

## کمانش خارج از صفحه دیوارهای برشی فولادی تقویت شده با ورق نازک

مهناز امانخانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب  
فریبرز ناطقی الهی، استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
مصطفی برقی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

### چکیده

فولادی و کارایی آن نیاز به انجام آزمایشهای مختلفی دارد و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی می‌توان به نتایج تئوریک به دست آمده اطمینان کرده و حاصل این نتایج در مقاصد طراحی و عملی به کار برده شود. مزایای ویژه سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به دیگر سیستم‌های مقاوم باعث گسترش روزافزون استفاده از این سیستم شده است.

سیستم دیوار برشی بررسی شده شامل یک سری پانل‌های مجزا می‌باشد که هر پانل از بالا و پایین به تیرها و از طرفین به ستونها متصل شده است.

این سیستم در مقایسه با سیستم دیوار برشی بتنی از مزیت‌هایی نظیر کاهش وزن ساختمان و به تبع آن کاهش نیروهای جانبی وارده، کاهش در هزینه ساخت فونداسیون، افزایش فضای مفید هر طبقه ساختمان، هم جنس بودن با قابهای فولادی، سرعت ساخت بالا، مقاوم‌سازی سازه‌های ضعیف و آسیب‌دیده، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا، سختی و مقاومت بالا را برخوردار می‌باشد.

ساخت این دیوارها در امریکای شمالی (امریکا و کانادا) و همچنین ژاپن رونق بیشتری دارد. در امریکای شمالی از دیوارهای تقویت نشده و در ژاپن از دیوارهای تقویت شده استفاده می‌شود و این به دلیل نیاز شدید سازه به مقاومت در برابر تعداد زلزله‌های زیاد و شدید می‌باشد.

### ۲- مدل‌های تحلیلی

دیوار برشی فولادی مورد تحلیل به صورت قاب تک دهانه در یک طبقه با مقیاس ۱/۲ به ابعاد ۱۸۰۰×۱۲۰۰ میلیمتر می‌باشد که از پروفیل *IPB160* برای المانهای مرزی دیوار استفاده شده است. در محل اتصال تیر به ستون از سخت‌کننده به ضخامت ۱۰ میلیمتر در جان ستون و در

دیوار برشی فولادی یک نوع سیستم ابتکاری مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله و باد می‌باشد و در مقایسه با دیگر سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی از قبیل قاب خمشی و قاب بادبندی شده عملکرد بهتری دارد. یکی از راههای مؤثر بهبود رفتار کمانشی دیوارهای برشی فولادی استفاده از سخت‌کننده‌ها است. سخت‌کننده‌ها با جلوگیری از کمانش ورق فولادی قبل از جاری شدن، باعث بهبود رفتار آنها شده و علاوه بر این باعث افزایش سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی می‌شوند. از این رو در تحقیق حاضر، تقویت دیوارهای برشی فولادی با انواع سخت‌کننده‌ها، از جمله سخت‌کننده‌ها با آرایشهای افقی، عمودی، افقی-عمودی توأماً، قطری و ضربدری در فواصل مختلف بررسی شده‌اند. تمامی مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار *ANSYS* تحت تحلیل غیرخطی اجزاء محدود قرار می‌گیرند. این تحلیل با فرض رفتار غیرخطی هندسی به صورت جابه‌جایی‌های بزرگ به روش کنترل نیرو می‌باشد. نتایج بررسی حاکی از آن است که استفاده از سخت‌کننده‌های ضربدری در حدود ۵۰ درصد تغییرشکل خارج از صفحه دیوار را کاهش می‌دهد. این در حالی است که سخت‌کننده‌های عمودی تأثیر کمتری داشته و در حدود ۳۰ درصد تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: دیوار برشی فولادی، سخت‌کننده، کمانش

### ۱- مقدمه

سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی عبارتند از قابهای خمشی-قابهای بادبندی-دیوارهای برشی یا سیستم‌های هسته‌ای. شناخت رفتار کلی سیستم دیوارهای برشی

ارتفاع دیوارها برابر ۱۵۰ سانتیمتر می‌باشد، تغییرمکان هدف برابر ۷/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

مشخصات مصالح در مدل‌های تحلیلی طبق جدول (۱) می‌باشد:

جدول (۱): مشخصات مصالح به کار رفته در آزمایشگاه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

گرنش	تنش (نیوتن بر متر مربع)	
۰/۰۰۱۳۳۳۳	$2/8 \times 10^4$	فولادی
۰/۰۲	$2/8 \times 10^4$	
۰/۱۶	$4/2 \times 10^4$	
۰/۱۷	صفر	
۰/۰۰۱۶۱۹	$3/4 \times 10^4$	المانهای مرزی
۰/۰۱۵	$3/4 \times 10^4$	
۰/۱۵	$5/8 \times 10^4$	
۰/۱۶	صفر	

همان‌طور که مشاهده می‌شود از فولاد نرم جهت دیوار برشی فولادی استفاده شده است تا مفصل پلاستیک ابتدا در دیوار تشکیل شود. به بیانی دیگر سازه در تغییرمکان کمتری وارد ناحیه غیرخطی شده و شروع به جذب انرژی می‌کند و بدون آسیب دیدن اجزای اصلی باربر سازه مانند ستونها و تیرها، آن قسمت از سازه که وظیفه جذب انرژی را بر عهده دارد، زودتر شروع به جذب انرژی می‌کند که این فلسفه به خوبی در نمودار به دست آمده مشاهده می‌شود.

دیوارهای برشی فولادی در مراحل اولیه بارگذاری دچار کماتش خارج از صفحه خواهند گردید. این پدیده به علت نازک بودن این دیوارها نسبت به ابعاد آنها می‌باشد. بررسی شکل کماتش یافته این دیوارها، نحوه ایجاد میدان کششی و چگونگی توزیع تنشها را در صفحه دیوار نشان می‌دهد و میزان تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار که از مدل‌های تحلیلی به دست می‌آید، گویای شدت آسیب هندسی احتمالی وارد بر دیوار بوده و بر تصمیم‌گیری بر نحوه ترمیم آن پس از وقوع زلزله تأثیرگذار خواهد بود. واضح است که دیوار فاقد سخت‌کننده نسبت به دیوار دارای سخت‌کننده تغییرشکل‌های خارج از صفحه بیشتری را در حین بارگذاری تحمل خواهد کرد. در این تحقیق مدل‌ها به دو صورت کلی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده می‌باشند.

محاذات بال تیر و از ورق فولادی به ضخامت ۵ میلیمتر و عرض ۴ سانتیمتر به عنوان سخت‌کننده‌های قطری دیوار برشی و فیوز استفاده شده است. منظور از فیوز، قطعات بریده شده از گوشه‌های دیوار در محل اتصال تیر و ستون به شکل مثلثی به اضلاع ۸ و ۱۲ سانتیمتر است. این بریدگی باعث کاهش تمرکز تنش در گوشه‌های دیوار شده و مانع از پارگی زود هنگام آن می‌گردد.

در مدل‌های مورد بررسی، هدف فقط بررسی رفتار برشی ورق می‌باشد و رفتار تیرها و ستونهای محیطی مد نظر قرار نمی‌گیرد. به همین علت در این تحقیق برای کلیه مدل‌ها از یک مقطع برای اعضاء مرزی استفاده شده است. نمونه‌های مدل شده تحت اثر دو نوع بارگذاری قرار گرفته‌اند:

الف) بار قائم ۸ تن بر روی هر ستون جهت منظور نمودن اثر بارهای ثقیلی.

ب) بار جانبی افزایشی از مقدار صفر تا حدی که تغییر- مکان جانبی سازه به حد مجاز (۷/۵ سانتیمتر) برسد. اعمال بار بر مدل بر اساس کنترل نیرو انجام یافته است.

به علت محدودیت‌های نرم‌افزار مورد استفاده در ابتدای کار و برای کالیبره نمودن مدل اولیه از روش آنالیز استاتیکی خطی استفاده شده است که فقط در محدوده الاستیک نتایج معتبر می‌باشد.

در مرحله دوم برای مشاهده مود کماتشی نمونه‌ها و مقدار بار کماتشی آنها، از آنالیز کماتش خطی استفاده شده است. پس از اطمینان از صحت مود کماتشی نمونه‌ها در مرحله سوم آنالیز کماتش غیرخطی صورت گرفته است. این آنالیز بسته به نوع مدل می‌تواند بسیار وقت‌گیر باشد.

روش تحلیل در نمونه‌های مذکور بر اساس کنترل نیرو می‌باشد. بر این اساس نیرو بتدریج افزایش یافته تا تغییرمکان به مقدار مجاز آن که ۷/۵ سانتیمتر می‌باشد محدود گردد و بر این اساس ظرفیت باربری قابل قبول برای سیستم به دست می‌آید. بر اساس مطالعات انجام شده و آزمایشهای مختلف در خصوص دیوارهای برشی فولادی حداکثر تغییرمکان مجاز سیستم در حدود ۵ درصد ارتفاع دیوار توصیه شده است که در مدل‌های تحت بررسی که

فولادی به دلیل وجود تیر و ستون در اطراف آن این شرایط برقرار می‌باشد)، نیروهای پس از کمانش آن چندین برابر نیروهای کمانش تئوریک است. در این حالت، مکانیزم بار-مقاومت، در نقطه کمانش از مقاومت برشی صفحه به مقاومت میدان کششی قطری (*diagonal tension field*) آن تبدیل می‌شود [۳].

بیشتر کارهای تحقیقاتی در مورد پس کمانش صفحات، تحت بارهای مونوتونیک انجام شده است و مطالعات کمی بر روی رفتار پس از کمانش صفحات نازک تحت بارهای سیکلی انجام گرفته است [۴].

کولاک و ترومپوچ در سال ۱۹۸۷ یک پانل را در دامنه بعد از کمانش تحت بارگذاری سیکلی قرار دادند و با استفاده از مدل نواری تاریخچه تغییر مکان پانل را محاسبه کردند [۵].

در نمودار (۱)، نمودارهای پوش هیستریزیس مدل‌های مختلف دیوار برشی با سخت‌کننده‌های ضربدری، سخت‌کننده‌های قطری و با سخت‌کننده‌های افقی-عمودی و سخت‌کننده‌های افقی تنها و سخت‌کننده‌های قائم نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود، اضافه کردن این نوع سخت‌کننده باعث بهبود رفتار هیستریزیس دیوار برشی شده و سبب افزایش ظرفیت باربری سیستم می‌گردد، به طوری که اگر فاصله سخت‌کننده‌ها ۳۰ سانتیمتر باشد و در یک طرف دیوار نیز قرار داشته باشند این افزایش ظرفیت، نسبت به دیوار برشی بدون سخت‌کننده، ۴۰ درصد خواهد بود.

افزودن سخت‌کننده‌های قطری به عنوان عامل تقویتی دیوارهای برشی فولادی سبب افزایش ظرفیت باربری سیستم می‌گردد، به طوری که اگر فاصله سخت‌کننده‌ها ۱۵ سانتیمتر باشد و در یک طرف دیوار نیز قرار داشته باشند این افزایش ظرفیت، نسبت به دیوار برشی بدون سخت‌کننده، ۳۰ درصد خواهد بود.

همچنین نمودار پوش هیستریزیس حاصل از دیوار برشی با سخت‌کننده‌های افقی-عمودی نشان می‌دهد که اضافه کردن این نوع سخت‌کننده موجب افزایش ظرفیت حدود ۱۵ درصد نسبت به دیوار برشی بدون سخت‌کننده می‌گردد. اضافه کردن سخت‌کننده‌های افقی تنها و سخت‌کننده‌های عمودی تقریباً بر روی رفتار هیستریزیس دیوار برشی

سخت‌کننده‌ها ممکن است در یک یا هر دو طرف دیوارها قرار داشته باشند. سخت‌کننده‌ها به اشکال ضربدری به فواصل ۳۰ سانتیمتر، قطری به فواصل ۱۵ سانتیمتر، افقی-عمودی توأماً به فواصل ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر، افقی تنها به فواصل ۲۰ سانتیمتر و قائم به فواصل ۳۰ سانتیمتر می‌باشند، و در نهایت دیوار بدون سخت‌کننده مورد آنالیز قرار گرفته است (ضخامت سخت‌کننده‌ها ۱/۰ میلی‌متر لحاظ شده است).

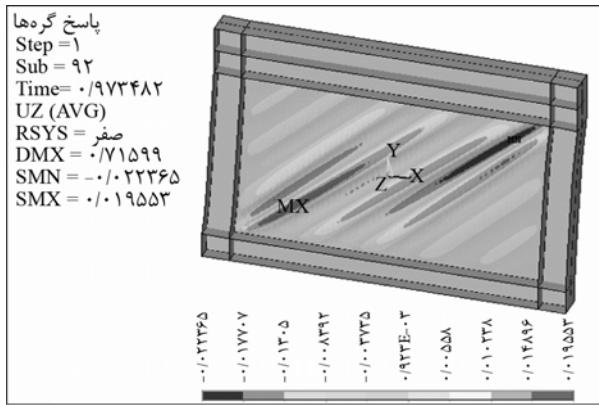
چندین مدل عددی دیوار برشی فولادی یک طبقه با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با نرم‌افزار ANSYS ایجاد شده‌اند. به منظور اعمال اثر پدیده کمانش در نتایج تحلیلی مطالعات زیادی توسط محققین صورت گرفته است که در این بخش به برخی از آنها اشاره می‌گردد.

اولین کار جدی برای بررسی مقاومت پس از کمانش پانل‌های برشی توسط واگنر در سال ۱۹۳۱ انجام شد. وی بر اساس آزمایشهایی که بر روی پانل‌های برشی نازک از جنس آلومینیوم انجام داد، تئوری میدان کششی قطری خالص را ارائه کرد. صفحات بر خلاف ستونها پس از رسیدن به حد کمانش تشکیل میدان کششی قطری می‌دهند و تا چندین برابر بار کمانش، نیرو تحمل می‌کنند. کوهن در سالهای ۱۹۵۲ و ۱۹۵۶ تئوری میدان کشش قطری ناقص را ارائه کرد که در آن ظرفیت برش نهایی پانل ترکیبی از برش خالص و کشش قطری فرض شد [۱].

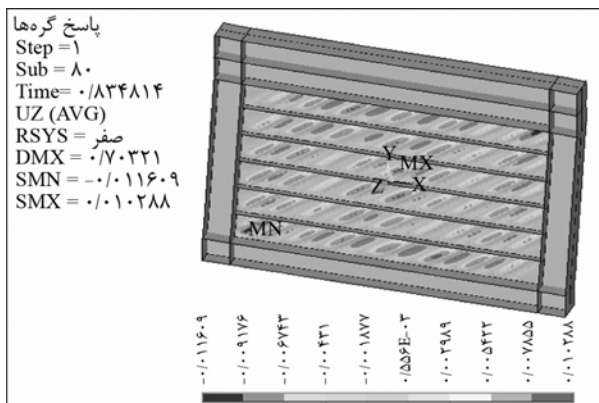
در سال ۱۹۹۵، کولاک، درایور، کندی والوی از دانشگاه آلبرتا با آزمایش یک دیوار برشی فولادی چهار طبقه یک دهانه با مقیاس بزرگ که تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شده بود و با انجام تحلیل اجزاء محدود، مدل آزمایشگاهی نتایج را به دست آورده و با یکدیگر مقایسه کردند [۱].

همان طور که قبلاً اشاره شد، صفحه دیوار برشی فولادی می‌تواند با تقویت یا بدون تقویت باشد. سخت‌کننده‌ها هم به صورت طولی و هم به صورت عرضی و هم به شکل قطری بر روی صفحه مورد نظر اجرا می‌شوند [۲].

باید ذکر شود که کمانش صفحه به معنای انهدام و فروریختن و یا خرابی سازه نیست و اگر صفحه به اندازه کافی تکیه‌گاه مرزی داشته باشد (که در دیوارهای برشی



شکل (۱): تغییرشکل‌های خارج از صفحه در اثر کماتش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۰ میلیمتر.

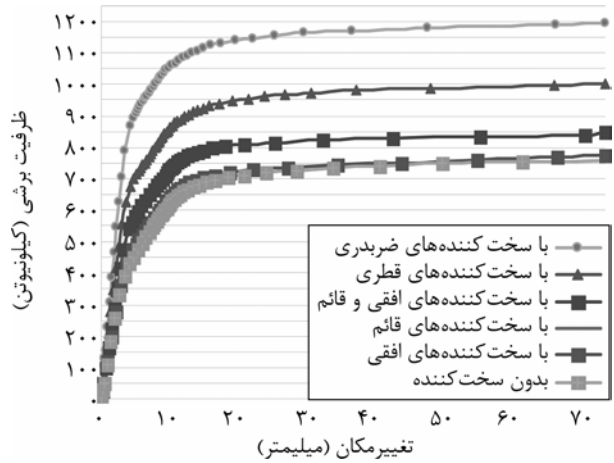


شکل (۲): تغییرشکل‌های خارج از صفحه در اثر کماتش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۰ میلیمتر و با سخت‌کننده افقی به فواصل ۲۰ سانتیمتر در یک طرف دیوار.

در شکل (۳)، تغییرشکل‌های خارج از صفحه برای دیوار با ضخامت ۱/۰ میلیمتر با سخت‌کننده افقی یک طرفه به فواصل ۲۰ سانتیمتر و سخت‌کننده قائم یک طرفه به فواصل ۳۰ سانتیمتر نشان داده شده است. همچنان که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، تغییرمکان حداکثر برابر ۲۲/۳۶ میلیمتر و در شکل (۳) این عدد برابر با ۱۰/۵۴ میلیمتر می‌باشد که به حدود نصف مقدار اولیه کاهش یافته است. با مقایسه نتایج فوق با نتایج حاصل از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده افقی - عمودی نسبت به سخت‌کننده‌های افقی تنها در حدود ۱۰ درصد اثر کماتش را در دیوار بهبود بخشیده است.

در شکل (۴)، تغییرشکل‌های خارج از صفحه برای دیوار با سخت‌کننده عمودی یک طرفه به فواصل ۳۰ سانتیمتر

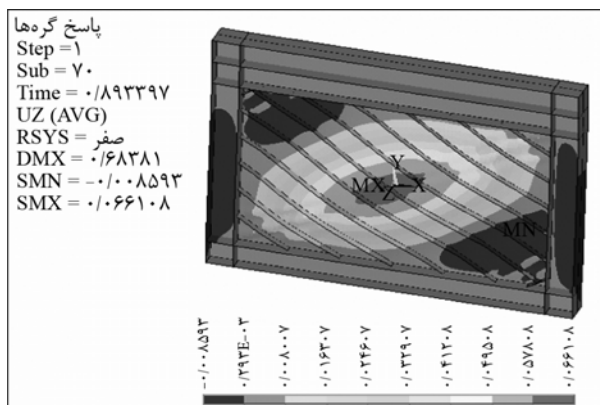
اثر چندانی ندارد و افزودن آن به عنوان عامل تقویتی دیوارهای بدون بازشو تقریباً کارایی نخواهد داشت. هر چند که در دیوارهای دارای بازشو برای جلوگیری از کماتش لبه بازشو این سخت‌کننده‌ها ضروری می‌باشند.



نمودار (۱): مقایسه منحنی‌های پوش حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۰ میلیمتر.

دیوارهای برشی فولادی در مراحل اولیه بارگذاری دچار کماتش خارج از صفحه خواهند گردید. این پدیده به علت نازک بودن این دیوارها نسبت به ابعاد آنها می‌باشد. بررسی شکل کماتش یافته این دیوارها میدان کششی را در صفحه دیوار نشان می‌دهد و میزان تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار که از مدل‌های تحلیلی به دست می‌آید، گویای شدت آسیب هندسی احتمالی وارد بر دیوار بوده و بر تصمیم‌گیری بر نحوه ترمیم آن پس از وقوع زلزله تأثیرگذار خواهد بود. واضح است که دیوار فاقد سخت‌کننده نسبت به دیوار دارای سخت‌کننده تغییرشکل‌های خارج از صفحه بیشتری را در حین بارگذاری تحمل خواهد کرد.

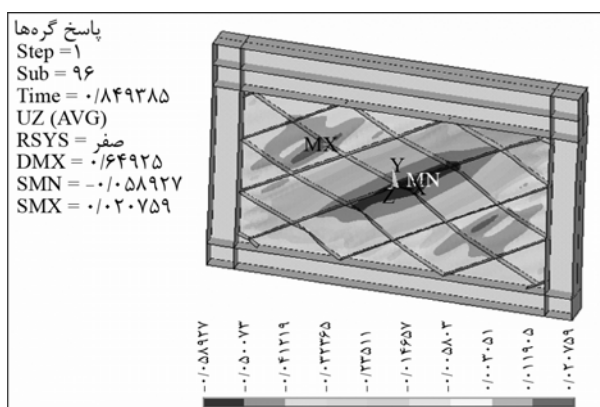
در شکل‌های (۱) و (۲)، تغییرشکل‌های خارج از صفحه برای دیوار با ضخامت ۱/۰ میلیمتر بدون سخت‌کننده و دیوار با سخت‌کننده افقی یک طرفه به فواصل ۲۰ سانتیمتر نشان داده شده است. هم‌چنان که ملاحظه می‌شود در شکل (۱) تغییرمکان حداکثر برابر ۲۲/۳۶ میلیمتر و برای شکل (۲) این عدد برابر است با ۱۱/۶۱ میلیمتر، که به حدود نصف مقدار اولیه کاهش یافته است. بنابراین ملاحظه می‌شود که وجود سخت‌کننده‌های افقی در کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار کاملاً مؤثر می‌باشند.



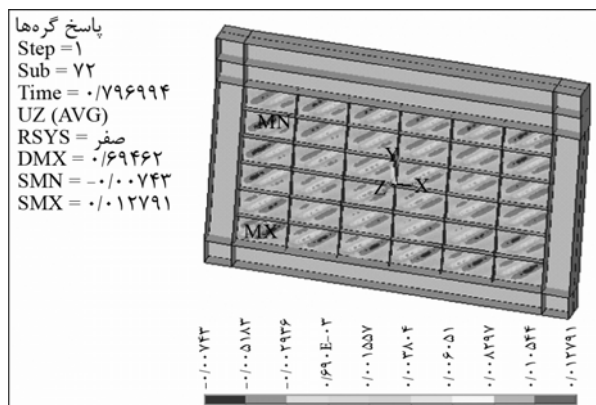
شکل (۵): تغییرشکلهای خارج از صفحه در اثر کمانش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با سخت‌کننده قطری به فواصل ۱۵ سانتیمتر.

در شکل (۶)، تغییرشکلهای خارج از صفحه برای دیوار با سخت‌کننده ضربدری یک طرفه به فواصل ۳۰ سانتیمتر نشان داده شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود در شکل (۱)، تغییرمکان حداکثر برابر ۲۲/۳۶ میلی‌متر و در شکل (۶) برابر است با ۱۱/۹۱ میلی‌متر، که به حدود نصف مقدار اولیه کاهش یافته است.

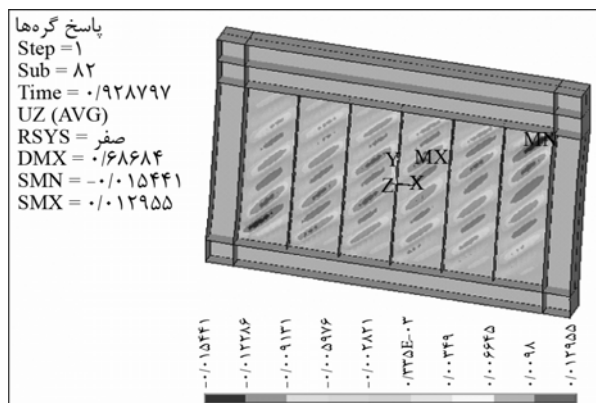
در این بخش به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصله از روشهای عددی به کار رفته، منحنی پوش به دست آمده از روش المانهای محدود برای دیوار برشی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر بدون سخت‌کننده با منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی آن نمونه مقایسه شده است. بر اساس نمودار (۲)، منحنی پوش حاصل از آنالیز تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل (۶): تغییرشکلهای خارج از صفحه در اثر کمانش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با سخت‌کننده ضربدری به فواصل ۳۰ سانتیمتر.



شکل (۳): تغییرشکلهای خارج از صفحه در اثر کمانش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با سخت‌کننده افقی به فواصل ۲۰ سانتیمتر و سخت‌کننده عمودی به فواصل ۳۰ سانتیمتر در یک طرف دیوار.



شکل (۴): تغییرشکلهای خارج از صفحه در اثر کمانش (بر حسب متر) در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با سخت‌کننده عمودی به فواصل ۳۰ سانتیمتر.

نشان داده شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود، در شکل (۱) تغییرمکان حداکثر برابر ۲۲/۳۶ میلی‌متر و برای شکل (۴) برابر است با ۱۵/۴۴ میلی‌متر، که اختلاف کمی با یکدیگر دارند. بنابراین ملاحظه می‌شود که وجود سخت‌کننده‌های عمودی در کاهش تغییرشکلهای خارج از صفحه دیوار تأثیر کمتری داشته و در حدود ۳۰ درصد تغییرشکلهای خارج از صفحه دیوار را کاهش می‌دهد.

در شکل (۵)، تغییرشکلهای خارج از صفحه برای دیوار با سخت‌کننده قطری به فواصل ۱۵ سانتیمتر نشان داده شده است. همچنان که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، تغییرمکان حداکثر برابر ۲۲/۳۶ میلی‌متر و در شکل (۵) برابر ۸/۵۰ میلی‌متر است که اختلاف قابل توجهی می‌باشد.

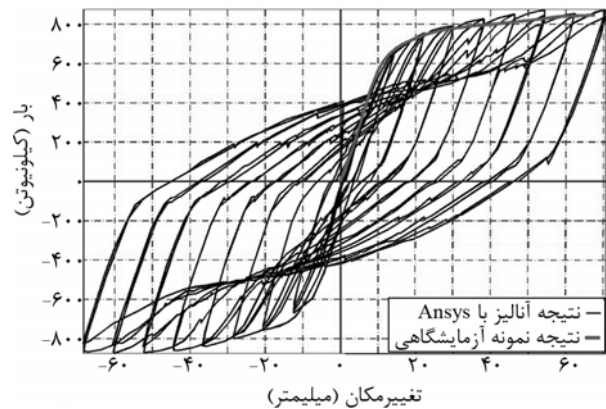
تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار کاملاً مؤثر می‌باشند. به طوری که افزودن این نوع سخت‌کننده‌ها سبب می‌شود که اثر کماتش به حدود نصف مقدار اولیه کاهش یابد.

۸- اضافه کردن سخت‌کننده‌های قطری و ضربدری باعث بهبود رفتار هیستریزس دیوار برشی شده است و اضافه کردن این نوع سخت‌کننده به عنوان عامل تقویتی دیوارهای برشی فولادی سبب افزایش ظرفیت باربری سیستم می‌گردد.

۹- افزودن سخت‌کننده‌های افقی، قائم و افقی-قائم توأماً، تقریباً بر روی رفتار هیستریزس دیواربرشی اثر چندانی ندارد و اضافه کردن این نوع سخت‌کننده‌ها به عنوان عامل تقویتی دیوارهای بدون بازشو تقریباً کارایی نخواهد داشت.

#### ۴- مراجع

1. Elgaaly, M. (1998). Thin steel plate shear walls behavior and analysis, *Thin-Walled Structure*, **32**, 151-180.
2. Kulak, G.L. (1998). Unstiffened steel plate shear walls: static and seismic behaviour, *Elsevier Applied Science*, Chapter 9.
3. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, J.L., and Elwi, A.E. (1998). FE and simplified models of steel plate shear wall, *Structural Engineering*, **124**(2).
4. Rezai, M., Ventura, C.E., and Prion, H. (2004). Simplified and detailed finite element models of steel plate shear walls, *13<sup>th</sup> WCEE*, Vancouver, Canada.
5. Kulak, G.L. and Tromposch, E.W. (1996). Seismic performance of steel plate shear walls based on a large-scale multi-story test, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.
6. Nateghi, F. and Alavi, E. (2008). Theoretical seismic behaviour of steel shear walls, *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.



نمودار (۲): مقایسه منحنی هیستریزس حاصل از آزمایشگاه (مدل آزمایشی ناطقی-علوی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله-شناسی و مهندسی زلزله) با منحنی پوش حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلیمتر [۶].

#### ۲- نتیجه‌گیری

بررسیهای انجام شده نشان می‌دهند که:

- ۱- وجود سخت‌کننده‌های افقی، در کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار کاملاً مؤثر می‌باشند.
- ۲- افزودن سخت‌کننده‌های افقی-عمودی نسبت به سخت‌کننده‌های افقی تنها در حدود ۱۰ درصد اثر کماتش را در دیوار بهبود بخشیده است.
- ۳- وجود سخت‌کننده‌های عمودی در کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار چندان مؤثر نمی‌باشند.
- ۴- وجود سخت‌کننده‌های قطری، در کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار نیز کاملاً مؤثر می‌باشند. اثر آنها نسبت به سایر آرایشها در سخت‌کننده‌ها، در کاهش کماتش خارج از صفحه دیوار، بیشتر می‌باشد.
- ۵- وجود سخت‌کننده‌های ضربدری، در کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار نیز کاملاً مؤثر می‌باشند.
- ۶- وجود سخت‌کننده‌های قطری و ضربدری، علاوه بر کاهش تغییرشکل‌های خارج از صفحه دیوار در افزایش ظرفیت باربری دیوار، نیز کاملاً مؤثر می‌باشند.
- ۷- کاربرد سخت‌کننده‌های افقی، در افزایش ظرفیت باربری دیوار نقش مهمی نداشتند؛ اما در کاهش