

کنترل آسیب و رفتار لرزه‌ای دیوار برشی بتن مسلح مرکزگرا دارای عضو فولادی تعویض‌پذیر با استفاده از تحلیل عددی غیرخطی

فهیمة شاهپوری^۱، عباسعلی تسنیمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی سازه، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: tasnimi@modares.ac.ir*

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

چکیده

کاربرد سیستم‌های کنترل غیرفعال برای افزایش پایداری و ایمنی سازه‌ها در برابر نیروهای ناشی از زلزله همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. از طرفی دیگر، در سال‌های اخیر، سیستم‌های لرزه‌بر جدیدی با عنوان سیستم‌های مرکزگرا به شکلی توسعه یافته‌اند که ضمن قابلیت جذب انرژی و کاهش یا حذف تغییرشکل‌های ماندگار، بتوانند دارای منحنی چرخه‌ای پرچمی شکل باشند. یکی از کاستی‌های سیستم مرکزگرا ناتوانی در کاهش یا جلوگیری از وارد آمدن آسیب به اعضای اصلی سازه است. برای رفع این ناتوانی می‌توان با ترکیب سیستم‌های کنترل غیرفعال به عنوان مستهلک کننده انرژی و سیستم‌های مرکزگرا، از وارد آمدن آسیب به اعضای اصلی سازه‌ای از جمله دیوارهای برشی بتن مسلح جلوگیری کرد. در دیوار برشی بتن مسلح مرکزگرا، بتن گوشه‌های پایین دیوار به دلیل نیروهای فشاری متمرکز در آن نواحی مستعد آسیب و خرد شدن است. در نتیجه المان کنترل غیرفعال با هدف حذف این آسیب و تعویض پذیر بودن، جایگزین بتن این نواحی می‌شود. در این مقاله بکارگیری یک عضو تعویض‌پذیر فولادی به عنوان یک سیستم کنترل غیرفعال برای استهلاک انرژی در پنجه و پاشنه (خالی شده) دیوار برشی بتن مسلح با استفاده از تحلیل عددی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی سه دیوار برشی بتن مسلح مرکزگرا که یکی با نام اختصاری SWED دارای میلگردهای مستهلک کننده انرژی و دیوار دوم با نام اختصاری SWEDN که در واقع همان دیوار اول است که دو گوشه پایینی آن به مقدار لازم برای جایگذاری عضو تعویض پذیر فولادی خالی شده است. دیوار سوم با نام اختصاری SWRS، مانند دیوار اول است با این تفاوت که فاقد میلگردهای مستهلک کننده انرژی بوده و از دو عضو تعویض پذیر فولادی تعبیه شده در دو گوشه خالی شده پاشنه و پنجه دیوار تشکیل شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که شکل‌پذیری و استهلاک انرژی دیوار دارای عضو تعویض‌پذیر نسبت به دیوار بدون عضو تعویض‌پذیر بیشتر است.

واژگان کلیدی: آسیب، دیوار برشی مرکزگرا، عضو تعویض پذیر فولادی، ورق فیوز، تحلیل عددی غیرخطی

۱- مقدمه

سازه‌ها شده است. رویکردهای نوین حاکی از آن است که سطح عملکرد ایمنی جانی کافی نیست و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها باید به گونه‌ای باشد که در زلزله‌های شدید سازه خسارت قابل توجه ندیده و با استفاده از یک سازوکار خاص بتوان با هزینه کم

بررسی‌های انجام شده در آثار زلزله‌های رخ داده در کشورهای لرزه‌خیز و دستیابی به پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه‌های مختلف مهندسی زلزله، منجر به کاهش خطر و آسیب پذیری

خسارت وارد شده به برخی از اعضای را که قابلیت تعویض یا ترمیم دارند، کنترل کرد [1-5]. در سیستم‌های متداول مقاوم برابر زلزله اغلب از تسلیم فولاد در ترکیب با سایر مصالح برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. پاسخ چرخه‌ای این سیستم‌ها در حالت آرمانی به صورت حلقه‌های کامل بوده که تغییر شکل و تغییر مکان نسبی ماندگار قابل توجهی خواهند داشت. وجود این تغییر مکان‌های ماندگار منجر به یکی از دو تصمیم تخریب و بازسازی کامل یا بهسازی با صرف هزینه‌های بسیار زیاد و گاهی بیشتر از هزینه بازسازی، اتخاذ می‌شود. برای حذف تغییر شکل‌های ماندگار از سیستم‌های مرکزگرا که دارای پاسخ چرخه‌ای پرچمی شکل هستند استفاده می‌شود. بنابراین برای افزودن قابلیت مرکزگرایی به دیوارهای برشی بتن مسلح از کابل‌های پیش‌تنیده به عنوان نیروی بازگرداننده که امکان حرکت گهواره‌ای را فراهم می‌کند، استفاده می‌شود. بدین ترتیب تغییر مکان نسبی ماندگار در بالاترین تراز دیوار کاهش می‌یابد. همچنین برای افزودن ظرفیت استهلاک انرژی از میلگردهایی که بخشی از آنها آزادانه (بدون درگیری با بتن) کشیده شوند استفاده می‌شود. نکته قابل توجه و مهم در این دیوارها این است که بعد از اعمال بار جانبی و وقوع حرکت گهواره‌ای، بتن ناحیه پنجه و پاشنه دیوار ولو با تامین محصورشدگی، دچار آسیب می‌شوند. در این مقاله سه دیوار بتن مسلح مرکزگرا و مشابه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. یکی از این دیوارها به عنوان نمونه مرجع (SWED) در نظر گرفته شده است. دیوار دوم (SWEDN) مانند دیوار اول و بدون پنجه و پاشنه است. دیوار سوم (SWRS) که همان دیوار دوم ولی بدون میلگردهای مستهلک کننده انرژی و دارای دو عضو تعویض پذیر است. عضو تعویض پذیر باید علاوه بر قابلیت تامین مقاومت بتن حذف شده در پاشنه و پنجه دیوار، ظرفیت استهلاک انرژی نیز داشته و در صورت آسیب دیدن به راحتی قابل دسترسی و تعویض باشد.

۲- پیشینه پژوهش

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مطالعه روی سیستم‌های مرکزگرا ابتدا با افزودن عناصر ویژه مرکزگرایی به دیوارهای برشی بتنی پیش ساخته و قاب‌های خمشی بتنی پیش ساخته در

دهه ۹۰ میلادی آغاز شد [6] اما پس از زمان کوتاهی استفاده از آن در سازه‌های فولادی نیز گسترش یافت [7-12]. گراما و همکاران [13] در سال ۱۹۹۹، دیوارهای بتنی پیش‌ساخته مرکزگرا را بر مبنای روش عملکردی طراحی کرده به شکلی که ملزم به تحمل زلزله طرح با کمترین خسارت و سطح عملکرد ایمنی جانی با خسارت قابل ترمیم (بدون فروریزش) باشند. بررسی آزمایشگاهی نشان داد که رفتار غیرخطی لرزه‌ای این دیوارها به دلیل باز شدن درز افقی در محل اتصالات پانل‌ها تامین شد. در سال ۲۰۰۱ رسترو و همکاران [14] دیوار برشی بتنی پیش ساخته مرکزگرا با کابل‌های پیش‌تنیده را که بتواند تحت زلزله‌های شدید رفتار ارتجاعی خود را حفظ کند، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. بر اثر اعمال بار جانبی رفت و برگشتی به این دیوار و حرکت گهواره‌ای یک درز افقی در پاشنه دیوار و کرنش‌های فشاری زیادی در پنجه دیوار شکل گرفت. این سیستم را رسترو و رحمان [15] در سال ۲۰۰۷ با محصور کردن بتن پاشنه و پنجه بهبود بخشیده و به منظور تامین استهلاک انرژی از میلگردهای فولادی معمولی که در محل اتصال به پی قرار داشتند استفاده کردند به طوری که در اثر بلندشدگی دیوار، این میلگردها تحت تنش‌های کششی به مرحله تسلیم برسند. در سال ۲۰۱۳، اسمیت و گراما [16] شش دیوار برشی بتن مسلح پیش ساخته را با مقیاس ۰/۴ آزمایش کردند. در نمونه‌های آزمایشگاهی اسمیت و گراما درز موجود بین پانل پایه و پانل بالایی نیز لحاظ شد. از طرف دیگر ایجاد بازشو در سیستم دیوار برشی پیش ساخته نیز برای اولین بار در نمونه‌های آزمایشگاهی اسمیت و کاراما مورد بررسی قرار گرفت که با استفاده از میلگردگذاری ویژه در نزدیکی بازشوها به رفتار مورد انتظار دست یافتند. گوا و همکاران [17] در سال ۲۰۱۴ یک دیوار بتن مسلح مرکزگرا با دمپرهای اصطکاکی توزیع شده در ارتفاع دیوار و همچنین استفاده از دو ژاکت فولادی، برای جلوگیری از پوسته شدن و خرد شدن بتن پای دیوار پیشنهاد کردند. لو و همکاران [18] در سال ۲۰۱۶ جزئیاتی ارائه دادند که در آن طرفین یک دیوار برشی مرکزگرا با شالوده ارتباط نداشته اما در ناحیه میانی دیوار با شالوده به صورت یکپارچه عمل کند. کابل‌های پیش‌تنیدگی که قابلیت مرکزگرایی سیستم را فراهم می‌آورند نیز به صورت

تعبیه شده در دو گوشه خالی شده پاشنه و پنجه دیوار تشکیل شده است. این دو دیوار در آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه تربیت مدرس ساخته و آزمایش شده‌اند. در جدول (۱) مشخصات هندسی دیوارها و شالوده آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی دیوارها (SWRS&SWED) و شالوده

Foundation Dimensions (mm)			Wall Dimensions (mm)		
Thickness	Total height	Height in length	Thickness	Length	Height
		Side Middel Side			
500	2300	(900) (500) (900)	150	1000	2000
		500 400 500			

Table 1. Geometrical specifications of both walls and foundation

جزئیات مربوط به مراحل ساخت و گام‌های آزمایش مصالح و دیوارها به طور کامل در مرجع (24) آورده شده است که برای رعایت تعداد صفحات مقاله، پس از این مختصری از مشخصات دیوارها ارائه می‌شود. میلگردهای افقی و قائم هر دو دیوار از دو سفره شبکه‌ای به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله مرکز به مرکز ۱۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است. در دیوار SWED دو میلگرد مستهلک کننده انرژی به شکلی گذاشته شده‌اند که بخش میانی آن‌ها به طول ۲۰۰ میلی‌متر با ورق‌های پلاستیکی پوشش داده شد تا بدون درگیری با بتن اطراف به صورت نجسبیده بتواند در حرکت گهواره‌ای دیوار، چه درکشش و چه فشار آزادانه تسلیم شوند. ناحیه فوقانی آن‌ها در بتن دیوار و ناحیه زیرین آن‌ها در بتن شالوده به صورت گیردار تعبیه شده‌اند. در هر دو دیوار از سه دسته کابل ۷ رشته‌ای به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر (نیم اینچ) و عبور داده شده از غلاف‌های قائم برای تأمین نیروی بازگرداننده استفاده شد. کابل میانی مطابق بر محور مرکزی دیوار به عنوان جانشین بار ثقلی و دو کابل سمت چپ و راست با خروج از مرکزیت ۱۹۰ میلی‌متر استفاده شد. بدین ترتیب پس از اعمال بار جانبی رفت و برگشتی، حرکت گهواره‌ای و بلند شدگی متناوب در پاشنه و پنجه دیوار رخ داده و در نتیجه مرکزگرایی دیوارها از طریق این کابل‌ها تأمین می‌شود. به منظور جلوگیری از آسیب دیدن بتن در نواحی فشاری (پنجه) باید با استفاده از میلگردهای محصور کننده قائم و خاموت‌هایی به فاصله ۵۰ میلی‌متر محصور شود. ناحیه محصور شدگی برای هر دو دیوار در شکل (۱) نشان داده شده است. طول و ارتفاع ناحیه محصور در دیوار SWED

نجسبیده در کناره‌های دیوار قرار داده شدند. ماریوس و همکاران [19] در سال ۲۰۱۸ از نبشی فولادی به عنوان المان مستهلک کننده انرژی که قابل تعویض باشند استفاده کردند. شو و همکاران [20] در سال ۲۰۱۸ یک دیوار بتن مسلح با دیسک فبری (فتر مسطح) پیشنهاد دادند که این فنرها به صورت قرینه در دو گوشه پایین دیوار نصب شده تا با تحمل نیرو و تغییرشکل، از خرد و پوسته شدن بتن آن نواحی جلوگیری کنند. کوی و همکارانش [21] در سال ۲۰۱۹ راهکاری برای حذف آسیب بتن پنجه و پاشنه دیوار برشی بتن مسلح مرکزگرا حین حرکت گهواره‌ای ارائه دادند. دیوار آن‌ها شامل بلوک‌های بتنی، گوشه‌های انعطاف پذیر، تیرهای اتصال، کابل‌های پیش‌تنیده نجسبیده و یک دمپر برشی تعویض‌پذیر است. آزمایش‌های چرخه‌ای روی دیوارهای دارای حرکت گهواره‌ای با کنترل آسیب وارد بر آن با تغییر شرایط دمپرها، الاستومرهای گوشه و کابل‌های پیش‌تنیده برای بررسی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها انجام شد. سو و ژانگ [22] در سال ۲۰۲۱ یک دیوار برشی مرکزگرا با یک مهاربند فولادی در پایین ترین طبقه برای کاهش تغییرمکان‌های پسماند و آسیب‌های وارد بر گوشه‌های دیوارهای بتنی پیشنهاد دادند. مهاربند فولادی پیشنهادی از یک تیر اتصال فولادی V شکل، یک یاتاقان و دو بادبند مرکزگرا برای کنترل تغییرشکل پسماند پلاستیک دیوار برشی بتنی تشکیل شده بود.

۳- بررسی آزمایشگاهی دیوارهای برشی بتن مسلح مرکزگرا

در این مقاله سه دیوار برشی بتن مسلح پیش ساخته مرکزگرا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دیوار اول دارای میلگردهای مستهلک کننده انرژی و با نام اختصاری SWED بر اساس ضوابط ACI ITG-5.2-09 [23] طراحی و برای انجام مقایسه به عنوان دیوار مرجع انتخاب شده است. دیوار دوم با نام اختصاری SWEDN است که در واقع همان دیوار اول است که دو گوشه پایینی آن به مقدار لازم برای جایگذاری عضو تعویض پذیر فولادی خالی شده است. بررسی رفتار دیوار SWEDN تنها به روش تحلیل عددی غیرخطی انجام شده است. دیوار سوم با نام اختصاری SWRS، مانند دیوار اول است با این تفاوت که فاقد میلگردهای مستهلک کننده انرژی بوده و از دو عضو تعویض پذیر فولادی

اتصال دارد. در نتیجه ناحیه وسط آن با لوله بلند شده و کناره‌های آن مثل یک تکیه‌گاه عمل می‌کند. با ایجاد سوراخ‌هایی در ورق فیوز، تعدادی مقطع بحرانی در ناحیه بین وسط تا کناره‌های آن پیش‌بینی شد تا با تسلیم شدن ورق فیوز در این نواحی، استهلاک انرژی سیستم تأمین شود. وقتی عضو تعویض‌پذیر تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد، از بین اجزا تشکیل دهنده آن رفتار و ظرفیت ورق فیوز حاکم است اما تحت نیروی فشاری، لوله، دیسک‌های داخل آن و سخت‌کننده‌ها در تأمین ظرفیت فشاری مشارکت دارند. ظرفیت فشاری عضو تعویض‌پذیر باید بتواند جایگزین مناسبی برای بتن محصور شده گوشه‌های دیوار بوده و از طرف دیگر ظرفیت کششی آن به قدری باشد که اولاً مانع حرکت گهواره‌ای دیوار نشده و ثانیاً استهلاک انرژی کافی را از طریق مقاطع بحرانی و ضعیف شده ورق فیوز با تسلیم شدن خود هنگام اعمال بار جانبی برای سیستم فراهم آورد.

شکل ۱. مشخصات دیوارها، SWRS و SWED

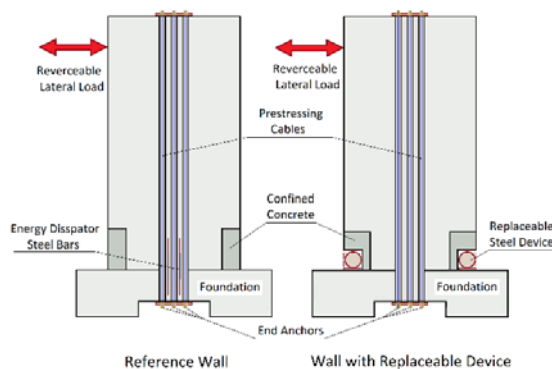


Fig. 1. General view of the SWED and SWRS walls

لازم به یادآوری است، که ظرفیت عضو تعویض‌پذیر یکی از مهم‌ترین عوامل طراحی در دیوارهای برشی مرکزگرا است. اگر ظرفیت عضو تعویض‌پذیر نسبت به دیوار خیلی بیشتر باشد، بخشی از دیوار که در مجاورت آن قرار دارد دچار آسیب شده و یکی از اهداف بکارگیری عضو تعویض‌پذیر ناممکن خواهد شد. از طرف دیگر اگر ظرفیت عضو تعویض‌پذیر نسبت به دیوار کمتر باشد، کاهش مقاومت ناشی از حذف بتن گوشه‌ها جبران نشده و استهلاک انرژی مورد نیاز تأمین نمی‌شود. روابط تحلیلی

به ترتیب ۲۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و برای دیوار SWRS به ترتیب ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن در دو قسمت ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر است. در جدول (۲) مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن برای دیوارها و شالوده آورده شده است. دیوار SWRS بدون میلگردهای مستهلک‌کننده انرژی است.

جدول ۲. خواص مکانیکی بتن دیوارها و شالوده

Foundation		Wall			
SWRS و SWED		SWRS		SWED	
E_c (MPa)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_c (MPa)
28284	32	26925	29	26457	28

Table 2. Concrete properties for walls and foundation

در این دیوارگوشه‌های پایینی (پاشنه و پنجه) مبتنی بر بررسی‌های انجام شده در مرجع (24) به ابعاد ۲۰ درصد طول دیوار حذف شده و با یک عضو تعویض‌پذیر فولادی که ویژگی‌های آن پیشتر به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است [25]، جایگزین شد. دو عضو تعویض‌پذیر فولادی علاوه بر جبران مقاومت نواحی حذف شده، ظرفیت استهلاک انرژی مورد نیاز را تأمین می‌کنند. این عضو تعویض‌پذیر متشکل شش قسمت است که عبارتند؛ یک لوله فولادی به قطر متناسب با ابعاد گوشه‌های خالی شده در دیوار، دو دیسک فولادی جوش شده در داخل لوله، چهار عدد سخت‌کننده با شکل هندسی متناسب با محیط لوله و یک ورق سوراخدار که نقش اساسی آن استهلاک انرژی است. در شکل (۲) تصویر عضو تعویض‌پذیر فولادی نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی این شش قسمت در جدول (۳) ارائه شده است. عضو تعویض‌پذیر طوری طراحی و ساخته شده که مانعی برای ایجاد این درز پای دیوار و حرکت گهواره‌ای دیوار در بارگذاری چرخه‌ای نشود. با اعمال کشش به عضو تعویض‌پذیر، لوله، دیسک‌های داخل آن و سخت‌کننده جوش شده در سطح جانبی بیرونی لوله بلند شده و ورق فیوز که در ناحیه وسط خود به زیر لوله جوش شده است را نیز با خود بلند می‌کند. سخت‌کننده‌ها به ورق بالا جوش شده ولی از پایین به ورق فیوز جوش نمی‌شوند تا مانعی برای بلند شدن دیوار و عضو تعویض‌پذیر ایجاد نکند. ورق فیوز در کناره‌ها با پیچ به ورق مدفون در شالوده

دیوار دارای عضو تعویض پذیر که رافع ابهامات گفته شده باشد در مرجع (24) بطور کامل ارائه شده است.

۴-مدلسازی عددی

شبیه سازی هر سه دیوارها با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی سه بعدی در نرم افزار ABAQUS [26] انجام شد. کلیه میلگردها و کابل های پیش تنیدگی، با المان خرابایی دو گرهی با مرتبه ی درونیابی خطی و با هندسه میله ای بدون ضخامت و انطباق محور المان و محور گذرنده از مرکز سطح مقطع میلگرد، مدل سازی شد. برای مدل سازی بتن از المان های آجری هشت گرهی با مرتبه درونیابی خطی و انتگرال گیری کاهش یافته استفاده شد.

مدل سازی ناحیه غیرخطی رفتار بتن با استفاده از مدل خسارت - خمیری و برای فولاد معیار پلاستیسته (معیار فون مایسز) مورد استفاده قرارگرفت. برای شبیه سازی نیروی پیش تنیدگی موجود در کابل ها یک تنش اولیه متناسب با نیروی پیش تنیدگی با احتساب افت ها مطابق با آنچه که در آزمایش انجام شده بود، برابر با $0.54 f_{pu}$ در نظر گرفته شد. این نیرو در راستای محوری کابل ها و دو انتهای آن ها با استفاده از قید بست (Tie) و ورق های فولادی انتهایی در بالای دیوار و زیر ناحیه میانی شالوده ایجاد شد. برای مدل سازی اندرکنش بتن و میلگردهای موجود در نمونه از قید بخش جاسازی شده (Embedded region) استفاده شد.

شکل ۲. عضو تعویض پذیر فولادی ساخته شده در آزمایشگاه

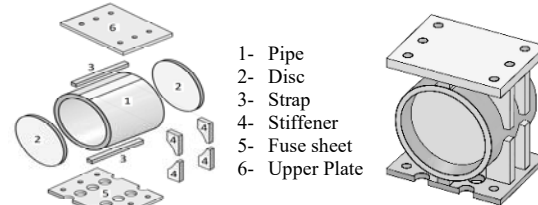


Fig. 2. The Replaceable steel member casted at structural laboratory of TMU

جدول ۳. مشخصات عضو تعویض پذیر فولادی در دیوار SWRS

Specifications	Pipe	Disc	Fuse sheet	Stiffeners
Yield Strength (MPa)	400.25	269.47	269.47	265.73
Yield Strain (%)	0.002	0.00147	0.00147	0.0015
Elastic Modulus (MPa)	201.61	202.63	202.63	202.38
Ultimate Strength (MPa)	513.9	454.93	454.93	371.13
Ultimate Strain (%)	0.3	0.467	0.467	0.633
Thickness (mm)	11	10	10	15

Table 3. Specifications of Replacement Steel Element

شالوده دیوارهای آزمایش شده دارای صلبیت کامل و شامل یک قسمت میانی با ارتفاعی کوتاهتر از ارتفاع دو قسمت کناری است تا فضایی برای مهار کابل های پیش تنیده داشته باشد. مشخصات میلگردهای مستهلک کننده انرژی، میلگردهای ناحیه بتن محصور، و همچنین کابل های پیش تنیدگی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات میلگردهای دیوار، نواحی محصور شده، شالوده و کابل ها

Characteristics	Steel Bars Diameter (mm)	Yield State		Elastic Modulus (MPa)	Ultimate State		Collapse State		Eccentricity (mm)	Unbonded Length (mm)
		Stress (MPa)	Strain (%)		Stress (MPa)	Strain (%)	Stress (MPa)	Strain (%)		
Horizontal, Vertical. & Confined Portions	8	383	0.0019	201579	597	0.183	562	0.23	-	-
Energy Dissipated Bars	14	495	0.0025	198000	609.5	0.196	502	0.234	95	200
Foundation Steel Bars	Longitudinal	18	493	0.0025	197200	655	0.224	587	0.259	-
	Transvers	10	245	0.0012	204166	382	0.183	351	0.231	-
Prestressing Cables	12.7	1819	0.0089	199436	-	-	-	-	190	-

Table 4. Mechanical properties of all reinforcement steel and prestressing cables

شکل ۳. مدل اجزای محدود دیوارهای اول، دوم و سوم

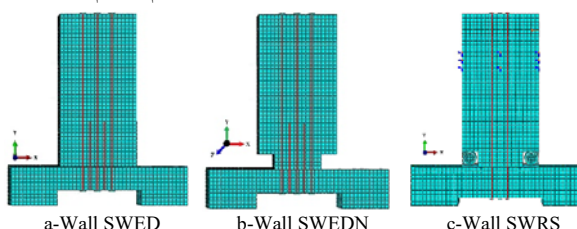


Fig. 3. Finite element models of SWED, SWEDN and SWRS walls

در مدل‌سازی میلگردهای مستهلک کننده انرژی که طول آن از سه قسمت تشکیل شده است، برای دو قسمتی که با بتن تماس دارد قید بخش جاسازی شده و برای قسمت میانی که از تماس آن با بتن به وسیله یک پوشش پلاستیکی جلوگیری شده، قید خاصی در نظر گرفته نشد. در شبیه سازی، تماس بین شالوده و دیوار باید رفتار مماسی و عمود بر سطح به صورت جداگانه در نظر گرفته شوند. در این حالت از قید تماس سخت (Hard Contact) استفاده شد. با استفاده از این قید دو سطح نمی‌توانند در یکدیگر نفوذ کنند و در صورت اعمال نیروی کششی می‌توانند از یکدیگر جدا شوند. برای رفتار تماسی از گزینه جبران (Penalty) و ضریب اصطکاک ۰/۵ استفاده شد.

برای دیوار دارای عضو تعویض‌پذیر نیز در مورد اتصال ورق‌های فولادی پایین و بالای عضو تعویض‌پذیر به ورق‌های فولادی مدفون در دیوار و شالوده و همچنین برای اتصال اجزاء خود عضو تعویض‌پذیر مثل اتصال دیسک‌ها به داخل لوله، اتصال سخت کننده به محیط لوله و اتصال لوله در ناحیه پنخ خورده به ورق بالا و ورق فیوز از قید بست (Tie) استفاده شد.

جزئیات دقیق مدل سازی در کارهای قبلی نویسندگان به طور مبسوط بیان شده است که خواننده محترم می‌تواند به آنها مراجعه نماید [25-27].

برای تعیین مقدار متغیرهای خسارت خمیری بتن از جمله زاویه اتساع، سطح تسلیم (k_c)، نسبت مقاومت فشاری دو محوری به مقاومت فشاری تک محوری بتن $f_{c,bi}/f_c$ و خروج از مرکزیت، از نتایج راستی آزمایی تحلیل‌های عددی مطالعه مشابهی که توسط نویسندگان انجام شده بود، استفاده شد [27]. لازم به ذکر است که مقدار متغیر خروج از مرکزیت به عنوان مشخص کننده شکل تابع پتانسیل در فشار هیدرواستاتیکی منفی، نزدیک به صفر است که بر حسب نوع مصالح می‌تواند مقداری بین صفر تا ۰/۳

داشته باشد. راستی آزمایی این متغیر حاکی از عدم حساسیت مدل عددی به این متغیر بود و در نتیجه مطابق توصیه دستورالعمل نرم‌افزار ABAQUS مقدار ۰/۱ برای این متغیر منظور شد. متغیر سطح تسلیم، مشخص کننده نسبت مقاومت برشی بتن تحت تنش دو محوری، به مقاومت برشی بتن تحت تنش سه محوری است. این متغیر مشخص کننده شکل سطح تسلیم در صفحه انحراف آور است که مقدار آن بین ۰/۵ تا ۱ است که مقدار عددی یک تبیین کننده شکل دایره‌ای سطح تسلیم در صفحه انحراف آور است. در این مدل‌سازی از مقدار ۰/۶۶۷ استفاده شد.

متغیر دیگر نسبت مقاومت فشاری دو محوری بتن به مقاومت فشاری تک محوری ($f_{c,bi}/f_c$) است که نقش تعیین کننده‌ای در پاسخ غیرخطی ندارد و مقدارش بین ۱ تا ۱/۲۷ است. در این بررسی از مقدار ۱/۱۶ استفاده شد. در جدول (۵) مقادیر نهایی مربوط به هریک از این متغیرها که بهترین پاسخ غیرخطی را برای دیوار بدست داده است، آورده شده است [27]. مدل اجزای محدود دیوار SWED و دیوار SWEDN در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۵. متغیرهای برگرفته از مرجع ۲۷

Variable type	Variable's amount		
Dilation angle (Degree)	25	30	45
Yield Surface (k_c)	0.5	0.667	1.0
$f_{c,bi}/f_c$	1.0	1.16	1.27
Eccentricity	0	0.10	0.3

Table 5. Selected variables from reference 27

۶- الگوی بارگذاری

در فرایند بارگذاری نمونه‌ها در تحلیل عددی (مانند آزمایش)، برای در نظر گرفتن اثر پیش‌تنیدگی و پس از رسیدن کابل‌ها به نیروی پیش‌تنیدگی مورد نظر با لحاظ کردن افت‌های کوتاه مدت، بارگذاری جانبی نمونه انجام می‌شود. برای دیوار SWED که دارای ارتفاع ۲ متر و طول ۱ متر است، تغییر مکان نسبی طراحی و نهایی طبق ACI ITG-5.2-09 [23] به ترتیب ۰/۴۴ و ۲ درصد است. جابه‌جایی اعمال شده به دیوار نیز بر مبنای الگوی استفاده شده در آزمایش بوده و مطابق شکل (۴) است. تا دامنه دهم هر سیکل سه بار و پس از آن هر سیکل دو بار تکرار شده است.

کابل یا تسلیم میلگردهای مستهلک کننده انرژی ناشی از خرابی‌های محتمل است. کابل‌های پیش‌تینده طوری طراحی می‌شوند که در تغییر مکان‌های نسبی نهایی به حد تسلیم خود رسیده باشند و حاشیه امنی تا گسیختگی داشته باشند.

در سیستم دیوار برشی مرکزگرا چون میلگردهای دیوار با شالوده اتصالی ندارند و به بیان دیگر دیوار روی شالوده نشسته است، اتصال دیوار به آن فقط از طریق کابل‌های پیش‌تینده نچسبیده و میلگردهای مستهلک کننده انرژی برقرار است. مطابق انتظار با اعمال بار جانبی و غلبه بر وزن و نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها، پاشنه دیوار نسبت به شالوده جدا و بلند می‌شود که با افزایش بار جانبی مقدار این بلندشدگی افزایش می‌یابد. شکل (۶) مقدار بلندشدگی برای لبه‌ها (نقاط A و C) حدود ۳۰ میلی‌متر و در وسط دیوار ۱۳ میلی‌متر (نقطه B) نشان داده شده است.

کابل‌های پیش‌تینده عامل اصلی در ایجاد مرکزگرایی دیوار هستند. نیروی پیش‌تندگی اولیه کابل‌ها ۱۰۰ کیلو نیوتن است که متناظر با تنش ۱۰۰۰ مگاپاسکال در هر کابل است. در اثر اعمال بار جانبی و باز شدن درز بین دیوار و شالوده در طول دیوار، کابل‌ها نیز کشیده شده و باعث افزایش مقدار نیروی اولیه موجود در آنها می‌شود. در شکل (۷) همخوانی خوب تغییرات نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها در آزمایش و مقادیر متناظر بدست آمده از تحلیل عددی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کابل‌های پیش‌تندگی تا تغییر مکان نسبی نهایی تسلیم نمی‌شوند. در فرآیند بارگذاری، تغییرات کرنش در میلگرد مستهلک کننده انرژی در سمت راست در شکل (۸) آورده شده است. همچنین پنجه دیوار متحمل نیروی فشاری متمرکز زیادی می‌شود که در شکل (۹) به صورت آسیب دیدگی بتن گوشه‌های دیوار در تغییر مکان‌های نسبی نهایی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در هر نیم سیکل از بارگذاری، این نیروی فشاری با نیروی کششی کابل‌ها و میلگردهای مستهلک کننده انرژی به تعادل می‌رسد. این نیروی فشاری حتی با وجود محصور کردن بتن این نواحی، باعث قلوه کن شدن بتن پوشش و خرد شدن بتن گوشه‌های پایین دیوار می‌شود.

شکل ۴. تاریخچه بارگذاری جانبی دیوار

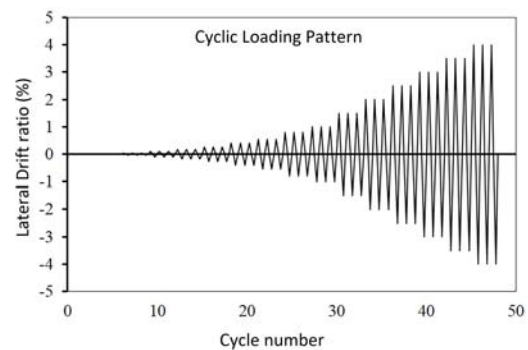


Fig. 4. Lateral Loading Protocol

شکل ۵. منحنی چرخه‌ای دیوار SWED

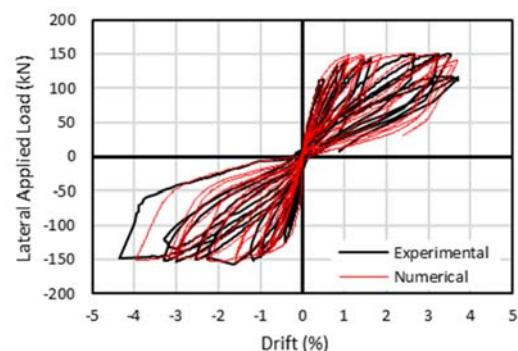


Fig. 5. Hysteresis curves of wall SWED

۷- نتایج آزمایش و تحلیل عددی غیرخطی دیوار SWED

نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی دیوار SWED شامل مقایسه رفتار کلی دیوار، ظرفیت و تاثیر میلگردهای مستهلک کننده انرژی، کابل‌های پیش‌تینده و تغییر مکان قائم لبه‌های دیوار (بازشدگی پای دیوار) می‌باشد. در ابتدای بارگذاری باید نیروی جانبی بر نیروی ثقلی و نیروی پیش‌تندگی کابل‌ها غلبه داشته باشد تا دیوار بتواند در فرآیند افزایش بار جانبی، رفتار گهواره‌ای خود را بروز دهد. شکل (۵) مقایسه منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل عددی را با نتیجه آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بارگذاری نمونه در مدل عددی منطبق بر بارگذاری آزمایش بوده و نتایج بدست آمده حاکی از آن است که نمونه در راستای مثبت و منفی رفتار مقارنی بروز داده است. مطابق انتظار، به دلیل استفاده از کابل‌های پیش‌تینده، رفتار مرکزگرای مورد نظر حاصل شده و نمودار ظرفیت، پرچمی شکل است. میزان استهلاک انرژی نمونه که توسط میلگردهایی است که بین دیوار و شالوده قرار می‌گیرد نیز برابر با سطح داخلی حلقه‌های چرخه‌ای محاسبه شده است. در تغییر مکان نسبی بالا، گسیختگی

شکل ۸. تغییرات کرنش در میلگرد مستهلک کننده انرژی، سمت راست

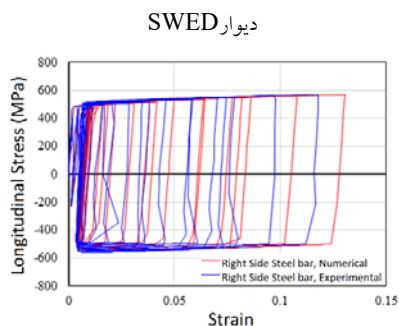


Fig. 8. Variation of ED reinforcement strain, wall SWED

شکل ۹. آسیب پنجه دیوار SWED در تغییر مکان نسبی ۲ درصد

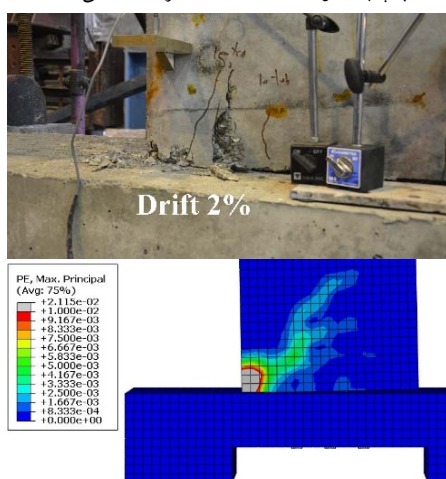


Fig. 9. Concrete damage at wall toe corresponding to 2% drift, SWED

در شکل (۱۰) منحنی چرخه‌ای و توزیع تنش‌ها در این دو دیوار نشان داده شده است. دلیل کاهش ظرفیت دیوار، کاهش سطح تماس دیوار و شالوده، کاهش عمق محور خشی دیوار و به دنبال آن کاهش بازوی لنگر است. بیشترین ظرفیت دیوار از ۱۵۸ به ۸۹ کیلو نیوتن (۴۴٪) کاهش یافته است. در بخش‌های بعدی نشان داده می‌شود که بکارگیری عضو تعویض‌پذیر فولادی ضمن جبران این کاهش مقاومت، موجب حذف آسیب متمرکز در گوشه‌های دیوار شده و در ناحیه بلندشدگی دیوار به عنوان مستهلک کننده انرژی عمل می‌کند و در عین حال در صورت آسیب دیدن قابل تعویض است.

شکل ۶. بلند شدگی دیوار SWED در طول بارگذاری

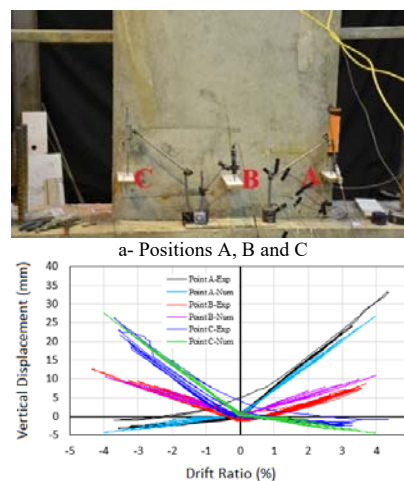


Fig. 6. Vertical displacement at Points A, B and C, wall SWED

شکل ۷. تغییرات نیروی پیش تنیدگی در دیوار SWED

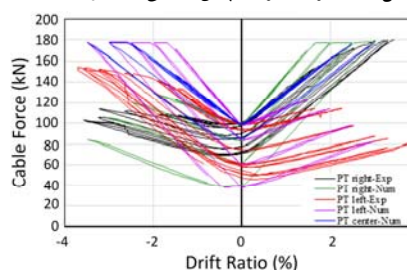


Fig. 7. Variation of prestressing forces, wall SWED

۸- مقایسه نتایج تحلیل عددی دو دیوار SWED و SWEDN

همانطور که پیشتر اشاره شد دیوار دوم مانند دیوار اول است با این تفاوت که گوشه‌های پایینی (پاشنه و پنجه) آن به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و متناسب با ابعاد عضو تعویض‌پذیر خالی شده است. به منظور بررسی تأثیر خالی کردن پنجه و پاشنه بر منحنی ظرفیت دیوار، نتیجه تحلیل عددی این دیوار با دیوار اول مقایسه شد. در این مقایسه مشخص شد که رفتار چرخه‌ای آن از نظر شکل مانند دیوار اول است ولی همانطور که پیش‌بینی می‌شد، حذف بتن نواحی پنجه و پاشنه دیوار اثر قابل توجهی بر توزیع تنش‌های ناشی از پیش‌تنیدگی، توزیع تنش‌های ناشی از بار جانبی و منحنی ظرفیت دیوار دارد.

شکل ۱۱. توزیع تنش ناشی از پیش تنیدگی و بار جانبی در دو دیوار

SWEDN و SWED

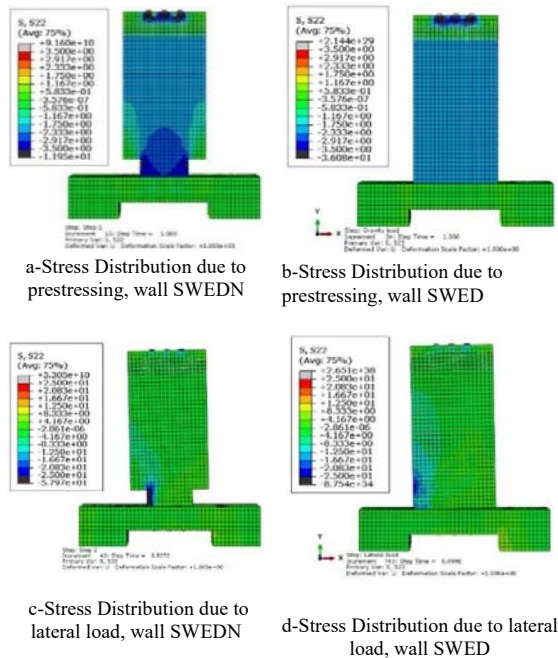


Fig. 11. Stress distribution due to prestressing and lateral load, walls SWED and SWEDN

با اعمال بار جانبی چرخه‌ای هر یک از دو عضو تعویض پذیر در گوشه‌های پایین دیوار بطور متناوب در فشار و کشش قرار می‌گیرد. همچنین در مرحله‌ای که بار جانبی بر نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها غلبه می‌یابد، درزی در پای دیوار (بین دیوار و شالوده) ایجاد می‌شود. این درز در شکل (۱۳) به صورت جابه‌جایی قائم ناحیه پایین دیوار، کشیدگی ورق فیوز و بلند شدن دیوار نشان داده شده است. در این شکل نقاط E ، F و G و H متناظر با محل استقرار جابه‌جایی سنج‌هایی است که در مراحل انجام آزمایش تغییر مکان‌های قائم را ثبت کرده‌اند. نمودار مربوط به تغییرات مقدار تغییر مکان قائم این نقاط (بلندشدگی) در تمام مراحل بارگذاری برای داده‌های بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی در مقابل تغییر مکان نسبی دیوار ترسیم شده، تا نشان داده شود که رفتار دیوار SWED با اینکه مرکزگرا است از شکل پذیری لازم نیز برخوردار است، که این شکل‌پذیری مربوط به رفتار غیرخطی ورق فیوز است (شکل ۱۴).

شکل ۱۰. منحنی چرخه‌ای در دو دیوار SWEDN و SWED

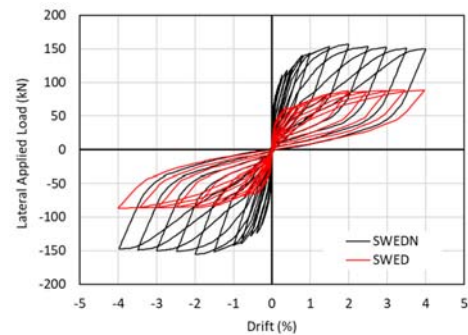


Fig. 10. Hysteresis curves of walls SWED and SWEDN

۹- رفتار سنجی و مقایسه پاسخ دیوار SWRS با دیوار SWED

در این قسمت ضمن سنجش رفتار دیوارهای مورد مطالعه، نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی آنها مقایسه می‌شود. عوامل مهم در این سنجش و مقایسه عبارتند از: منحنی چرخه‌ای سختی اولیه، مقاومت و تغییر مکان نسبی در مراحل رفتاری، و استهلاك انرژی. شکل (۱۱) توزیع تنش ناشی از پیش‌تنیدگی و بار جانبی در دو دیوار SWEDN و SWED بدست آمده از تحلیل عددی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است در هیچ یک از حالات بتن آسیب ندیده است.

در شکل (۱۲) منحنی‌های چرخه‌ای بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای هر دو دیوار ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در ناحیه ارتجاعی که پاسخ دیوارها بیشتر متأثر از اثر نیروی پیش‌تنیدگی و وزن دیوار است، تقریباً مشابه هستند. در حالی که در ناحیه رفتار خمیری، پاسخ دیوار SWRS سخت‌شوندگی قابل ملاحظه‌ای که ناشی از حضور عضو تعویض‌پذیر فولادی است، بروز داده و منحنی رفتار چرخه‌ای آن پرچمی شکل است. تحمل بار جانبی در دیوار SWED تا تغییر مکان نسبی ۴ درصد و گسیخته شدن میلگرد مستهلک کننده انرژی ادامه یافت در حالی که برای دیوار SWRS تا تغییر مکان نسبی ۳ درصد با گسیخته شدن یکی از کابل‌های پیش‌تنیده ادامه یافت.

شکل ۱۴. بلند شدگی دیوار در نقاط E, F, G و H

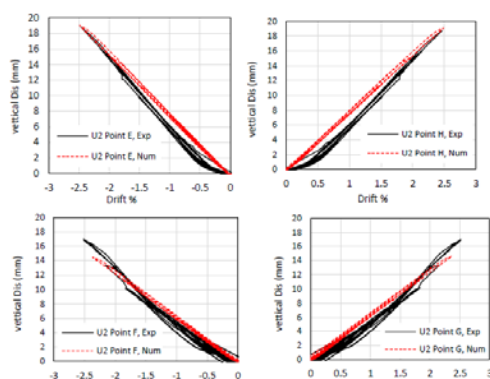
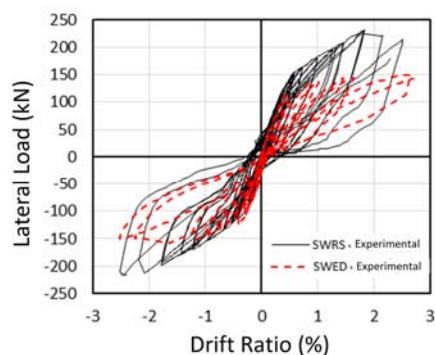


Fig. 14. Wall uplift at points E, F, G and H, SWRS

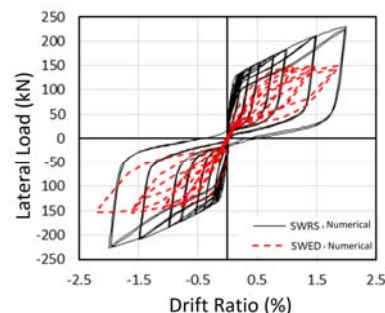
از آنجا که در دیوار SWRS بیشترین سهم استهلاک انرژی بر عهده ورق فیوز است، این ورق باید در تغییر مکان‌های نسبی اولیه تسلیم شود و تا تغییر مکان نسبی نهایی که حدود ۲ درصد است گسیخته نشود. از طرفی تغییر مکان قائم ورق فیوز متناسب با بلندشدگی دیوار و هر دو با بار جانبی اعمالی متناسب است. سطح داخلی حلقه‌های چرخه‌ای به عنوان مشخص کننده میزان استهلاک انرژی نمونه توسط ورق فیوز قابل ملاحظه است. به منظور مقایسه و نشان دادن اثر عضو تعویض پذیر فولادی در افزایش مقاومت، سختی اولیه، ضریب شکل پذیری و میزان استهلاک انرژی دیوار SWRS نسبت به دیوار SWED، در جدول (۶) آورده شده است.

این جدول نشان می دهد که متوسط سختی اولیه دیوار SWRS نسبت به دیوار SWED حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد بیشتر است. این نسبت برای مقاومت در مرحله تسلیم و بیشترین به ترتیب برابر با $1/35$ و $1/48$ است. متوسط تغییر مکان نسبی دیوار دارای عضو تعویض پذیر در مرحله تسلیم و مرحله نهایی به ترتیب برابر با $1/84$ و $0/87$ است و این حاکی از آن است که دیوار SWRS در مرحله نهایی کنترل بهتری در پذیرش تغییر مکان جانبی نسبت به دیوار SWED دارد. گرچه مقدار ضریب شکل پذیری برای سیستم‌های با حرکت گهواره‌ای چندان مورد نظر ACI ITG-5 نیست، لکن برای محاسبه ضریب شکل پذیری دو دیوار از نسبت بیشترین جابه‌جایی نهایی به جابه‌جایی مانند تسلیم استفاده شد که مقادیر آنها در این جدول آورده شده است. چنانچه

شکل ۱۲. منحنی‌های چرخه‌ای دیوار SWED و SWRS



الف- مقایسه منحنی چرخه ای آزمایشگاهی دو دیوار



ب- مقایسه منحنی چرخه ای عددی دو دیوار

Fig. 11. Hysteresis curves, walls SWED and SWRS

شکل ۱۳. رفتار دیوار SWRS در نیم سیکل از بار تناوبی

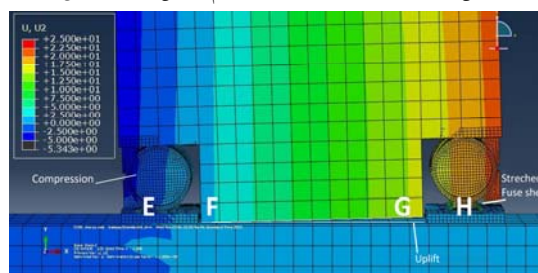


Fig. 13. Half cycle behavior of numerical model of SWRS wall

بیشترین مقدار این بلندشدگی در لبه‌های کناری دیوار حدود ۳۰ میلی‌متر و در وسط لوله ۱۳ میلی‌متر است یکی دیگر از موارد کنترل کننده رفتار مطلوب دیوارهای مرکزگرا، این است که ضریب استهلاک انرژی آن بر طبق ضوابط ACI ITG-5.1 [28]، بین دو مقدار $0/5$ تا $0/8$ باشد. این ضریب برابر است با نسبت لنگر ناشی از مؤلفه نیروی کنترل کننده استهلاک انرژی به لنگر ناشی از نیروهای پیش‌تندگی.

مرکزگرا بخوبی نشان داده شده است. مهمترین نتایج مستخرج از این تحقیق، در موارد زیر خلاصه شده است.

(۱) عضو تعویض پذیر فولادی در دیوار برشی پیش تنیده، ضمن تأمین رفتار مرکزگرایی دیوار، به عنوان عامل اصلی مستهلک کننده انرژی عمل کرده است.

(۲) میانگین مقاومت تسلیم آزمایشگاهی و عددی دیوار SWRS نسبت به دیوار SWED ۳۵ درصد افزایش نشان می‌دهد.

(۳) بیشترین مقاومت دیوار SWRS نسبت به دیوار SWED ۴۴ درصد بیشتر است.

(۴) در تغییر مکان نسبی ۲ درصد، بیشترین مقدار بلندشدگی در لبه‌های کناری و در وسط هر دو دیوار به ترتیب ۳۰ و ۱۳ میلی‌متر بدست آمده که تایید کننده عملکرد مناسب عضو تعویض پذیر فولادی است.

(۵) مقدار استهلاك انرژی (تا تغییر مکان نسبی ۲ درصد) در دیوار SWRS ۲۱ درصد بیشتر از دیوار SWED بدست آمد.

(۶) در دیوار SWRS هیچگونه خرد شدگی بتن در نواحی محصور شده مشاهده نشد در حالیکه در دیوار SWRD در تغییر مکان نسبی طراحی، شروع به ترک خوردگی کرده و در تغییر مکان نسبی ۲ درصد، بتن ناحیه محصور شدگی آسیب دیده خرد شده بود.

ملاحظه می‌شود، ضریب شکل‌پذیری دیوار SWED از مقدار نظیر در دیوار SWRS بیشتر است که دلیل آن کاهش سختی پی در پی در سیکل‌های بارگذاری است. در حالیکه همین ضریب بدست آمده از تحلیل عددی برای دیوار SWRS بیشتر است که ناشی از رفتار انعطاف پذیر عضو تعویض پذیر آن می‌باشد. مقایسه میزان استهلاك انرژی بین این دو دیوار نشان می‌دهد که متوسط دیوار SWRS نسبت به دیوار SWED ۱/۲۱ است که اثر عضو تعویض پذیر فولادی را بخوبی تبیین می‌کند. سرانجام مقدار بلندشدگی هر دو دیوار در تغییر مکان نسبی نهایی حدود ۱۵ میلی‌متر است.

جدول ۶. مقایسه کمی عوامل رفتاری دیوارهای مورد بررسی

Values of Parameters Induced by behavior	Wall SWRS (1)	Wall SWED (2)	(1)/(2)
Initial Stiffness (kN/mm)	Test 85.19	63.67	1.34
	Numerical 91.45	65.45	1.40
Yield Strength (kN)	Test 150	113.5	1.32
	Numerical 154.88	112.31	1.38
Ultimate Strength (kN)	Test 222.16	154.17	1.44
	Numerical 228.02	150.60	1.51
Yield Drift Ratio (%)	Test 0.57	0.391	1.46
	Numerical 0.26	0.31	0.84
Ultimate Drift Ratio (%)	Test 2.50	2.55	0.98
	Numerical 2.01	2.03	1.00
Ductility factor	Test 4.40	6.51	0.68
	Numerical 7.73	6.55	1.18
Energy Dissipated (J)	Test 266961	184062	1.45
	Numerical 192670	199213	0.97
Max. wall uplift (mm)	Test 15.8	15.22	1.04
	Numerical 16	15.50	1.03

Table 6. Comparison between the behavioral quantities of investigated walls

مراجع

- [1] Federal Emergency Management Agency, (2000), Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356), Washington, D.C.
- [2] Federal Emergency Management Agency, (2003), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), Washington, D.C.
- [3] Federal Emergency Management Agency, (2005), Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA-440), Washington, D.C.
- [4] Federal Emergency Management Agency, (2009), NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), Washington, D.C.
- [5] American Society of Civil Engineers, (2010), Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE Standard ASCE/SEI 7-10), Reston, Virginia.
- [6] Priestley, M. N. (1991), "Overview of PRESSS research program", PCI journal, 36(4), 50-57.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله موضوع آسیب‌دیدگی بتن در گوشه‌های پایین دیوارهای بتن مسلح مرکزگرا که ناشی از نیروهای فشاری متمرکز در آن نواحی است مورد توجه قرار گرفته و با بکار بردن یک تعویض پذیر فولادی به عنوان عامل کنترل غیرفعال برای رفع این نقیصه و تأمین استهلاك انرژی در در پنجه و پاشنه (خالی شده) دیوار، مورد بررسی و مطالعه به روش تحلیل غیرخطی عددی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سختی ارتجاعی، مقاومت، شکل‌پذیری و استهلاك انرژی دیوار دارای عضو تعویض پذیر نسبت به دیوار بدون عضو تعویض پذیر ظرفیت بیشتر است. در ضمن عملکرد مطلوب و مؤثر عضو تعویض پذیر در هماهنگی با دیوار برشی بتن مسلح

- walls with horizontal bottom slits. *Journal of Structural Engineering*, 143(3), 04016183.
- [19] Marreiros, R., Lúcio, V., & Pampanin, S. (2018). Development of steel angles as energy dissipation devices for rocking connections. *Structural Concrete*, 19(6), 1657-1671.
- [20] Hashemi, A., Zarnani, P., Masoudnia, R., & Quenneville, P. (2017). Seismic resistant rocking coupled walls with innovative Resilient Slip Friction (RSF) joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 215-226.
- [21] Cui, H., Wu, G., Zhang, J., & Xu, J. (2019). Experimental study on damage-controllable rocking walls with resilient corners. *Magazine of Concrete Research*, 71(21), 1113-1129.
- [22] Xu, L. H., & Zhang, Y. (2021). Hysteresis behavior of bottom-story self-centering shear wall with steel brace-assembled bottom. *Journal of Constructional Steel Research*, 186, 106893.
- [23] ACI. 2009. "Requirements for Design of a Special Unbonded Post-Tensioned Precast Shear Wall." Report No. ACI ITG-5.2-09, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [24] Fahime Shahpouri, "Proposing a Steel Replaceable Device to Improve the behavior of self-centering RC shear walls", (2023), PhD Thesis, Earthquake Engineering Group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University.
- [25] Fahimeh Shahpouri; Abbas Ali Tasnimi and Joaquim A. O. de Barros, (2023). Experimental and Numerical Investigation on the Behavior of a New Replaceable Steel Device used in Self-centering Prefabricated Shear Wall. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9445. DOI: 10.1061/JSEDH/STENG-11971.
- [26] ABAQUS. 2014. "Analysis user's manual." Version 6.14. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen Inc Dassault Systems.
- [27] Fahime shahpouri and Abbas Ali Tasnimi, (2018), "Nonlinear Numerical Analysis of RC Precast Shear Walls with Self Centering System", *Journal of Civil Engineering Sharif*, 2-34, No. 1.2, pp. 13-24.
- [28] ACI. 2007. "Acceptance criteria for special unbonded post-tensioned precast structural walls based on validation testing." ACI ITG5.1-07, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI
- [7] Ricles J.M., Sause R., Garlock M.M., and Zhao C., (2001). Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 127 (2), pp 113-121.
- [8] Christopoulos C., Filiatrault A., Uang C., and Folz B., (2002). Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 128 (9), pp 1111-1120.
- [9] Eatherton M.R., Deierlein G.G., Ma X., Krawinkler H., and Hajjar J.F., (2012). Toward a performance-based design framework for self-centering rocking braced-frame spine systems. *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
- [10] Christopoulos C., Tremblay R., Kim H., and Lacerte M., (2008). Self-centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation. *Journal of Structural Engineering*, 134 (1), pp 96-107.
- [11] Kim H. and Christopoulos C., (2008). Friction Damped Posttensioned Self-centering Steel Moment-Resisting Frames. *Journal of Structural Engineering*, 134 (11), pp 1768-1779.
- [12] Christopoulos C., Tremblay R., Kim H., and Lacerte M., (2008). Self-centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation. *Journal of Structural Engineering*, 134 (1), pp 96-107.
- [13] Kurama, Y., Sause, R., Pessiki, S., & Lu, L. W. (1999). Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *Structural Journal*, 96(4), 622-632.
- [14] Restrepo, J. I., Mander, J., & Holden, T. J. (2001). New generation of structural systems for earthquake resistance. In *NZSEE 2001 Conference*.
- [15] Restrepo, J. I., & Rahman, A. (2007). Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators. *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1560-1570.
- [16] Smith, B. J., Kurama, Y. C., & McGinnis, M. J. (2013). Behavior of precast concrete shear walls for seismic regions: comparison of hybrid and emulative specimens. *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1917-1927.
- [17] Guo, T., Zhang, G., & Chen, C. (2014). Experimental study on self-centering concrete wall with distributed friction devices. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(2), 214-230.
- [18] Lu, X., Dang, X., Qian, J., Zhou, Y., & Jiang, H. (2016). Experimental study of self-centering shear

Damage control and seismic behavior of self-centering RC shear wall with replaceable steel member utilizing nonlinear numerical analysis

F. Shahpouri¹, A.A. Tasnimi^{2*}

*tasnimi@modares.ac.ir

- 1- PhD student of Earthquake Engineering, Department of Structural and Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University.
- 2- Professor of Structural Engineering, Department of Structural and Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Abstract

Investigations carried out on the effects of earthquakes on various structures located in seismic prone areas and achieving significant progress in various relevant fields of earthquake engineering have led to a reduction in the risk and vulnerability of structures. The use of passive control systems to enhance the safety of structures and their attachments against earthquake-induced damages has gained attention in recent years. In conventional earthquake resistant structures, yielding of steel is often used in combination with other materials to dissipate energy. The cyclic response of these systems in the ideal state is in the form of complete loops, which will have significant permanent deformation and relative displacement. The existence of these permanent deformation and relative displacement leads to one of the two decisions of destruction and complete reconstruction or improvement by spending a lot of money and sometimes more than the cost of reconstruction. It is worthy to note that the recent approaches indicate that the performance level of life safety is not sufficient and the seismic design of the structures should be in such a way that the structure is not significantly damaged in severe earthquakes. One of the recent approach is to use special mechanism that provides the opportunity to reduce the damage caused to structural members. Such mechanism controls the cost for replacement and/or repair. On the other hand, new seismic systems called "self-centering systems" have been developed that create a flag-shaped capacity curve by using prestressing forces and creating a joint in the structural elements. The most important feature of the self-centering system is to minimize damage to the main structural elements and eliminating residual deformations.

Combining these two approaches, we can employ it as a passive control systems in the form of an energy dissipating device within the self-centering reinforced concrete shear walls. In self-centering reinforced concrete shear walls, the concrete at the lower corners of the walls are susceptible to damage and crushing due to concentrated compressive forces in those areas. Consequently, passive control elements are used to eliminate this damage and to make these areas more ductile, replacing the concrete. Therefore, to add self-centering capability to reinforced concrete shear walls, pre-tensioned cables are used as a restoring force that enables rocking movement. The significant and important thing about these walls is that after the application of lateral load and the occurrence of rocking movement, the concrete at the toe and heel of the wall will be damaged even providing confinement reinforcement. In this article, three self-centering reinforced concrete shear walls have been studied. One of the walls is considered as a reference sample (SWED), while the other two similar walls, one with tow replaceable devices without energy dissipating bars (SWRS) and the other without toe and heel (SWEDN), are analysed to compare the results using numerical analysis. The replaceable steel device is installed as a passive control system to dissipate energy in the wall's foot and heel regions. In addition to the ability to provide the strength of the removed concrete in the heel and toe of the wall, the replaceable device must also have the capacity to dissipate energy and be easily accessible and replaceable in case of damage. The results show that the wall with a replaceable member displays enhanced capacity, ductility, and energy dissipation in comparison to the wall without a replaceable member.

Keywords: Damage, seismic behavior, self-centering, replaceable steel member, nonlinear, numerical analysis.