان انجام می شود. در مرحله ی بعد با توجه به مودهای کماتش، تغییر شکل ها و شرایط اولیه ی متناسب با آنها به سازه اعمال و تحلیل غیرخطی با تغییر مکان های کوچک^{۱۰} تحت بار یکنواخت و یا بار سینکلی انجام می شود. همچنین به جای تحلیل غیرخطی با تغییر مکان های کوچک ترجیحاً از تحلیل غیرخطی گذرا با تغییر مکان های بزرگ^{۱۱} استفاده شود.

مقدار نقص اولیه^{۱۲} تأثیر قابل توجهی در رفتار بعد از کماتش ورق ندارد. به هر حال این نکته نیز باید در نظر گرفته شود که اگر مقدار نقص اولیه بیشتر از ۱ درصد $\sqrt{L/h}$ (که L و h ابعاد ورق جان است) باشد، کاهش سختی قابل توجه است.^[۱۸] در روش دوم می توان از گزینه ی تحلیل غیرخطی با تغییر مکان های بزرگ^{۱۳} استفاده کرد. در این روش نیازی به استفاده از دو نوع تحلیل نیست. در این روش اثرات کماتش غیرخطی و کماتش موضعی به طور خودکار بر مبنای مودهای کماتشی اعمال می شود. این روش زمان بر است و نیاز به سعی و خطای بیشتری برای رسیدن به همگرایی دارد، اما معمولاً نتایج این روش دقیق تر از روش قبل است. در این روش مقدار نقص اولیه را نیز می توان به سازه اعمال کرد و این نقص اولیه در همگرایی پاسخ ها در هنگام کماتش کشسان ورق کمک می کند. در تحلیل ها از هر دو روش می توان مستقلاً استفاده کرد و نیازی به استفاده ی همزمان از هر دو روش در تحلیل ها نیست.^[۱۹]

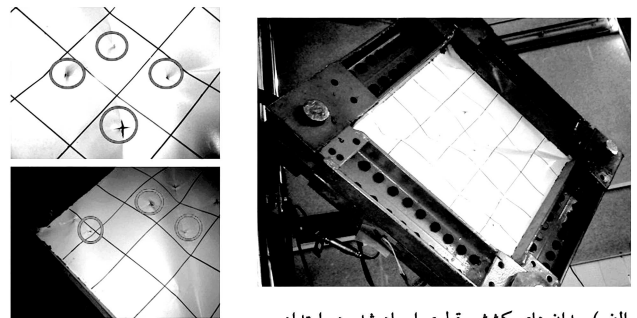
نوع تحلیل انجام شده در این بررسی از نوع تحلیل غیرخطی با تغییر مکان های بزرگ و با اعمال نقص اولیه بر اساس مود اول کماتش صورت گرفته است. نوع بارگذاری وارد بر سازه به صورت کنترل-تغییر مکان و به شکل پوش و اعمال بار در امتداد قطر نمونه و مشابه با شرایط آزمایشگاه انجام شده است.

۳.۴. نتایج تحلیل

در شکل ۱۲، وضعیت تنش های وان-میسز و تغییر مکان های خارج از صفحه ی پانل برشی فولادی نشان داده شده است. در این دو شکل تغییر شکل های کماتشی



شکل ۹. ضرب میرایی ویسکوز معادل نمونه ی آزمایشگاهی.



الف) میدان های کششی قطری ایجاد شده در امتداد قطر نمونه؛
ب) پارگی های ایجاد شده در جان ورق.

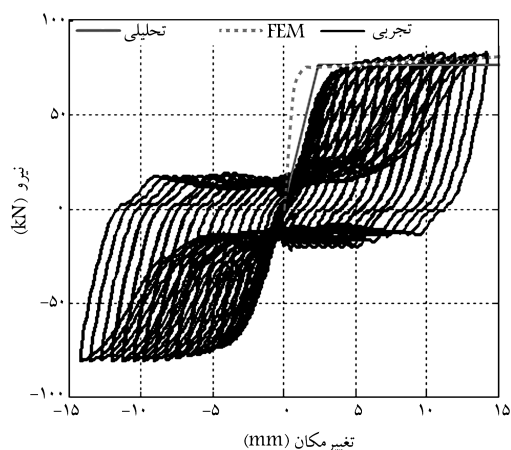
شکل ۱۰. وضعیت پانل برشی فولادی در مراحل پایانی آزمایش.

در شکل ۱۰ الف کماتش خارج صفحه در ورق جان پانل برشی فولادی و تشکیل میدان های کششی قطری نشان داده شده است. در طی بارگذاری، پارگی هایی در ورق جان در جابه جایی های نسبتاً زیاد به صورت موضعی رخ داده است که در شکل ۱۰ ب نشان داده شده است، همان طور که از منحنی هیستریزس پانل برشی نتیجه می شود، این گسیختگی های موضعی تأثیر قابل ملاحظه یی در کاهش مقاومت برشی پانل نداشته اند.

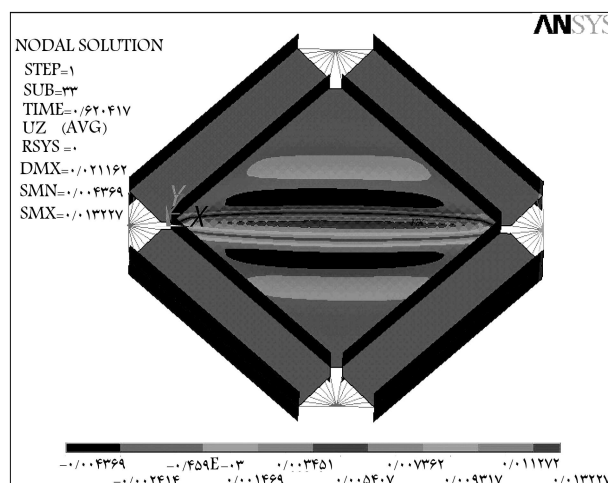
۴. مطالعه ی تحلیلی

۱.۴. مدل سازی

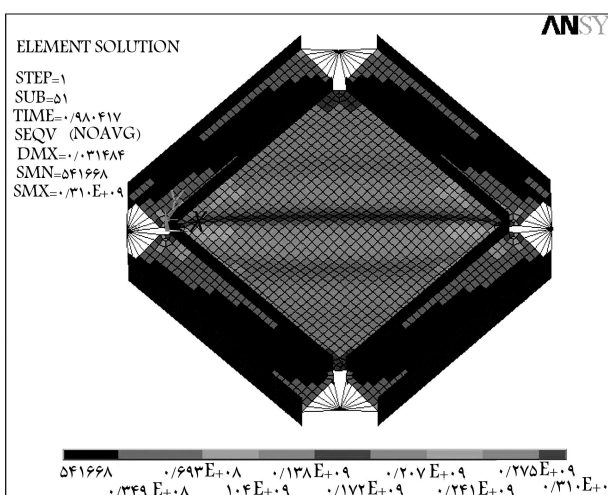
در مرحله ی بعدی نمونه ی اجزای محدود پانل برشی فولادی در نرم افزار ANSYS-۱۲ مدل سازی شد. المان مورد استفاده برای مدل سازی اعضای مرزی و ورق فولادی از نوع پوسته ی ۱۸۱ (shell 181) است. این المان ۴ گره یی است که هر گره آن دارای ۳ درجه ی آزادی انتقالی و ۳ درجه ی آزادی دورانی است و برای مدل سازی ورق ها و پوسته ها مناسب است. از ویژگی های مهم این نوع المان می توان به کاربرد آن در محدوده های خطی و غیرخطی، دوران ها و کرنش های بزرگ غیرخطی اشاره کرد. ابعاد المان ها هم به گونه یی انتخاب شده است که با کوچک تر شدن ابعاد مش تغییر قابل ملاحظه یی در نتایج تحلیل ایجاد نشود. برای ایجاد مفصل خمشی در اعضای بازویی از دو المان MPC 184 و COMBIN7 به طور ترکیبی استفاده شده است. با توجه به در اختیار بودن نتایج آزمون کشش برای مصالح فولادی استفاده شده در آزمایش، در مدل المان محدود رفتار مصالح فولادی به صورت چند خطه و مطابق شکل ۱۱ مدل سازی گردیده است. رفتار مصالح استفاده شده در قاب و ورق پرکننده به صورت رفتار خمیری سخت شونده ی سینماتیک^۷ و به صورت مستقل از سرعت^۸



شکل ۱۳. مقایسه‌ی نتیجه‌ی حاصل از آزمایشگاه با نتایج حل عددی و روش المان محدود.



الف) وضعیت تغییر مکان های خارج از صفحه؛



ب) وضعیت تنش های وان-میسز

شکل ۱۴. نتایج مدل اجزای محدود پانل برشی.

۵. ضوابط طراحی

برای استفاده از عملکرد مطلوب این نوع پانل‌ها در سیستم‌های مهاربندی همگرا، در طراحی باید تمهیداتی در نظر گرفت تا پانل بتواند وارد ناحیه‌ی خمیری شود. نکته‌ی اساسی در طراحی این سیستم آن است که ظرفیت کماتشی اعضای مهاربندی متصل‌شده به پانل باید بیشتر از ظرفیت پانل برشی فولادی باشد. اگر این شرط در طراحی اعمال نشود ممکن است قبل واردشدن پانل برشی فولادی به ناحیه‌ی خمیری، اعضای مهاربندی کماتش کنند و عملاً مکانیزم برشی در سیستم شکل نگیرد.

ظرفیت برشی یک قاب یک دهانه و یک طبقه با اتصال ساده‌ی تیر به ستون و سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی فولادی (شکل ۲ الف) از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$V_{Fr} = V_{Panel} \quad (1)$$

و ظرفیت تقریبی پانل برشی فولادی در امتداد محور مهاربند، با استفاده از رابطه‌ی ۲ برابر است با: [۲۰]

$$V_{Panel} = \frac{1}{\phi} \cdot \sigma_y \cdot b \cdot t \cdot \sin(2\alpha) \quad (2)$$

برای اطمینان از اینکه قبل از تسلیم پانل برشی فولادی اعضای مهاربندی تسلیم و یا کماتش نکنند، باید رابطه‌ی ۳ و ۴ کنترل شوند.

$$\Omega \cdot \frac{V_{Panel}}{\phi \cdot \cos(\gamma)} \leq T_{y(Brace)} \quad (3)$$

$$\Omega \cdot \frac{V_{Panel}}{\phi \cdot \cos(\gamma)} \leq P_{cr(Brace)} \quad (4)$$

در این روابط γ زاویه‌ی قرارگیری مهاربندها نسبت به افق، σ_y تنش تسلیم ورق پرکننده، b عرض پانل برشی، t ضخامت ورق پرکننده، α زاویه‌ی میدان‌های کششی نسبت به عرض پانل بر اساس آیین‌نامه‌ی کاناداست. کنترل رابطه‌ی ۳ بمنظور اطمینان از تسلیم شدن پانل قبل از اعضای مهاربندی درکشش ارائه شده است. کنترل رابطه‌ی ۴ برای اطمینان از این است که قبل از واردشدن پانل به ناحیه‌ی غیرکشسان، کماتش تحت نیروهای فشاری در اعضای مهاربندی رخ ندهد باشد.

ورق جان و میدان‌های کششی به‌خوبی قابل مشاهده است. بر این اساس می‌توان استنباط کرد که رفتار کلی مدل المان محدود توانسته است رفتار مدل آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کند. پیشینه‌ی تنش‌های به‌وجودآمده در ورق پرکننده در نقاط گوشه‌ی پانل برشی فولادی مشاهده شده است. پیشینه‌ی تغییرمکان خارج از صفحه‌ی پانل برشی فولادی در راستای قطری به‌وجود آمده است که مطابق با نتایج آزمایشگاهی است. نمودار نیرو-تغییرمکان پانل برشی فولادی در شکل ۱۳ نشان داده شده است، که در آن مدل المان محدود توانسته است به‌خوبی ظرفیت سیستم را برآورد کند. مقداری اختلاف بین سختی اولیه‌ی به‌دست آمده از روش المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، که می‌تواند ناشی از وجود تنش‌های پسماند در پروفیل‌های فولادی، عواملی از قبیل وجود لقی‌ها و رواداری‌ها در نمونه‌ی ساخته و نصب‌شده، وجود تنش‌های اولیه در اتصالات پیچی، عدم تطابق کامل اندازه‌ها و ابعاد بین نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی، تقریبی و یا متوسط بودن مدل‌های تحلیلی رفتاری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های کششی، عدم تطابق کامل بین مودهای کماتشی واقعی با مودهای کماتشی ایده‌آل تحلیلی، و یا عدم تطابق کامل شرایط مرزی در دو روش باشد.

همگراست. همچنین بررسی میزان انرژی جذب شده‌ی مدل آزمایشگاهی و سایر پارامترها از قبیل ضریب میرایی، نشان دهنده‌ی رفتار لرزه‌ی مطلوب این سیستم است. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که پانل برشی فولادی در این سیستم نقش یک المان فداکار با توانایی متمرکز کردن خسارات را دارد. از مزایای دیگر این سیستم، می‌توان به امکان تعویض پانل بعد از زلزله‌های شدید اشاره کرد. برای طراحی این سیستم و کنترل اجرای آن، روابطی نیز ارائه شده است. تطابق خوبی بین نتایج حاصل شده از روابط ارائه شده با نتایج حاصل از آزمایش و حل عددی وجود دارد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از کمک‌های مالی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و شرکت سیکا پارسیان در سال ۱۳۸۹ صورت گرفته است که بدینوسیله از همکاری اعضای گروه آزمایشگاه سازه و گروه پژوهشکده ی مهندسی تقدیر می‌شود.

پانوشتها

1. pure shear mechanism
2. tension field mechanism
3. coupon-test
4. rapid strength deterioration
5. slow strength deterioration
6. displacement-controlled quasi-static cyclic loading
7. kinematic hardening plasticity
8. rate independent
9. eigen-value buckling analysis
10. small displacement non-linear analysis
11. large displacement transient non-linear analysis
12. initial imperfection
13. large displacement non-linear analysis

منابع (References)

1. Nakagawa, S.; Kihara, H.; Torii, S.; Nakata, Y.; Fukuda, K.; Iwata, M. and Fujisawa, K. "Hysteretic behavior of low yield strength steel panel shear wall", *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, pp. 171-178 (June 1996).
2. Rai, D. and Wallace, B. "Aluminum shear-links for enhanced seismic resistance", *Earthquake Engineering Struct. Dyn.*, **27**(4), pp. 315-342 (1998).
3. Bruneau, M. and Bhagwagar, T. "Seismic retrofit of flexible steel frames using thin infill panels", *Engineering Structures*, **24**(4), pp. 443-453 (April 2002).
4. Foti, D. and Zambrano, A. "Shear panel for seismic protection of structures", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, pp. 1991 (August 2004).
5. Tanaka, K. and sasaki, Y. "Hysteretic performance of shear panel dampers of ultra-low yield- strength steel

در رابطه‌ی ۳، $T_{y(Brace)}$ نیروی تسلیم کششی در اعضای مهاربندی است و در رابطه‌ی ۴ $P_{cr(Brace)}$ نیروی کماتش حدی مهاربند در فشار، Ω ضریب اضافی مقاومت است که در این حالت براساس آیین‌نامه‌ی ASCE-۷-۰۵ در حدود ۲/۵ برای این نوع سیستم پیشنهاد می‌شود.^[۱۲] نتایج حاصل از این روش طراحی در شکل ۱۳ نشان داده شده است و مطابقت خوبی بین این نتیجه با نتایج حاصل از آزمایشگاه مشاهده می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌طور آزمایشگاهی و تحلیلی نوعی سیستم مهاربندی همگرای مرکب با پانل برشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از آزمایش مشاهده شد که این سیستم دارای رفتار هیستریزس مناسب‌تری در مقایسه با مهاربندهای

for seismic response control of buildings", *12th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.1248 (2000).

6. De Matteis, G.; Mazzolani, F.M. and Panico, S. "Experimental tests on pure aluminum shear panels with welded stiffeners", *Engineering Structures*, **30**(6), pp. 1734-1744 (2008).
7. Vargas, R. and Bruneau, M. "Analytical response and design of buildings with metallic structural fuses", *Journal of Structural Engineering*, **135**(4), pp. 383-393 (April 2009).
8. Formisano, A.; De Matteis, G. and Mazzolani, F.M. "Numerical and experimental behaviour of a full-scale RC structure upgraded with steel and aluminum shear panels", *Computers and Structures*, **88**, Issue 23-24, pp.1348-1360 (2010).
9. Mazzolani, F.M. "Innovative metal systems for seismic upgrading of RC structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **64**(7-8), pp. 882-895 (2008).
10. De Matteis, G.; Brando, G.; Panico, S. and Mazzolani, F.M. "Cyclic behaviour of bracing type pure aluminum shear panels (BTPASPs): Experimental and numerical analysis", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, (2008).
11. Mofid, M. and Tajammolian, H. "A parametric study on seismic behavior of one-story steel frames using yielding elements", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, (October 2008).
12. Alavi, E. Nateghi, A., F. "Analytical and Experimental Study on Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls," Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, IIEES, (August 2010).
13. Nateghi, F. and Alavi, E. "Theoretical seismic behaviour of steel plate shear walls", *The 14th World Confer-*

ence on Earthquake Engineering, Beijing, China, No. 05-050120, (2008).

14. Alavi, E. and Nateghi, F. "Nonlinear behavior of diagonally stiffened steel plate shear walls", *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, pp. 45 (2010).

15. Applied Technology Council, ATC-24, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Component of Steel structures*, Redwood City, CA (1992).

16. ASTM, A., 370-03a, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2005).

17. Chen, W. and Zhang, H. "Structural plasticity theory, problems, and CAE software", Springer-Verlag, New York Inc. (1991).

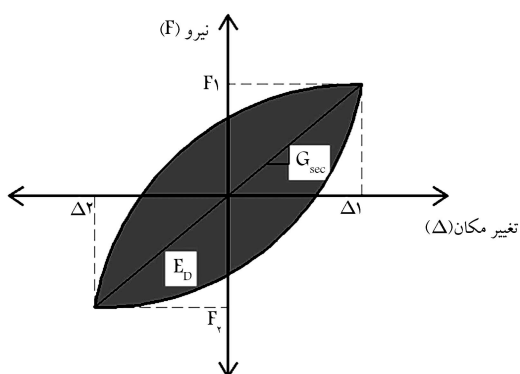
18. Topkaya, C. and Atasoy, M. "Lateral stiffness of steel plate shear wall system", *Thin-Walled Structures*, **47**(8-9), pp. 827-835 (2009).

19. Alavi, E., Nateghi, A., F., "Theoretical and Analytical Study of Non-Linear Behavior of Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls", *ESTEGHLAL Journal of Engineering*, Isfahan University of Technology, **28**, (1), pp. 75-92 (2009).

20. Berman, j. and Bruneau, M. "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, **129**(11), pp. 1448-1456 (November 2003).

21. AISC 7-05, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ISBN 0-7844-083 pp.1-9 (2005).

22. Roy, R. Craig, and Andrew J. Kurdila, *Fundamentals of Structural Dynamic*, Second Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, ISBN 13: 978-0-471-43044-5 (2006).



شکل ۱. یک حلقه از منحنی هیستریزس سیستم.

۳. میرایی ویسکوز معادل:

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{E_D}{E_S} \right)$$

$$E_S = \frac{1}{\lambda} (F_1 - F_2) \times (\Delta_1 - \Delta_2)$$

پیوست

I: زاویه‌ی پیشنهاد شده براساس استاندارد طراحی فولادی کانادا (CAN/CSA-S16-01) براساس مطالعات کولاک و همکاران برابر است با:

$$\tan^{\circ} \alpha = \frac{\frac{r}{t.b} + \frac{1}{A_c}}{\frac{r}{t.b} + \frac{r.d}{A_b.b} + \frac{d^2}{180.I_f.b^2}}$$

$$\theta = 90 - \alpha$$

در این روابط A_c و A_b به ترتیب سطح مقطع ستون تیر، b و d به ترتیب عرض و ارتفاع پانل، t ضخامت ورق پرکننده، I_f ممان اینرسی ستون و زاویه‌ی میدان‌های کششی با افق است.

II: پارامترهای رفتاری مطابق شکل ۱ [۲۲]

۱. انرژی مستهلک شده: سطح زیر هر حلقه‌ی منحنی هیستریزس (E_D):

۲. سختی سکانت:

$$G_{sec} = \frac{\Delta F}{\Delta L} = \frac{F_1 - F_2}{\Delta_1 - \Delta_2}$$