



## بررسی عملکرد لرزه‌ای یک نوع دیوار برشی مرکزگرای جدید با قابلیت تعمیر پس از زلزله

سید جعفر حسینی، فرنوش باسلیقه\*، جلیل شفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶

### کلمات کلیدی:

دیوار برشی بتنی  
آلیاژ حافظه‌دار شکلی  
جابه‌جایی پسماند  
رفتار مرکزگرا  
تحلیل چرخه‌ای

**خلاصه:** تغییر شکل‌های ماندگار بعد از وقوع زلزله باعث افزایش هزینه‌های مقاوم‌سازی و حتی اجرایی شدن طرح بهسازی می‌گردد. یکی از سیستم‌های مقاوم برای کنترل نیروهای جانبی وارده ناشی از زلزله، استفاده از دیوار برشی با قابلیت استهلاک انرژی خوب است. تغییر شکل‌های ماندگار و به وجود آمدن ترک در نواحی مرزی و بحرانی دیوار پس از زلزله‌های نسبتاً شدید، منجر به کاهش عملکرد لرزه‌ای دیوار می‌شود. در این تحقیق به بررسی پاسخ‌ها و رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی بتنی تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSEES، به مدل‌سازی دیوار برشی بتنی مبتنی به روش SFI-MVLEM یا مدل‌سازی دیوار با استفاده از المان‌های قائم چندتایی بر اساس روش مایکروفاایبر پرداخته شده است. مدل‌های اصلی آنالیز شده در این مطالعه شامل ۲ دیوار بتنی با میلگردهای فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی SMA با ابعاد و چینش آرماتورهای متفاوت از هم و دیوار بتنی نوآورانه با المان مرزی مجزا به صورت ستونک بتنی از جنس بتن سیمانی مهندسی ECC و میلگردهای SMA می‌شود. اعتبارسنجی مدل‌ها بر اساس مطالعات گذشته انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل‌های اولیه به مطالعه پارامتریک مدل‌ها به منظور بررسی اثرات ابعاد نواحی مرزی، نوع و چینش آرماتورها و میزان نیروهای محوری وارد بر دیوارهای برشی در مدل‌ها اقدام شد. نتایج کسب شده از خروجی‌ها نشان می‌دهد، استفاده از مصالح SMA در نواحی مرزی دیوار به شکل قابل توجهی بر رفتار مرکزگرایی دیوار مؤثر است و میزان جذب انرژی دیوار برشی با استفاده از مصالح SMA کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

این اعضا به دلیل سختی و مقاومت زیادی که به نسبت قاب خمشی بتنی در خود دارند، سهم قابل توجهی از برش پایه را جذب می‌کنند و به نظر می‌آید نام دیوار برشی برای این اعضای سازه‌ای نه به دلیل رفتار برشی این اعضا (در دیوارهایی با ارتفاع نسبتاً زیاد که امروزه در سازه‌ها به کار می‌روند، عمدتاً دیوارها به صورت خمشی هم عمل می‌کنند)، بلکه به دلیل مقدار قابل توجه سهم نیروی برش پایه است. برای سازه‌های تا ۲۰ طبقه به کار بردن یا به کار نبردن دیوار برشی دست طراح است. ولی برای سازه‌های بیش از ۳۰ طبقه، طراح به دلایل اقتصادی و کنترل رانش جانبی<sup>۱</sup> مجبور به استفاده از این اعضای سازه‌ای است [۱]. استفاده از دیوار برشی باعث کاهش تغییر شکل‌های ناشی از زلزله<sup>۲</sup> روی کل سازه و همچنین روی تغییر شکل‌ها و نیروهای اعضای سازه‌ای و از جمله تغییر شکل‌های خود دیوار برشی است [۲].

امروزه با توجه به هزینه‌ی بالای ساخت و ساز، اگر طراحی سازه‌ها به گونه‌ای باشد که در مقابل زلزله‌های شدید رفتار کاملاً کشسان داشته باشد و اصلاً وارد ناحیه غیرخطی نشود، اجرای این نوع سازه‌ها اصلاً مقرون به صرفه نیست؛ به همین دلیل در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها از روش‌های کنترل فعال و غیرفعال استفاده می‌شود. در روش کنترل غیرفعال، تعدادی از اعضای سازه با رفتار کشسان و جذب انرژی آسیب‌هایی را در هنگام زلزله‌های متوسط تا شدید متقبل می‌شوند تا بدین وسیله، انرژی زلزله را مستهلک نمایند. این استهلاک انرژی باعث می‌شود که نیروهای وارد بر اعضای سازه که باید رفتار کشسان داشته باشند، کاهش یافته و سازه از آسیب‌های جدی در امان بماند.

دیوار برشی یکی از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای سازه محسوب می‌شود که در سازه‌های بتن مسلح، برای تحمل نیروی جانبی زلزله به کار می‌روند.

- 1 Lateral Drift
- 2 Earthquakes Displacement Demands

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f\_basaligheh@shahroodut.ac.ir



بتنی مجهز به اعضای قابل تعویض در پای دیوار انجام دادند. هر سه سیستم سازه‌های عملکرد مؤثری در مقابل نیروی جانبی از خود نشان دادند. عبدالریضا<sup>۶</sup> و پارمو [۶] در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه آزمایشگاهی برای مقایسه عملکرد دیوار برشی مسلح با آرماتور فولادی و دیوار برشی بتنی مسلح شده با آرماتور فولادی و SMA انجام دادند. دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که دیوار مجهز به آلیاژ SMA ترکیبی، به طور قابل ملاحظه‌ای در بازگرداندن جابه‌جایی ماندگار مرزی پس از تغییر مکان‌های جانبی بیش از ۴٪ مؤثر است. دیوار برشی SMA ترکیبی، مقاومت جانبی و ظرفیت جابه‌جایی مشابه دیوار تقویت شده فولادی را تجربه کرد. همچنین در این مدل کاهش قابل ملاحظه‌ای استهلاک انرژی و کاهش سختی در ناحیه تسلیم مشاهده شد.

کرتز<sup>۷</sup> و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۸ نتایج آزمایش بارگذاری چرخه‌ای معکوس دیوار برشی بتنی باریک اصلاح شده با استفاده از آلیاژهای حافظه شکل فوق الاستیک (SMAs) در نواحی مرزی داخل ناحیه مفصل پلاستیکی را ارائه کردند. علاوه بر این، دیوار تعمیر شده مسلح با فولاد با تغییر شکل کم را نیز مورد آزمایش قرار دادند و ارزیابی عملکرد دیوارهای تعمیر شده در برابر همان مجموعه‌ای از دیوار که قبلاً در شرایط اولیه آن‌ها آزمایش شده بود را ارائه کردند. نتایج آزمایش نشان داد که سازه‌های ساختمانی بتنی مسلح با SMA، مرکزگرا هستند، که امکان تعمیر نواحی آسیب دیده را فراهم می‌کند. علاوه بر این، میله‌های SMA به دلیل توانایی آن‌ها برای بازگشت آن‌ها به حالت اصلی خود در محدوده کرنش‌های غیرالاستیک تا ۶ درصد، قابل استفاده مجدد می‌باشند. دیوارهای تعمیر شده قادر به بازگرداندن تسلیم و ظرفیت بار جانبی نهایی بودند، اما ظرفیت تغییر مکان نسبی پایین‌تر حفظ شدند. دیوار تعمیر شده SMA توانست تغییر مکان جانبی نسبی را تا ۲ درصد بهبود دهد، که بعد از آن جابه‌جایی‌های باقی مانده به علت شکستن میله‌های SMA در ناحیه مرزی، متوقف شد. دیوارهای ترمیم شده به میزان ۷/۸٪ انرژی بیشتری نسبت به دیوارهای اصلی خود را برای بخش قابل توجهی از محدوده بارگذاری مستهلک کردند.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند، نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که از آن جمله می‌توان به عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت

با بررسی گزارشات فنی تدوین شده پس از زلزله در ۲۰ سال اخیر، سازه‌های دارای دیوار برشی در زلزله‌های گذشته رفتاری متفاوت از خود نشان داده‌اند. تعدادی از آن‌ها چندین زلزله‌ی بسیار قوی را تقریباً بدون هیچ آسیبی پشت سر گذاشته‌اند (به طور مثال سازه‌های ایندین هیلز<sup>۱</sup> و پاناراما<sup>۲</sup> در زلزله‌های فرناندو<sup>۳</sup> و نورتریج<sup>۴</sup>) ولی تعدادی دیگر با وجود رفتار کلی مناسب دچار خرابی‌های متعددی گردیده‌اند [۳]. در این ساختمان‌ها غالباً با به وجود آمدن ستون کوتاه، زمینه آسیب‌پذیری برشی ستون‌ها و کاهش میزان ظرفیت جابه‌جایی ستون، پایداری سازه را مختل می‌شود. معمولاً ستون کوتاه در سیستم سازه‌ای فوقف به دلیل حضور تیرهای همبند در دیوارهای برشی در محدوده تراس سازه به وجود می‌آید. در نهایت با توجه به عدم وجود محصور شدگی و فولادهای عرضی لازم برای داشتن شکل‌پذیری مناسب، این سازه‌ها دچار خرابی‌هایی در اعضای کوتاه خود شده و بعضاً آن‌ها را تا سطح خرابی مستعد تخریب پیش می‌برد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، امروزه دیوارهای برشی طراحی شده با آیین‌نامه‌های فعلی، ظرفیت برشی بالایی داشته و عملاً با مکانیزم خمشی که با جاری شدن فولادهای طولی در المان‌های مرزی همراه است، موجبات جذب و استهلاک انرژی را به خوبی تأمین می‌کنند.

در سال ۲۰۰۹ سعیدی و همکاران [۴] نوعی ستون مرکزگرای جدید را برای پل‌ها ارائه دادند که با استفاده از مصالح سوپرالاستیک تغییر شکل‌های ماندگار را به حداقل می‌رساند. در نمونه آزمایشگاهی اول (RSC) از مصالح بتنی معمول و میلگرد فولادی در ناحیه مفصل پلاستیک استفاده شد. در دو نمونه آزمایشگاهی دیگر از آلیاژ SMA، در یک نمونه (RNC) از بتن معمول و نمونه دیگر (RNE) از بتن انعطاف‌پذیر ECC در ناحیه مفصل پلاستیک استفاده شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای تا حداکثر دررفت ۱۰٪ قرار گرفتند. به طور میانگین تغییر شکل ماندگار در نمونه RNE، ۱/۶ نمونه RSC و ۱/۲ نمونه RNC بود. نتایج نشان دهنده تأثیر قابل توجه استفاده ترکیبی SMA و ECC در کاهش تغییر شکل ماندگار بود.

در سال ۲۰۱۳ لو<sup>۵</sup> و همکارانش [۵] سه سیستم سازه‌ای مقاوم در مقابل نیروهای جانبی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تحقیقاتشان را بر روی یک قاب بتنی خود محور تحت میز لرزه، بارگذاری شبه استاتیکی بر روی دیوار برشی بتنی مجهز به تیرهای کوپل خود محور قابل تعویض و دیوار برشی

- 1 Indian Hills Building, USA
- 2 Panarma Building, USA
- 3 Fernando Earthquake
- 4 Northridge earthquake
- 5 Lu

6 Abdulridha

7 Cortés

همراه میلگردهای SMA در دو انتهای دیوار استفاده شده است. میلگردهای SMA و بتن توانمند علاوه بر تأمین قابلیت برگشت‌پذیری سازه می‌تواند با کاهش میزان ترک خوردگی در نواحی بحرانی دیوار عملکرد دیوار را در محدوده مورد نظر به لحاظ مقاومت و اتلاف انرژی قرار دهد.

## ۲- الگوسازی نظری

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند، نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که از آن جمله می‌توان به عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا ۸ درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند اشاره کرد. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دار شکلی، نیتینول است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم است. خصوصیت اصلی این مواد، رفتار سوپر الاستیک آن‌ها است؛ بدین معنی که قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۸ درصد، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند.

در این تحقیق تأثیر استفاده از مصالح هوشمند SMA در دیوارهای برشی، جهت کاهش تغییر شکل‌های ماندگار بررسی می‌شود. مجموعاً چهار مدل جهت صحت‌سنجی از سه مقاله مختلف انتخاب و در نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی و صحت‌سنجی شد. در مقاله اول که توسط عبدالریضا<sup>۲</sup> و پالمو<sup>۳</sup> [۶] نوشته شده، به بررسی عملکرد دو نوع دیوار برشی پرداخته شده است. دو دیوار دارای ابعاد یکسان بوده و تنها در مشخصات میلگردها در نواحی مرزی تفاوت دارند. دیوار اول دارای میلگرد فولادی در نواحی مرزی و دیوار دوم دارای میلگردهای SMA و فولادی در نواحی مرزی است. دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای معکوس قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه – جابه‌جایی گره بالای دیوار رسم شده‌اند.

به منظور ارائه یک نوع دیوار برشی مرکز‌گرای جدید با قابلیت تعمیر پس از زلزله با المان‌های مجزا در نواحی مرزی دیوار برشی، دو مدل آزمایشگاهی دیگر مدل‌سازی و صحت‌سنجی شد. مدل اول یک دیوار برشی معمول با میلگردهای فولادی است که از مطالعات دازیو<sup>۴</sup> و همکاران [۸] است. مدل دوم یک ستون با میلگردهای SMA و بتن شکل‌پذیر ECC<sup>۵</sup> است که از

بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا ۸ درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند اشاره کرد. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دار شکلی، نیتینول است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد. خصوصیت اصلی این مواد، رفتار سوپر الاستیک آن‌ها می‌باشد؛ بدین معنی که قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۸ درصد، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند. در این پژوهش از آلیاژ نیتینول در مدل‌سازی استفاده شده است.

اکثر سیستم‌های کنترل غیرفعال که امروزه استفاده می‌شوند، مشکلاتی از قبیل عمر مفید کم، خستگی، سختی نصب، احتیاج به تعویض پس از زلزله و اعمال تغییر در هندسه سازه پس از وقوع زلزله را دارند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به عنوان موادی هوشمند که بسیاری از این مشکلات و محدودیت‌ها را ندارند، اخیراً در کنترل غیرفعال سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین ضعف دیوار برشی احتمال شکست برشی در صورت عدم طراحی مناسب، به وجود آمدن ترک‌های زیاد در نواحی مرزی دیوار و همچنین وجود تغییر شکل‌های ماندگار پس از زلزله‌های شدید است. در این تحقیق برای افزایش رفتار خمشی و جلوگیری از به وجود آمدن ترک‌های برشی زیاد که باعث کاهش مقاومت دیوار شده و همچنین کاهش چشمگیر تغییر شکل‌های ماندگار بعد از زلزله‌های بزرگ از میله‌های با آلیاژ حافظه‌دار شکلی SMA<sup>۱</sup> استفاده شده است. بعد از مطالعه پارامتریک و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر دیوار برشی مسلح با آرماتورهای فولادی و SMA، یک مدل نوآورانه از دیوار برشی مرکز‌گرا ارائه می‌شود. در این تحقیق نوع خاصی از دیوار برشی پیشنهاد می‌شود که در نواحی مرزی و بحرانی دیوار از یک المان مجزای بتنی مسلح با میله‌های SMA استفاده شده است. استفاده از این المان باعث می‌شود که دیوار برشی مورد نظر رفتار مناسب‌تری را از خود نشان دهد و با توجه به خاصیت ابر کشسانی این آلیاژ، آسیب کمتری در نواحی مرزی دیوار به وجود می‌آید و همچنین خاصیت حافظه شکلی این آلیاژ باعث عدم وجود تغییر شکل‌های ماندگار پس از زلزله‌های نسبتاً شدید در سازه می‌شود. مدل نوآورانه طوری طراحی می‌شود که خرابی‌ها در المان‌های مرزی رخ دهد و با تعویض المان مرزی دیوار برشی قابلیت تعمیر خواهد داشت.

در این پژوهش، به بررسی تحلیلی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی دارای قابلیت برگشت‌پذیری بعد از زلزله پرداخته شده است. بدین منظور از ترکیب بتن‌های HPFRC (بتن ECC با SMA ترکیب شده است) به

2 Abdolridha

3 Palermo

4 Dazio

5 Engineered cementitious composite

1 Smart Material Alloy

که هر کدام دارای شش درجه آزادی شامل سه درجه آزادی در هر انتهای المان می‌باشند (درجات آزادی انتقالی در راستاهای افقی و قائم و درجه آزادی دورانی حول محور عمود بر صفحه مدل‌سازی). ساختار در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی دیوار در این روش به صورت یک سری المان دو سر مفصل موازی به ازای هر ماکروفاایبر، رفتار برشی و دورانی المان است. پس از معرفی تعداد ماکروفاایبرهای مورد نیاز جهت معرفی مقطع دیوار، مشخصات مرکز دوران المان به صورت نسبت فاصله آن تا گره ابتدایی المان در نظر گرفته می‌شود. در ادامه ضخامت و پهنای هر ماکروفاایبر، نسبت سطحی فولاد در ماکروفاایبر شماره تگ مصالح بتنی و فولادی به صورت آرایه‌ای از اعداد و در انتهای دستور شماره تگ مصالح برشی المان معرفی می‌شود. در شکل ۱ شماتیک مدل‌سازی دیوار برشی بتنی به روش المان‌های قائم چندتایی آورده شده است.

## ۲-۱-۱- مدل اعتبارسنجی اول و دوم

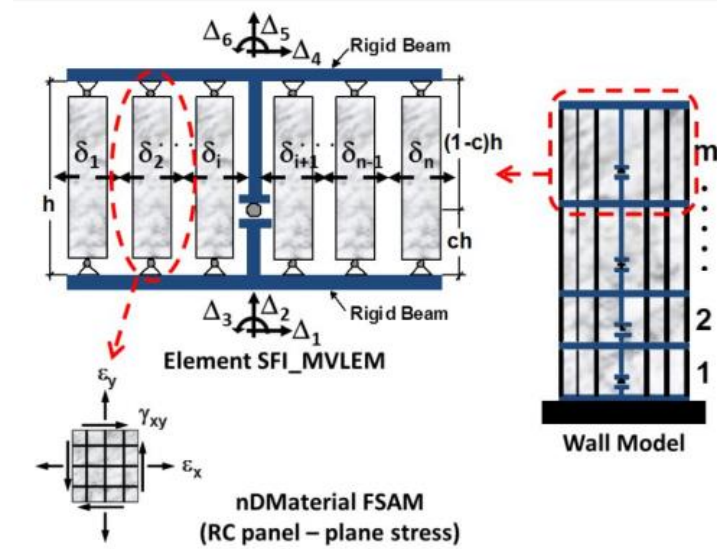
در مقاله اول که توسط عبدالریضا و پالمو [۶] نوشته شده، به بررسی عملکرد دو نوع دیوار برشی پرداخته شده است. دو دیوار دارای ابعاد یکسان بوده و تنها در مشخصات میلگردها در نواحی مرزی تفاوت دارند. دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای معکوس قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه - جابه‌جایی گره بالای دیوار رسم شده‌اند. برای تشخیص بهتر نوع دیوارها از حروف مشخصه  $SR-W_1$  که S حرف نشانگر دیوار دارای میلگرد فولادی شکل‌پذیر معمولی Steel و حروف مشخصه  $NR-W_2$  که N حرف نشانگر دیوار دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل-تیتانیوم) و فولاد نرمه است استفاده شده است. مشخصات و پارامترهای دیوارها از مطالعات عبدالریضا و پالمو [۶] انتخاب شده‌اند. دیوار  $SR-W_1$  دارای میلگردهای فولادی شکل‌پذیر دارای مقطعی مستطیلی به ابعاد  $1000 \times 150$  میلی‌متر مربع است که در آن عرض دیوار و ۱۵۰ ضخامت دیوار است. ارتفاع دیوار ۲۲۰۰ میلی‌متر است که منجر به نسبت ابعادی  $2/2$  (ارتفاع تقسیم بر عرض) می‌شود. رفتار حاکم بر دیوارهای برشی انتخاب شده با توجه به نسبت ابعادی دیوار رفتار خمشی است. طراحی دیوار بر اساس جزئیات لرزه‌ای دیوارهای شکل‌پذیر مطرح شده در آیین‌نامه بتن کانادا  $A23.3-04$  [۱۱] انجام شده است. دو ردیف میلگرد در راستاهای متعام افقی و قائم در داخل جان دیوار قرار گرفته است. میلگردهای قائم داخل جان شامل ۳ ردیف دوتایی از میلگرد  $M10$  (با قطر  $11/3$  میلی‌متر و مساحت مقطع  $100$  میلی‌متر) با فاصله یکنواخت ۱۵۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. میلگردهای فولادی در ردیف

مطالعات سعیدی<sup>۱</sup> و همکاران [۴] است. هر دو مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه - جابه‌جایی رسم شده است. برای تشخیص بهتر نوع مدل‌ها از حروف مشخصه  $WSH_3$  برای دیوار برشی و RNE برای ستون که N حرف نشانگر ستون دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل - تیتانیوم) و E نشانگر بتن شکل‌پذیر ECC است. پس از مدل‌سازی دیوارهای  $NR$ ،  $WH_3-SR$ ،  $W_2-W_1$  و ستون RNE و سپس به دست آوردن خروجی‌های انرژی مستهلک شده و برش پایه - جابه‌جایی تیر فوقانی به صورت چرخه‌ای و اعتبارسنجی خروجی‌های به دست آمده با مقالات مرجع به منظور بررسی بیش‌تر از سه پارامتر متغیر که شامل نیروی محوری وارد بر دیوار، طول افقی نواحی مرزی و قطر میلگردهای SMA که درصد آن‌ها نیز بر روی دیوار تأثیرگذار است، استفاده شده است. همچنین یک مدل نوآورانه از ترکیب دیوار برشی با ستونک‌هایی از جنس بتن ECC و میلگرد SMA ارائه می‌شود. مدل ارائه شده به این صورت است که ستونک‌های ارتجاعی در نواحی مرزی دیوار قرار می‌گیرد و باعث رفتار مرکزگرایی در دیوار برشی می‌شود.

## ۲-۱-۲ مدل‌سازی نرم‌افزاری

جهت صحت‌سنجی و تحلیل مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق از نرم‌افزار OpenSees استفاده شد. این نرم‌افزار توسط اعضای دانشگاه برکلی ارائه شده است و به عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند اجزای محدود، دارای قابلیت‌های متعددی در زمینه تحلیل مدل به صورت ماکرو و میکرو می‌باشد. برای مدل‌سازی دیوار برشی در این تحقیق از المان‌های قائم چندتایی استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی دیوار برشی از المان قائم چندتایی خطی که به اختصار  $SFI-MVLEM^2$  نامیده می‌شوند، استفاده می‌شود. در این روش، اندرکنش میان نیروی محوری وارد بر دیوار برشی و لنگر خمشی ایجاد شده تحت نیروهای وارده از طریق مدل‌سازی دیوار با المان‌های قائم چندتایی که به صورت موازی هم مدل می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی دیوار از طریق المان‌های قائم چندتایی بر پایه مطالعات کلوزواری<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ است [۹]. در این روش دیوار با استفاده از تعدادی پانل بتن مسلح که از مصالح  $FSAM^4$  بهره می‌برند، مدل می‌شود. المان‌های  $SFI-MVLEM$  در فضای دو بعدی کاربرد داشته

- 1 Saiidi
- 2 Multiple Vertical Line Element Model
- 3 Kolozvari
- 4 Fixed Strut Angel



شکل ۱. نحوه قرارگیری ماکرو فایبرها در المان SFI-MVLEM در مقطع دیوار [۱۰]

Fig. 1. How to place the macro fibers in the SFI-MVLEM element in the cross section of the wall [10]

جدول ۱. مشخصات میلگردهای فولادی ۱۰M [۱۲]

Table 1. Specifications of 10M steel bars [12]

نوع میلگرد فولادی	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)	مدول الاستیک $E_s$ (GPa)
M10	۴۲۵	۶۱۵	۲۰۵

عرضی دورگیر در ناحیه مفصل پلاستیک (۸۰۰ میلی‌متر پایینی دیوار) به میزان ۷۵ میلی‌متر و این فاصله در بیرون از ناحیه ایجاد مفصل پلاستیک دو برابر یعنی ۱۵۰ میلی‌متر فرض شده است. در شکل ۲ و ۳ مقطع عرضی و نمای جانبی دیوار برشی SR-W1 به همراه ابعاد فونداسیون زیرین و تیر فوقانی نشان داده شده است.

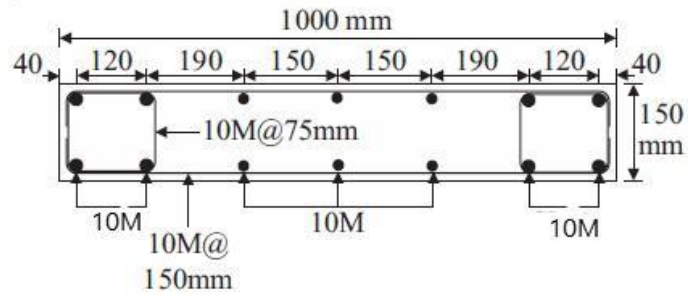
ابعاد دیوار NR-W2 دارای میلگردهای فولادی و مصالح SMA نیز دارای ابعاد مشابهی با دیوار SR-W1 دارد. دیوار NR-W2 که از آرماتورهای فولادی شکل‌پذیر فولادی و آرماتورهایی با آلیاژ حافظه‌دار تشکیل شده در ناحیه جان همانند دیوار SR-W1 در راستای قائم دارای ۳ ردیف دوتایی از میلگردهای M10 بوده و در راستای افقی ۱۵ ردیف دوتایی از میلگردهای مشابه M10 است. فاصله بین دو میلگرد متوالی در داخل جان در هر دو راستای طولی و عرضی ۱۵۰ میلی‌متر است. درصد آرماتورهای طولی و عرضی در داخل جان دیوار NR-W2 همانند دیوار SR-W1 به میزان ۰/۸۸

افقی شامل ۱۵ ردیف دوتایی از میلگرد M10 با فاصله یکسان ۱۵۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنابراین درصد آرماتورهای طولی دیوار برشی در راستاهای افقی و قائم جان به میزان ۰/۸۸٪ محاسبه می‌گردد. در جدول ۱ مشخصات میلگردهای M10 آورده شده است [۱۲].

میلگردهای فولادی قائم در داخل نواحی مرزی دیوار شامل ۴ عدد میلگرد M10 است که جهت جلوگیری از کمانش میلگردهای قائم در نواحی مرزی از میلگردهای عرضی دورگیر بسته با شماره M10 استفاده گردیده است. طول قائم ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک<sup>۱</sup> در دیوار SR-W1 برابر ۸۰۰ میلی‌متر از سطح فوقانی فونداسیون تا داخل دیوار امتداد یافته است. همچنین طول عرضی ناحیه مفصل پلاستیک ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بر اساس حساسیت بیشتر ناحیه مفصل پلاستیک و ایجاد نیروها و تنش‌های درون صفحه‌ای بیشتر در این منطقه فاصله بین میلگردهای

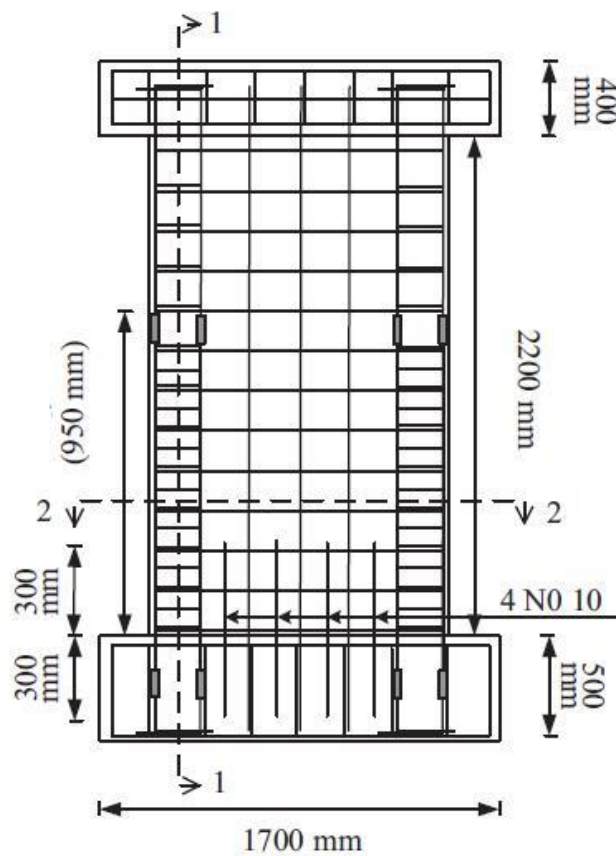
1 Plastic Hinge Zone





شکل ۲. مقطع عرضی دیوار برشی SR-W1 [6]

Fig. 2. Cross section of W1-SR shear wall [6]



شکل ۳. نمای دیوار برشی W1-SI به همراه جزئیات ابعاد نمونه [۶]

Fig.3. The view of W1-SR shear wall along with the details of sample dimensions [6]

دارای مقاطع بزرگتری است، مقاومت بیش‌تر این شماره از میلگردها در برابر تسلیم یا کمانش طولی است. در جدول ۲ مشخصات مربوط به میلگرد M۱۵ آورده شده است [۱۲].

درصد است. در نواحی مرزی دیوار NR-W۲ و در محدوده ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در پای دیوار از ۴ عدد میلگرد SMA به صورت میلگردهای قائم استفاده شده است، در بالای ناحیه تشکیل پلاستیک از ۴ عدد میلگرد فولادی M۱۵ استفاده شده است. دلیل استفاده از میلگردهای M۱۵ که

جدول ۲. مشخصات میلگردهای فولادی M15 [۱۲]

Table 2. Specifications of M15 steel bars [12]

نوع میلگرد فولادی	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)	مدول الاستیک $E_s$ (GPa)
M15	۴۴۰	۶۵۰	۲۰۰

جدول ۳. پارامترهای عددی مصالح Self-Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA [۱۳]

Table 3. Numerical parameters of Self Centering materials for modeling SMA rebars [13]

پارامتر	سختی اولیه MPa	سختی ثانویه MPa	تنش فعال‌سازی MPa	نسبت تنش فعال به معکوس آن	کرنش حد لغزش	کرنش تکیه‌گاهی	نسبت سختی تکیه‌گاهی به اولیه
مقدار	۳۹۷۱۴	۵۲۴	۳۷۸/۵	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۱	۰/۲

انرژی ورودی به سازه‌ها را از طریق خاصیت میرایی چرخه‌ای مستهلک شده و ظرفیت‌های جابه‌جایی و مقاومتی المان‌های سازه‌ای را در مقایسه با میلگردهای فولادی معمول افزایش دهند. در مدل دیوار NR-W2 از میلگرد SMA با قطر ۱۲/۷ میلی‌متر و با طول کلی ۱۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است که از این طول ۲۵۰ میلی‌متر در داخل فونداسیون و مابقی ۹۵۰ میلی‌متر در داخل دیوار برشی جای‌گذاری شده است.

دلیل استفاده از میلگردهای SMA با قطر ۱۲/۷ میلی‌متر را می‌توان ۲ مورد اشاره داشت:

الف) در دسترس بودن این ابعاد از میلگردهای SMA نسبت به سایر میلگردهای SMA موجود

ب) معادل بودن با مقدار AsFy یا نیروی ایجاد شده توسط آرماتورهای طولی M1۰ در نواحی مرزی در مدل SR-W1

در جدول ۳ پارامترهای عددی مصالح Self-Centering جهت

مدل‌سازی میلگردهای SMA آورده شده است [۱۳].

به دلیل عدم وجود آیین‌نامه مستقلی جهت طراحی میلگردهای SMA، طراحی، انتخاب ابعاد و چینش این دسته از میلگردها بر اساس مطالب موجود در آیین‌نامه‌های طراحی میلگردهای فولادی شکل‌پذیر انجام شده است. دلیل استفاده از میلگردهای SMA در دیوار NR-W2 بهبود پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار نسبت به دیوار با مصالح فولادی تنها SR-W1 است. میلگردهای SMA با ترکیب شیمیایی ۵۶ درصد نیکل Ni و ۴۴ درصد تیتانیوم Ti باعث کاهش یا بهبود تغییر شکل‌های سازه‌ای به محض باربرداری از دیوار برشی می‌شوند که در اصطلاح به این کاهش جابه‌جایی‌ها در هنگام باربرداری اثرات فوق‌ارتجاعی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. علاوه بر این از مصالح SMA می‌توان در افزایش و بهبود عملکرد سازه‌هایی که ناشی از حرارت دچار تغییر شکل می‌شود، استفاده نمود که در اصطلاح از این مشخصه با نام اثرات حافظه شکلی<sup>۲</sup> نام برد می‌شود. علاوه بر مطالب بالا مصالح SMA می‌توانند

- 1 Super Elastic Effects
- 2 Shape Memory Effects

جدول ۴. مشخصات میلگردهای فولادی [۸]

Table 4. Specifications of steel bars [8]

مدول الاستیک Es (GPa)	تنش نهایی fu (MPa)	تنش تسلیم fy (MPa)	نوع میلگرد فولادی (mm)
۲۰۰	۶۱۵	۵۶۲	۴/۲
۲۰۰	۵۵۲	۴۸۹	۶
۲۰۰	۷۰۰	۵۶۹	۸
۲۰۰	۷۲۵	۶۰۱	۱۲

میلگردهای فولادی قائم در داخل نواحی مرزی دیوار شامل ۴ عدد میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر است که جهت جلوگیری از کماتش میلگردهای قائم در نواحی مرزی از میلگردهای عرضی دورگیر بسته با قطر ۴/۲ میلی‌متر با فاصله قائم ۷۵ میلی‌متر استفاده گردیده است. مشخصات میلگردها تحت آزمایش کشش تک‌محوری با طول خالص ۷۵۰ میلی‌متر توسط دازیو و همکاران [۸] به دست آمده است که در جدول ۴ مشخصات آن‌ها آورده شده است.

در شکل ۴ مقطع عرضی دیوار برشی با جزئیات میلگردگذاری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳۵ نمای روبرو و جانبی دیوار برشی WSH<sup>۳</sup> به همراه ابعاد فونداسیون زیرین نشان داده شده است.

ستون RNE ارائه شده در این مطالعه به صورت ارتجاعی با قابلیت رسیدن به دریفت‌های زیاد تا ۱۲٪ است. آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) تغییر مکان جانبی ماندگار را به حداقل می‌رساند و بتن شکل‌پذیر (ECC) آسیب‌ها را به حداقل می‌رساند. ECC یک بتن مرکب تقویت شده با فیبر و دارای عملکرد بالا است. این بتن شکل‌پذیر در اثر رفتار سخت شونده‌گی کرنشی، مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی از خود نشان می‌دهد [۱۵]. در این مطالعه بتن ECC تقویت شده با الیاف پلی‌وینیل‌الکل (PVA) استفاده شد. تمرکز این مطالعه بر روی رفتار خمشی ستون‌ها بود. برای اطمینان از حاکم بودن رفتار خمشی و جلوگیری از شکست برشی، از نسبت بُعدی (ارتفاع کنسول به قطر ستون) ۴/۵ و نسبت میلگرد طولی ۲٪ و فولاد عرضی مطابق با دستورالعمل LRFD لرزه‌ای پل‌ها بزرگراهی ارائه شده توسط فریدلند<sup>۲</sup> و مایس<sup>۳</sup> [۱۶] استفاده شده است. ستون RNE با قطر ۱۰ اینچ (۲۵۴ میلی‌متر) و ارتفاع ۴۵ اینچ (۱۱۴۳ میلی‌متر) از بالای پایه

۲-۱-۲- مدل اعتبارسنجی سوم و چهارم

به منظور ارائه یک نوع دیوار برشی مرکزگرای جدید با قابلیت تعمیر پس از زلزله با المان‌های مجزا در نواحی مرزی دیوار برشی، دو مدل آزمایشگاهی دیگر مدل‌سازی و صحت‌سنجی شد. مدل اول یک دیوار برشی معمول با میلگردهای فولادی است که از مطالعات دازیو و همکاران [۸] است. مدل دوم یک ستون با میلگردهای SMA و بتن شکل‌پذیر ECC<sup>۱</sup> است که از مطالعات سعیدی و همکاران [۴] است. هر دو مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه - جابه‌جایی رسم شده است. برای تشخیص بهتر نوع مدل‌ها از حروف مشخصه WSH<sup>۳</sup> برای دیوار برشی و RNE برای ستون که N حرف نشانگر ستون دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل - تیتانیوم) و E نشانگر بتن شکل‌پذیر ECC است.

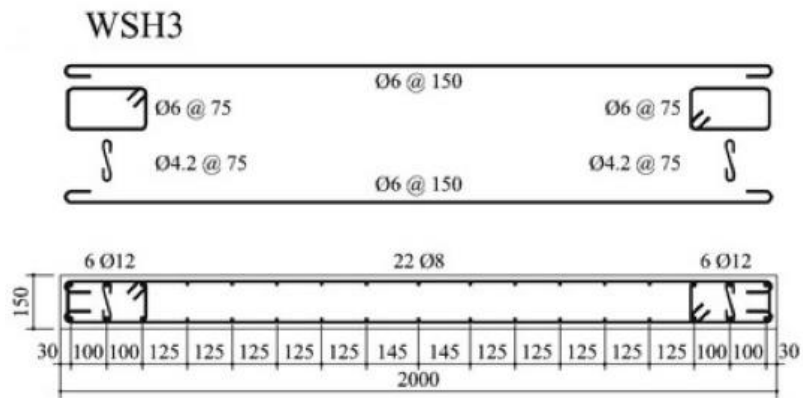
دیوار WSH<sup>۳</sup> دارای میلگردهای فولادی شکل‌پذیر دارای مقطعی مستطیلی به ابعاد ۲۰۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع است که در آن ۲۰۰۰ عرض دیوار و ۱۵۰ ضخامت دیوار است. ارتفاع دیوار ۴۵۶۰ میلی‌متر است که منجر به نسبت ابعادی ۲/۳ (ارتفاع تقسیم بر عرض) می‌شود. رفتار حاکم بر دیوارهای برشی انتخاب شده با توجه به نسبت ابعادی دیوار رفتار خمشی است. طراحی دیوار بر اساس جزئیات دستورالعمل لرزه‌ای اروپا EuroCode ۰۸ [۱۴] انجام شده است. دو ردیف میلگرد در راستاهای متعام افقی و قائم در داخل جان دیوار قرار گرفته است. میلگردهای قائم داخل جان شامل ۱۱ ردیف دوتایی از میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر با فاصله یکنواخت ۱۲۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. میلگردهای فولادی در ردیف افقی شامل ۳۳ ردیف دوتایی از میلگرد ۶ میلی‌متر با فاصله یکسان ۱۵۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنابراین درصد آرماتورهای طولی دیوار برشی در راستاهای افقی و قائم جان به میزان ۰/۵۴٪ محاسبه می‌گردد.

2 Friedland

3 Mayes

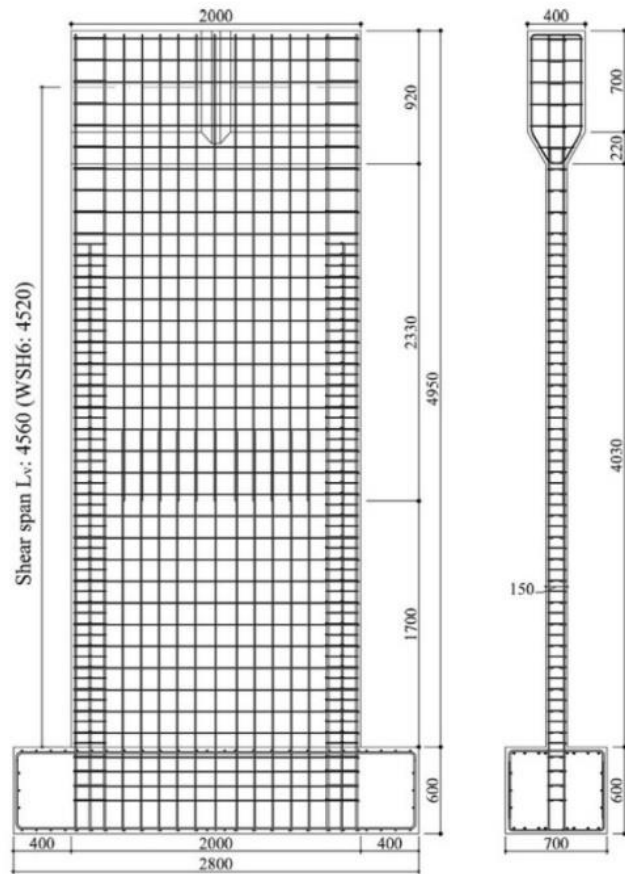
1 Engineered cementitious composite





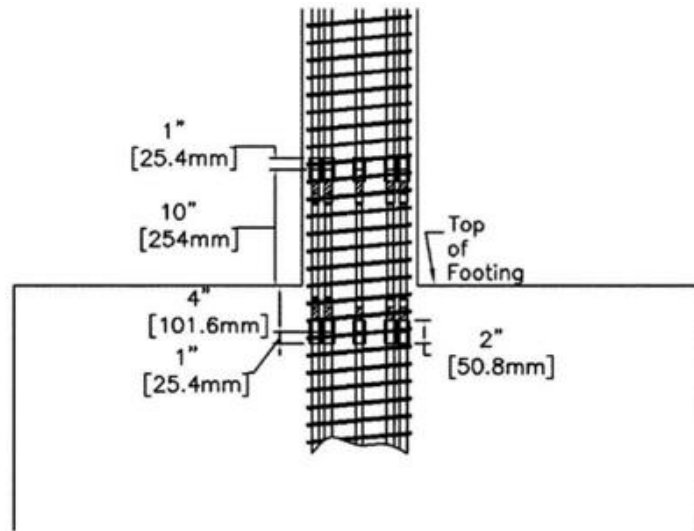
شکل ۴. مقطع عرضی دیوار برشی با جزئیات میلگردگذاری [۸]

Fig. 4. Cross-section of the shear wall with rebar details [8]



شکل ۵. نمای روبرو و جانبی دیوار برشی WSH3 [۸]

Fig. 5. Front and side view of shear wall WSH3 [8]



شکل ۶. جزئیات محل مفصل پلاستیک مدل RNE [۴]

Fig.6. Details of the location of the plastic joint of the RNE model [4]

جدول ۵. مشخصات میلگردهای فولادی M15 و SMA [۱۲]

Table 5. Specifications of M15 and SMA steel bars [12]

نوع میلگرد	قطر میلگرد (mm)	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)	مدول الاستیک $E_s$ (GPa)
فولادی	۱۶	۴۱۳/۷	۵۲۰	۲۰۰
SMA	۱۲/۷	۳۷۹	۵۲۴	۶۳

با استفاده از دستورالعمل طراحی لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی NCHRP-۴۹-۱۲ تا ۴۹-۱۶ طراحی شده‌اند، آرما تور عرضی مارپیچ شامل کابل فلزی گالوانیزه به قطر ۴/۵ میلی‌متر با گام‌های ۱/۵ اینچ (۳۸/۱ میلی‌متر) بود. همچنین کاور بتن به مقدار ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) در نظر گرفته شد. در جدول ۵ مشخصات مربوط به میلگرد فولادی و SMA آورده شده است. مقاومت فشاری بتن معمولی ۲۸ روزه ۵۲۱۷ psi (۳۶ MPa) بود. مخلوط ECC حاوی ۱/۳۵٪ وزنی و ۲ درصد حجمی الیاف pva بود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط psi ECC ۴۷۴۶ (۳۲/۷ MPa) بود.

در جدول ۶ پارامترهای عددی مصالح Self-Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA آورده شده است [۱۳].

تا مرکز محل اثر بار جانبی است. یک مکعب بتنی به بعد ۲۰ اینچ (۵۰۸ میلی‌متر) در بالای ستون جهت انتقال بار جانبی از دستگاه محرک قرار داده شد. مدل RNE برای ارزیابی تاثیر استفاده از NiTi و ECC طراحی شده‌اند. این مصالح فقط در محل مفصل پلاستیک برای به حداقل رساندن هزینه استفاده شده‌اند. شکل ۶ [۴] جزئیات محل مفصل پلاستیک را برای مدل RNE نشان می‌دهد. طول کلی میله‌های NiTi، ۱۴ اینچ (۳۵۵/۶ میلی‌متر) و قطر آن ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) است.

ستون RNE با هشت میلگرد طولی با فواصل مساوی در یک الگوی دایره‌ای میلگردگذاری شده است. آرما تورهای طولی با هشت میله NiTi به قطر ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) در محل مفصل پلاستیک و میلگرد فولادی با قطر ۱۶ میلی‌متر و درجه ۶۰ در بقیه ستون تقویت شدند. آرما تورهای عرضی

جدول ۶. پارامترهای عددی مصالح Self-Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA [۱۳]

Table 6. Numerical parameters of Self Centering materials for modeling SMA rebars [13]

پارامتر	سختی اولیه MPa	سختی ثانویه MPa	تنش فعال‌سازی MPa	نسبت تنش فعال به معکوس آن	کرنش حد لغزش	کرنش تکیه‌گاهی	نسبت سختی تکیه‌گاهی به اولیه
مقدار	۳۹۷۱۳/۸	۵۲۴	۳۷۸/۵۲	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۱	۰/۲

جدول ۷. معرفی پارامترهای متغیر x و y مطالعه و میزان هر پارامتر

Table 7. Introduction of x and y variable parameters of the study and the amount of each parameter

مقدار عددی				پارامتر متغیر
0.2AgFc	0.15AgFc	0.1AgFc	0.07AgFc	میزان بار محوری وارده بر دیوار
۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	طول افقی نواحی مرزی دیوار (mm)
۱۶	۱۲/۷	۹	۵	قطر آرماتورهای SMA (mm)
۶۳۵	۵۰۸	۳۸۱	۲۵۴	طول قائم ستونک RNE در مدل دیوار برشی نوآورانه (mm)

جدول ۸. مدل‌های اعتبارسنجی

Table 8. Validation models

عنوان مدل	دیوار عبدالریضا و پالرمو شامل میلگرد فولادی	دیوار عبدالریضا و پالرمو شامل میلگرد فولادی و میلگرد SMA	دیوار دازیو و همکاران شامل میلگردهای فولادی	ستون سعیدی و همکاران شامل بتن ECC و میلگردهای SMA
نشان اختصاری	W1-SR	W2-NR	WSH3	RNE

در جدول ۸ مدل‌های اعتبارسنجی شده یا مدل‌های مرجع برداشته شده از مطالعات عبدالریضا و پالرمو [۶]، دازیو و همکاران [۸] و سعید و همکاران [۴] آورده شده است.

۲-۲-۱- پارامتر نیروی محوری وارد بر دیوار

در جدول ۹ میزان نیروی محوری وارده بر دیوار برشی دارای میلگردهای ترکیبی SMA و فولاد شکل‌پذیر برحسب درصدی از Ag×Fc آورده شده است. که پارامتر Ag سطح مقطع کلی دیوار برشی و Fc تنش فشاری ۲۸ روزه بتن مصرفی در دیوار برشی است.

۲-۲-۲- پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

پس از مدل‌سازی دیوارهای W1-W2، WH3-SR، NR و ستون RNE و به دست آوردن خروجی‌های انرژی مستهلک شده و برش پایه-جابه‌جایی تیر فوقانی به صورت چرخه‌ای و اعتبارسنجی خروجی‌های به دست آمده با مقالات مرجع به منظور بررسی بیش‌تر از سه پارامتر متغیر که شامل نیروی محوری وارد بر دیوار، طول افقی نواحی مرزی و قطر میلگردهای SMA که درصد آن‌ها نیز در دیوار تأثیرگذار است، استفاده شده است. همچنین اثر طول قائم ستونک RNE در مدل دیوار برشی نوآورانه مورد بررسی قرار گرفت. در جدول زیر پارامترهای مورد بررسی و مقادیر مختلف هر پارامتر متغیر آورده شده است.

جدول ۹. پارامتر نیروی محوری وارد بر دیوار برشی W2-NR

Table 9. Axial force parameter on W2-NR shear wall

نیروی محوری وارد بر دیوار برشی	۰/۰۷ سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	۰/۱۰ سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	۰/۱۵ سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	۰/۲۰ سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن
علامت اختصاری مدل	N(0.07A <sub>g</sub> F <sub>c</sub> )	N(0.1A <sub>g</sub> F <sub>c</sub> )	N(0.15A <sub>g</sub> F <sub>c</sub> )	N(0.2A <sub>g</sub> F <sub>c</sub> )

جدول ۱۰. پارامتر میزان عرض نواحی مرزی دیوار W2-NR

Table 10. Parameter of the width of the boundary areas of the W2-NR wall

عرض نواحی مرزی دیوار	۱۰۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	۲۰۰ میلی‌متر	۲۵۰ میلی‌متر
علامت اختصاری مدل	BoundWidth (100mm)	BoundWidth (150mm)	BoundWidth (200mm)	Boundwidth (250mm)

جدول ۱۱. پارامتر میزان قطر میلگردهای SMA دیوار W2-NR

Table 11. Parameter of the diameter of the SMA rebars of the W2-NR wall

عرض نواحی مرزی دیوار	۱۰۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	۲۰۰ میلی‌متر	۲۵۰ میلی‌متر
علامت اختصاری مدل	BoundWidth (100mm)	BoundWidth (150mm)	BoundWidth (200mm)	Boundwidth (250mm)

نواحی مرزی و در محدوده محل تشکیل مفصل پلاستیک در دیوار برشی، یکی از معیارهای تأثیرگذار در پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار برشی که در مطالعات گوناگونی از جمله مطالعه مک‌کورمیک<sup>۱</sup> و همکاران [۱۷] میزان قطر میلگردهای فوق ارتجاعی SMA است. از سوی دیگر تأثیرات فرم مصالح SMA به کار رفته در سازه‌های گوناگون از جمله فرم رشته‌ای مصالح یا فرم میلگرد در رفتار مرکزگرایی پاسخ‌های چرخه‌ای و میزان میرایی کلی سازه قابل توجه است [۱۸]. از آنجا که ۴ میلگرد SMA در نواحی مرزی قرار می‌گیرد، مقادیر مختلف قطر آرماتور SMA باعث به وجود آمدن درصد آرماتور متفاوت در آن نواحی می‌شود. در جدول ۱۱ پارامتر مربوط به میزان قطر میلگردهای SMA بررسی شده در این پایان‌نامه آورده شده است.

۲-۲-۲- پارامتر عرض نواحی مرزی دیوار

با توجه به فرضیات مدل‌سازی دیوارهای برشی به روش المان‌های قائم خطی چندتایی SFI-MVLEM استفاده شده در نرم‌افزار OpenSEES نواحی مرزی از بتن محصور شده و ناحیه میانی دیوار یا جان از بتن محصور نشده تشکیل شده‌اند. تغییر در ابعاد ناحیه مرزی دیوار به عنوان تغییر مهمی در اغلب مطالعات مربوط به پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار برشی بتنی شناخته می‌شود. در جدول ۱۰ مقادیر پارامتر میزان عرض نواحی مرزی دیوار آماده است.

۲-۲-۳- پارامتر قطر میلگردهای طولی SMA در نواحی مرزی

با توجه به استفاده از میلگردهایی با جنس آلیاژ حافظه‌دار SMA در

جدول ۱۲. پارامتر میزان ارتفاع ستونک های دیوار برشی دیوار WSH3

Table 12. The parameter of the height of the columns of the shear wall of WSH3 wall

ارتفاع ستونک ها	۲۵۴ میلی متر	۳۸۱ میلی متر	۵۰۸ میلی متر	۶۳۵ میلی متر
علامت اختصاری مدل	SMAColumn (10 inch)	SMAColumn (15 inch)	SMAColumn (20 inch)	SMAColumn (25 inch)

جدول ۱۳. مقادیر دریفت هر گام از تحلیل چرخه ای مدل W2-NR و W1-SR

Table 13. Drift values of each step of cyclic analysis of W1-SR and W2-NR models

گام تحلیل	۱-۵۰	۵۰-۱۷۵	۱۷۵-۴۳۰	۴۳۰-۸۰۶	۸۰۶-۱۳۱۰	۱۳۱۰-۲۰۶۶	۲۰۶۶-۳۰۷۴	۳۰۷۴-۴۵۸۵	۴۵۸۵-۶۶۰۰
مقادیر دریفت (%)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۵	۲	۳	۴

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خروجی برش پایه-جابه جایی مدل ها

در شکل ۷ شماتیک مدل نرم افزاری دیوارهای SR-W1 و NR-W2 آورده شده است. تفاوت دو مدل مذکور در تعریف مشخصات مصالح و درصد آرماتور نواحی مرزی می باشد، به همین دلیل شکل مدل نرم افزاری دو دیوار یکسان است. در شکل ۸ نمودار برش پایه - جابه جایی جانبی بالاترین تراز دیوار برشی دیوارهای SR-W1 و NR-W2 تحت تحلیل چرخه ای و بار محوری به میزان ۰.۱AgFc آورده شده است. در این شکل نمودارهای چرخه ای برش پایه-جابه جایی جانبی دیوارهای SR-W1 و NR-W2 به دست آمده از مطالعات عبدالریضا و پالرمو [۶] به عنوان مدل مرجع جهت مقایسه و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل سازی این دیوارها در نرم افزار آورده شده است. نحوه بارگذاری چرخه ای مدل ها طبق پروتکل ATC24 انجام شده است. در جدول ۱۳ مقادیر دریفت هر گام از تحلیل چرخه ای آورده شده است.

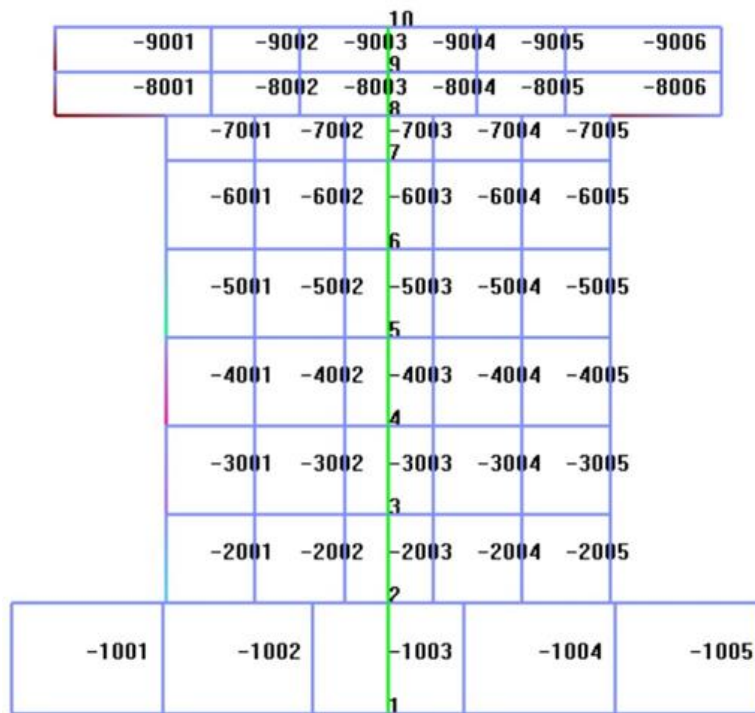
۳-۲-۴- پارامترهای متغیر دیوار برشی دارای ستونک های مرزی با میلگردهای SMA و بتن ECC

در این بخش به مطالعه رفتار چرخه ای دیوارهای برشی همراه با ستونک های بتنی با میلگردهای SMA و بتن با ترکیبات سیمانی مهندسی ECC پرداخته شده است به منظور مطالعه گسترده تر، رفتار دیوارهای برشی همراه با ستونک هایی در پایه های دیوار به عنوان نواحی مرزی و المان اتصال دهنده دیوار به فونداسیون بررسی شده است. به این جهت مطالعه پارامتریک دیوارهای برشی همراه با ستونک های SMA شامل پارامتر میزان ارتفاع ستونک ها به عنوان متغیر بررسی شده می شود. در جدول ۱۲ میزان ارتفاع بررسی شده ستونک های مرزی اتصال دهنده دیوار برشی به فونداسیون آورده شده است.

خروجی های گرفته شده از مطالعه پارامتریک دیوار برشی و ستونک های SMA در لیست زیر آورده شده است.

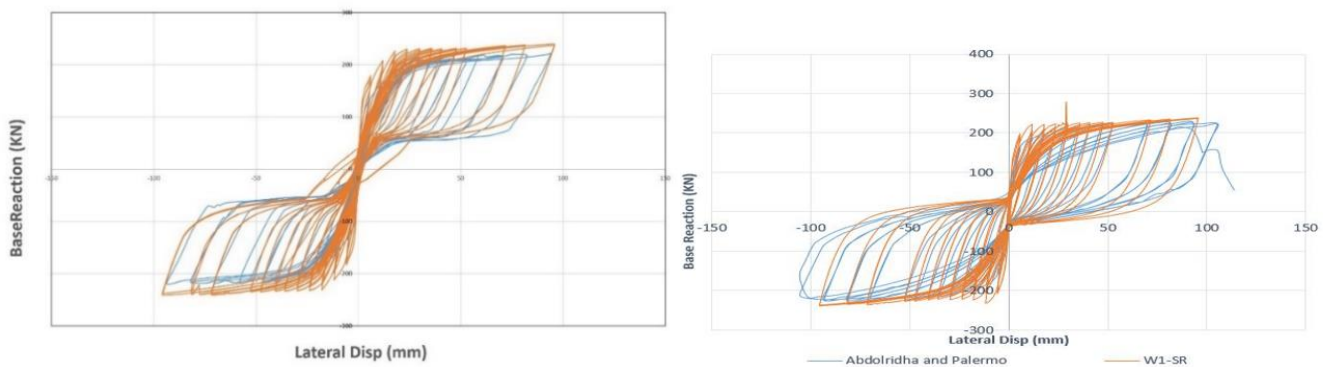
الف) خروجی برش پایه - جابه جایی جانبی

ب) خروجی انرژی جذب شده در طول تحلیل چرخه ای



شکل ۷. شماتیک مدل نرم‌افزاری دیوارهای W1-SR و W2-NR

Fig. 7. Schematic of the software model of W1-SR and W2-NR walls



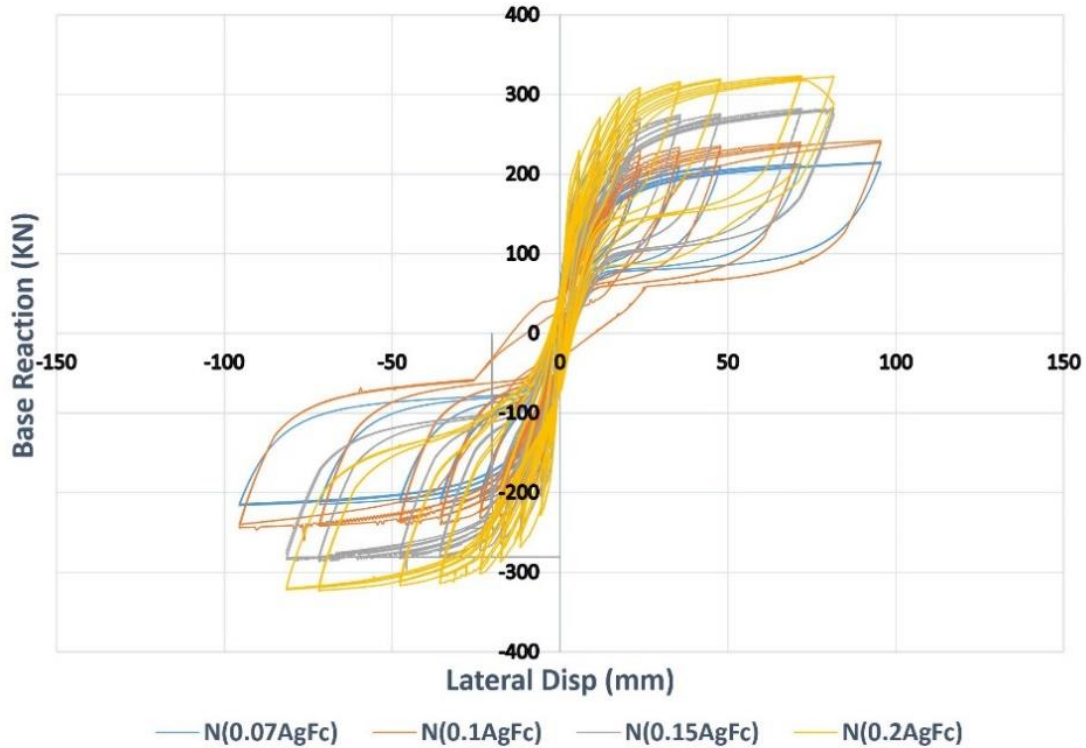
شکل ۸. صحت‌سنجی نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوار تحت بار محوری ثابت  $0.1A_gF_c$  (راست) مدل صحت‌سنجی دیوار W1-SR (چپ) مدل صحت‌سنجی دیوار W2-NR

Fig. 8. Validation of the cyclic diagram of base shear - lateral displacement of the wall under constant axial load of  $0.1A_gF_c$  Right (wall verification model W1-SR) left (wall verification model W2-NR)

این دیوارها در نرم‌افزار آورده شده است. با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌شود، استفاده از میلگرد SMA در نواحی مرزی دیوار برشی تاثیر بسیار زیادی در کاهش تغییر شکل‌های ماندگار و خاصیت مرکزگرایی دیوار برشی دارد.

با توجه به شکل ۸ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه-جابه‌جایی جانبی دیوارهای W1-SR و W2-NR مدل‌سازی شده و با نمودار به دست آمده از مطالعات عبدالریضا و پالرمو [۶] مقایسه شد و به عنوان مدل مرجع جهت مقایسه و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی





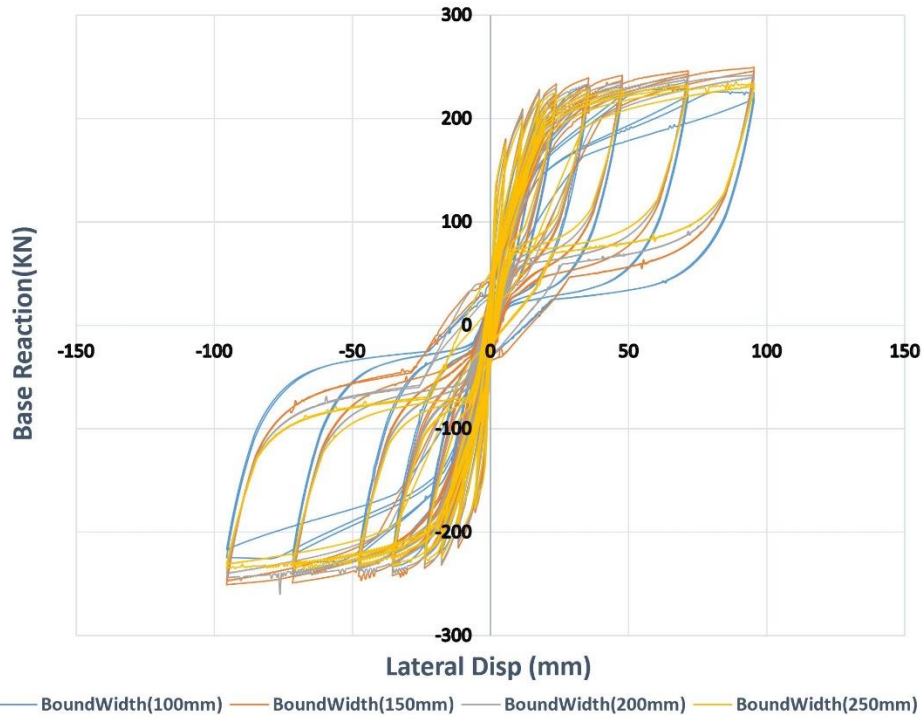
شکل ۹. نمودارهای چرخه‌ای برش پایه-جاب‌جایی جانبی دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف نیروی محوری وارده

Fig. 9. Cyclic diagrams of base shear - lateral displacement of W2-NR wall under different values of applied axial force

در شکل ۱۱ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه-جاب‌جایی بالای دیوار NR-W2 تحت مقادیر مختلف قطر میلگردهای SMA نشان داده شده است. با توجه به نمودار پارامتریک زیر مشاهده می‌شود، با افزایش قطر میلگرد SMA مقاومت دیوار و جذب برش پایه افزایش پیدا می‌کند به طوری که مدل با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر ۳۶٪ مقاومت بیشتری نسبت به مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی‌متر دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش قطر میلگرد تغییر شکل ماندگار دیوار افزایش می‌یابد. به طوری که تغییر شکل ماندگار در مدل با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر تقریباً ۵ برابر مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است قرار دادن میلگرد SMA با قطر بیش از ۱۶ میلی‌متر باعث به وجود آمدن درصد آرماتور بیش از حد در نواحی مرزی و مقاومت نیرویی بالا در نواحی شامل میلگرد SMA می‌شود و دیوار تغییر شکل‌های ماندگار بزرگی را از خود بر جای می‌گذارد که نشان دهنده به وجود آمدن خرابی در نواحی مرزی شامل میلگردهای فولادی (قسمت فوقانی نواحی مرزی) می‌باشد. بنابراین استفاده از میلگرد SMA با قطر بیش از ۱۶ میلی‌متر برای این مدل مناسب نیست.

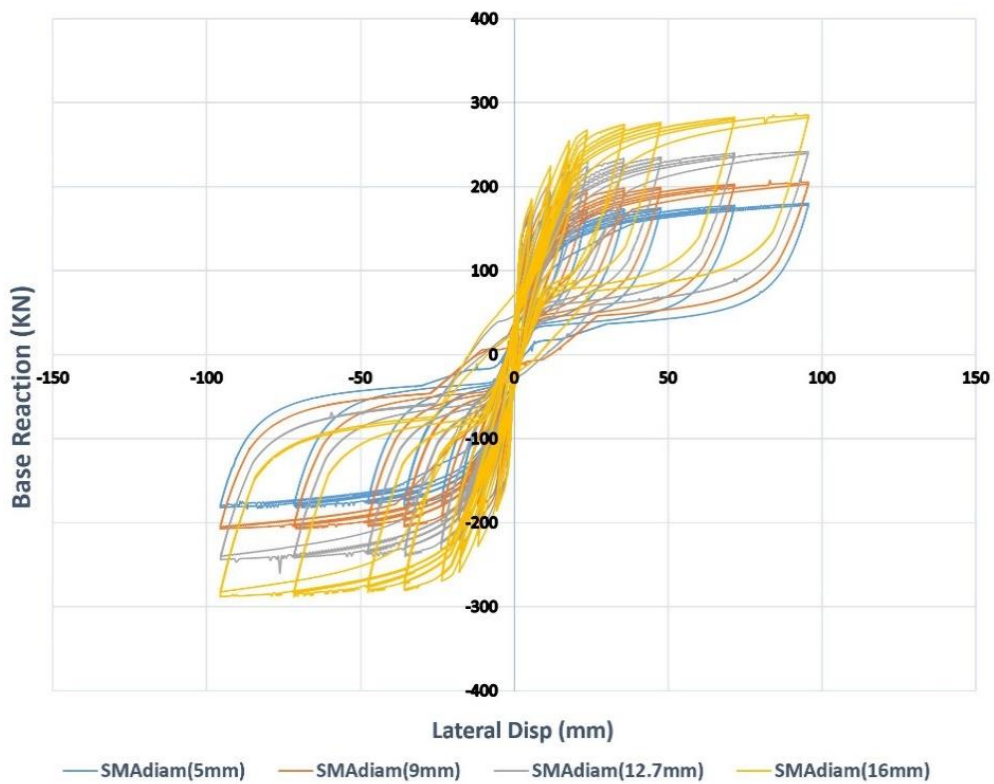
در شکل ۹ نمودارهای برش پایه-جاب‌جایی جانبی مربوط به تحلیل چرخه‌ای دیوار NR-W2 به دست آمده از مقادیر متفاوت نیروی محوری وارد بر دیوار نشان داده شده است. با توجه به نمودار پارامتریک شکل ۹ در ابتدا مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی محوری بر روی دیوار برشی، مقاومت و نیروی برش پایه دیوار افزایش می‌یابد ولی دو مدل با پارامتر ۰.۱۵AgFc و ۰.۲AgFc که تحت نیروی محوری بیشتری قرار گرفته‌اند، قبل از رسیدن به سیکل آخر تحلیل چرخه‌ای به واگرایی می‌رسند. در نتیجه شکل‌پذیری دیوار برشی با افزایش نیروی محوری کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه-جاب‌جایی جانبی دیوار NR-W2 در اثر مقادیر متفاوت عرض نواحی مرزی نشان داده شده است. با توجه به نمودار پارامتریک زیر مشاهده می‌شود با افزایش عرض نواحی مرزی دیوار برشی تغییر شکل‌های ماندگار به مراتب کاهش می‌یابد به طوری که مدل با عرض ناحیه مرزی ۲۵۰ میلی‌متر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۵۰ میلی‌متر، ۵۶٪ تغییر شکل ماندگار کمتری از خود بر جای می‌گذارد.



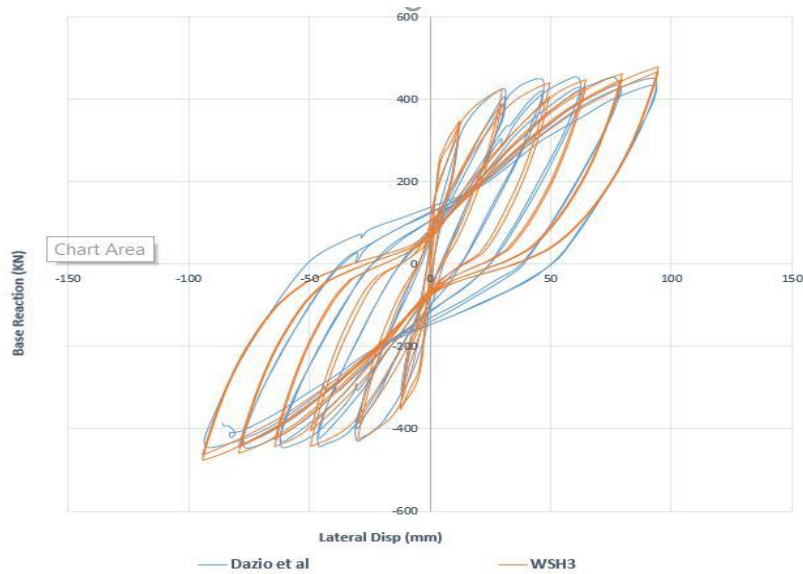
شکل ۱۰. نمودارهای چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوار W2-NR در اثر مقادیر متفاوت عرض نواحی مرزی

Fig. 10. Cyclic diagrams of base shear - lateral displacement of wall W2-NR due to different width values of border areas



شکل ۱۱. نمودارهای چرخه‌ای برش پایه جابه‌جایی بالای دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف قطر میلگردهای SMA

Fig. 11. Cyclic diagrams of base shear - top displacement of W2-NR wall under different diameter values of SMA rebars



۱۲. نمودار چرخه‌ای مربوط به برش پایه - جابه‌جایی جانبی بالاترین تراز دیوار WSH3

Fig. 12. Cyclic diagram related to base shear - lateral displacement of the highest level of WSH3 wall

جدول ۱۴. مقادیر دریفت هر گام از تحلیل چرخه‌ای مدل WSH3

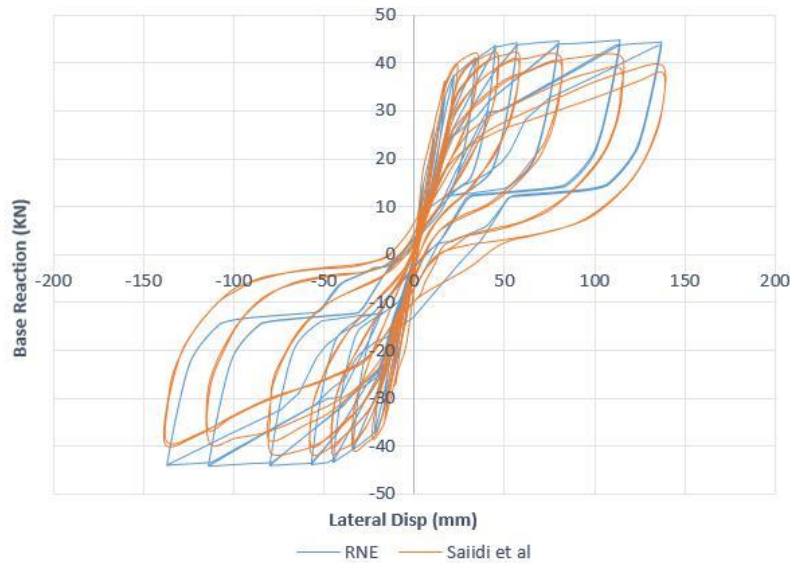
Table 14. Drift values of each step of cyclic analysis of WSH3 model

گام تحلیل	۱-۳۶۰	۳۶۰-۱۲۲۰	۱۲۲۰-۲۶۶۲	۲۶۶۰-۴۵۳۰	۴۵۳۰-۶۸۳۰	۶۸۳۰-۹۷۱۰
مقادیر دریفت (%)	۰/۲۵	۰/۶	۱	۱/۳	۱/۶	۲

در شکل ۱۴ شماتیک مدل نرم‌افزاری دیوار ترکیبی نوآورانه آورده شده است. المان‌های قرمز در شکل ۱۴ نشان دهنده ستونک‌های RNE و محل قرارگیری آن‌ها می‌باشد. در شکل ۱۵ ستونک RNE و نحوه اتصال آن نشان داده شده است. در شکل ۱۶ نمودار چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE تحت پارامترهای متغیر ارتفاع ستونک‌های پایه (متصل کننده دیوار به فونداسیون زیرین) آورده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود، قرارگیری ستونک RNE در نواحی بحرانی دیوار برشی، تغییر شکل ماندگار را به کمترین حد کاهش می‌دهد و باعث رفتار مرکزگرا در دیوار برشی می‌شود.

در شکل ۱۲ نمودار چرخه‌ای مربوط به برش پایه - جابه‌جایی جانبی بالای دیوار WSH3 مدل شده در نرم‌افزار و نمودار چرخه‌ای به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی دازیو و همکاران [۸] جهت صحت‌سنجی آورده شده است. نحوه بارگذاری چرخه‌ای مدل WSH3 طبق پروتکل پیشنهادی پارک [۱۹] انجام شده است. در جدول ۱۴ مقادیر دریفت هر گام از تحلیل چرخه‌ای آورده شده است.

در شکل ۱۳ نمودار صحت‌سنجی ستون RNE شامل مصالح بتنی ECC و میلگردهای SMA آورده شده و با ستون مطالعه شده توسط سعیدی و همکاران [۴] صحت‌سنجی شده است. نحوه بارگذاری چرخه‌ای مدل RNE طبق پروتکل پیشنهادی سعیدی و همکاران [۷] انجام شده است. در جدول ۱۵ مقادیر دریفت هر گام از تحلیل چرخه‌ای آورده شده است.



شکل ۱۳. نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی ستون RNE

Fig. 13. Cyclic diagram of base shear - lateral displacement of RNE column

جدول ۱۵. مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه‌ای مدل RNE

Table 15. Drift values of each step of RNE model cyclic analysis

گام تحلیل	۱-۳۵۱	۳۵۱-	۷۰۲-	۱۰۵۵-	۱۴۱۵-	۲۱۲۰-	۲۸۳۲-	۳۵۱۵-	۴۹۶۰-	۷۰۲۵-
مقادیر دریافت (%)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۳	۴	۵	۷	۱۰	۱۲

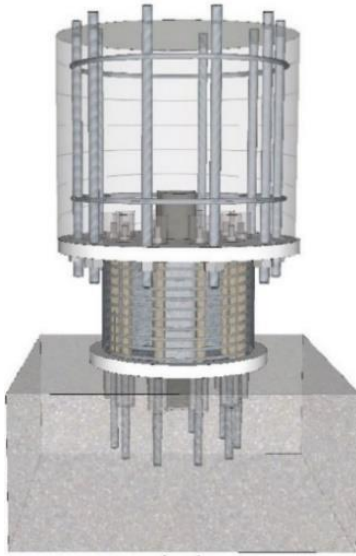
با توجه به جدول فوق مشاهده می‌شود، مقدار جذب انرژی مدل W2- NR ۶۳ درصد مدل SR-W1 می‌باشد. بنابراین استفاده از میلگرد SMA در دیوار برشی باعث کاهش جذب انرژی در دیوار می‌شود. دلیل این کاهش جذب انرژی از نمودار چرخه‌ای هم قابل مشاهده و پیش‌بینی می‌باشد. زیرا رفتار مرکزگرا در دیوار برشی NR-W2 باعث کاهش سطح زیر نمودار چرخه‌ای می‌شود و سطح زیر نمودار چرخه‌ای هم نشان دهنده جذب انرژی است.

افزایش نیروی محوری باعث افزایش جذب انرژی در دیوار برشی می‌شود به طوری که مدل با نیروی محوری (۰,۲AgFc)N دارای ۲۷ درصد جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با نیروی محوری (۰,۰۷AgFc)N است.

۳-۲- محاسبه پارامتر انرژی جذب شده در تحلیل چرخه‌ای جهت محاسبه انرژی جذب شده یا به عبارت دیگر انرژی تلف شده توسط دیوار در طول بارگذاری چرخه‌ای می‌توان از نرم افزارهای جانبی مانند متلب یا اکسل بهره برد. بدین منظور با داشتن مقادیر عددی برش پایه و جابه‌جایی جانبی در هر گام از طریق رابطه زیر مقدار کل انرژی تلف شده را محاسبه نمود [۲۱]. در جدول ۱۶ و ۱۷ انرژی تلف شده تمامی مدل‌ها در طول تحلیل چرخه‌ای آورده شده است.

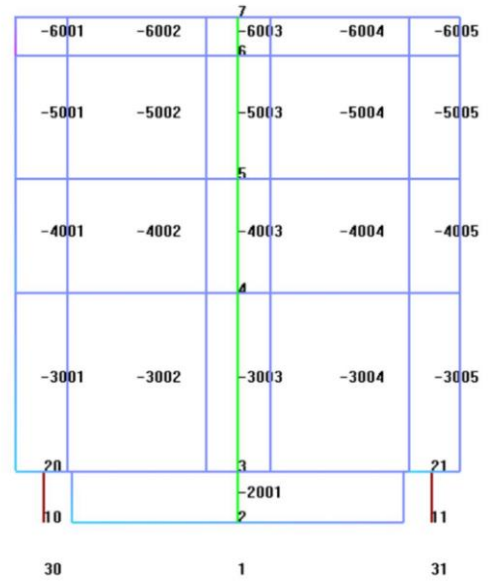
رابطه ۱: انرژی کل تلف شده در طول تحلیل چرخه‌ای

$$E_{total} = \sum (P_i + P_{i+1}) (\Delta i + 1 - \Delta i) / 2 \quad (1)$$



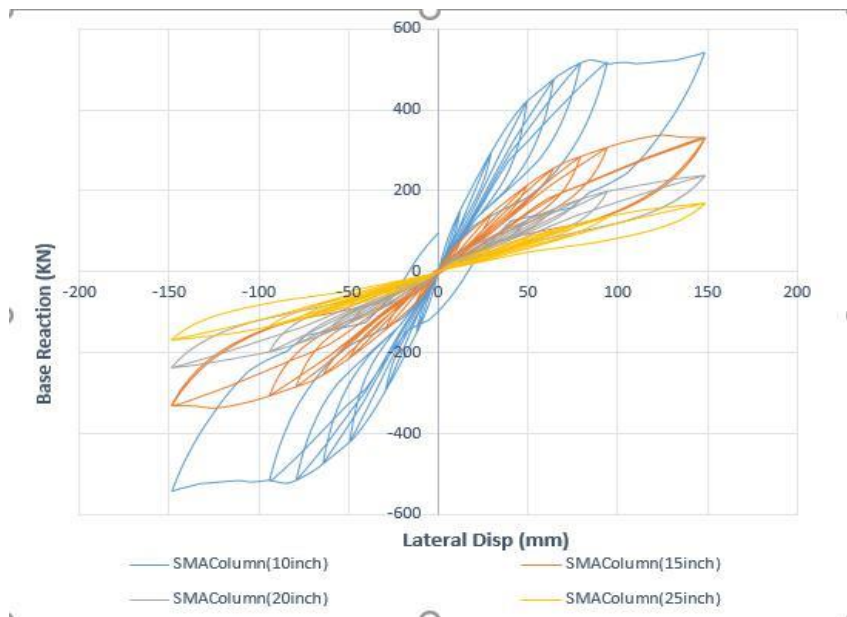
شکل ۱۵. ستونک RNE و نحوه اتصال آن [۲۰]

Fig. 15. RNE column and connecting details [20]



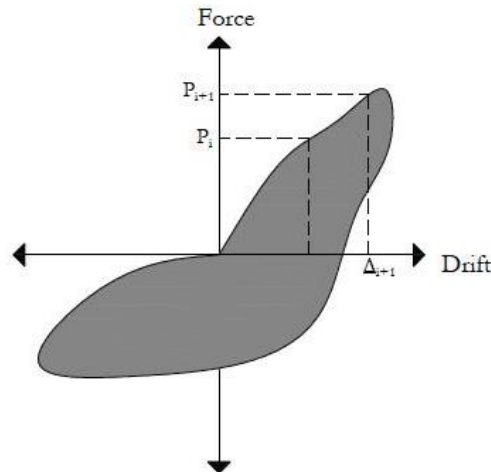
شکل ۱۴. شماتیک مدل نرم افزاری دیوار ترکیبی نوآورانه

Fig. 14. Schematic of the software model of the innovative composite wall



شکل ۱۶. نمودار چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستون‌های RNE

Fig. 16. Cyclic diagram of the combined model of WSH3 wall with RNE columns



شکل ۱۷. دیاگرام محاسبه انرژی تلف شده در طی تحلیل‌های چرخه‌ای [۲۱]

Fig. 17. Energy Dissipation Determination Diagram

جدول ۱۶. مقادیر انرژی تلف شده مدل‌های مختلف دیوار W1-SR و W2-NR تا دررفت ۴ درصد

Table 16. Values of wasted energy of different wall models W1-SR and W2-NR up to 4% drift

انرژی تلف شده در طول تحلیل چرخه‌ای (kN.mm)	نام اختصاری مدل
۱۸۸۷۵۶/۶۰۹	W1-SR
۱۱۹۳۳۳/۳۷۶۲	W2-NR
۹۹۹۷۷/۹۷۱۶۹	N(0.07AgFc)
۱۱۴۱۰۸/۹۹۲	N(0.15AgFc)
۱۲۷۵۳۴/۸۷۵۲	N(0.2AgFc)
۱۲۷۵۲۷/۵۳۱۶	BoundWidth(100mm)
۱۲۹۳۵۶/۶۶۴۸	BoundWidth(150mm)
۱۰۷۳۱۹/۶۳۱۳	BoundWidth(250mm)
۱۰۵۲۴۱/۹۳۲۵	SMAdiam(5mm)
۱۱۰۶۰۶/۶۳۶۸	SMAdiam(9mm)
۱۳۱۹۶۱/۱۷۴۳	SMAdiam(16mm)

با توجه به جدول ۱۷ مشاهده می‌شود استفاده از ستونک RNE در دیوار برشی جذب انرژی را ۶۵٪ کاهش می‌دهد که دلیل این کاهش جذب انرژی را می‌توان در مرکزگرایی و سختی بالای دیوار برشی نوآورانه جستجو کرد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع ستونک RNE جذب انرژی کاهش می‌یابد به طوری که جذب انرژی در مدل با ارتفاع ستونک ۲۵ اینچ تقریباً ۱۰٪ جذب انرژی در مدل با ارتفاع ستونک با ارتفاع ۱۰ اینچ می‌باشد.

افزایش عرض نواحی مرزی دیوار برشی با کاهش جذب انرژی همراه است به طوری که مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۰۰ میلی‌متر دارای ۱۹ درصد جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۲۵۰ میلی‌متر است. افزایش قطر میلگردهای SMA یا افزایش درصد آرماتور SMA در نواحی مرزی دیوار برشی با افزایش جذب انرژی همراه است به طوری که مدل با آرماتور به قطر ۱۶ میلی‌متر دارای ۲۵ درصد جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با آرماتور به قطر ۵ میلی‌متر است.



جدول ۱۷. مقادیر انرژی تلف شده مدل‌های مختلف دیوار WSH3 به همراه ستونک های RNE تا دریفت ۲ درصد

Table 17. Amounts of wasted energy of different WSH3 wall models along with RNE columns up to 2% drift

نام اختصاری مدل	انرژی تلف شده در طول تحلیل چرخه‌ای (kN.mm)
WSH3	۲۵۲۹۴۹/۱۳۱
SMAColumn(10inch)	۸۸۲۱۴/۱۶
SMAColumn(15inch)	۳۴۷۹۷/۵۹۳۶
SMAColumn(20inch)	۱۷۷۳۷/۷۳۴۴
SMAColumn(25inch)	۸۵۲۹/۹۳

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج کسب شده از خروجی‌های به دست آمده در طی تحلیل‌های چرخه‌ای در این تحقیق به قرار زیر می‌باشند.

۱- استفاده از میلگرد SMA در نواحی مرزی دیوار برشی تاثیر بسیار زیادی در کاهش تغییر شکل‌های ماندگار و خاصیت مرکزگرایی دیوار برشی دارد. با استفاده از میلگرد SMA در مدل NR-W2 تغییر شکل‌های ماندگار بیش از ۸۰٪ نسبت به مدل SR-W1 کاهش پیدا کرد.

۲- مقدار جذب انرژی در مدل NR-W2، ۳۷٪ کمتر از مدل SR-W1 می‌باشد. بنابراین استفاده از میلگرد SMA در دیوار برشی باعث کاهش جذب انرژی در دیوار می‌شود.

۳- با افزایش عرض نواحی مرزی دیوار برشی تغییر شکل‌های ماندگار به مراتب کاهش می‌یابد به طوری که مدل با عرض ناحیه مرزی ۲۵۰ میلی‌متر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۵۰ میلی‌متر، ۵۶٪ تغییر شکل ماندگار کمتری از خود بر جای می‌گذارد.

۴- با افزایش قطر میلگرد SMA مقاومت دیوار و جذب برش پایه افزایش پیدا می‌کند به طوری که مدل با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر ۳۶٪ مقاومت بیشتری نسبت به مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی‌متر دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش قطر میلگرد تغییر شکل ماندگار دیوار افزایش می‌یابد. به طوری که تغییر شکل ماندگار در مدل با میلگرد به قطر ۱۶

میلی‌متر تقریباً ۵ برابر مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی‌متر می‌باشد. دلیل افزایش مقاومت با بیشتر شدن قطر آرماتورهای SMA را می‌توان در افزایش سطح مقطع آرماتور و در نتیجه افزایش در نیرو یا مقاومت باربرداری و سختی آرماتورهای SMA پیدا کرد. همچنین افزایش قطر آرماتورهای SMA با کاهش میزان شکل‌پذیری و کاهش خاصیت مرکزگرایی یا Self-Centering در نمودارهای چرخه‌ای همراه است.

۵- در مورد مدل ترکیبی دیوار و ستونک‌های RNE، با توجه به نمودارها و جداول به دست آمده می‌توان بیان نمود ترکیب ستونک RNE تاثیر بسزایی در کاهش تغییر شکل‌های ماندگار دیوار WSH3 دارد و هر چه طول قائم ستونک‌های مرزی دیوار افزایش پیدا کند، سختی و مقاومت کلی دیوار کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه ستون‌های کوتاه دارای سختی بالاتری نسبت به ستون‌های دیگر می‌باشند میزان جذب نیرو و انرژی تلف شده بالاتر در مدل‌هایی با ستونک‌های کوتاه‌تر (۱۰ اینچ) اتفاق می‌افتد.

۶- در این تحقیق کمترین طولی که برای ستونک RNE در نظر گرفته شد مقدار ۱۰ اینچ بود زیرا مقادیر کمتر از ۱۰ اینچ برای ستونک RNE باعث افزایش بیش از اندازه سختی دیوار برشی شده و مدل زودتر از انتظار به واگرایی می‌رسد. بنابراین با توجه به جذب انرژی مناسب و رفتار مرکزگرایی عالی، به نظر می‌رسد ارتفاع ۱۰ اینچ برای ستونک RNE مناسب‌ترین ارتفاع برای قرارگیری در مدل دیوار برشی نوآورانه می‌باشد.

- Canadian Journal of Civil Engineering, 34(9) (2007) 1029-1037.
- [12] B. Wang, S. Zhu, Seismic behavior of self-centering reinforced concrete wall enabled by superelastic shape memory alloy bars, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(1) (2018) 479-502.
- [13] M. Tazarv, M. Saiid Saiidi, Reinforcing NiTi superelastic SMA for concrete structures, *Journal of Structural Engineering*, 141(8) (2015) 04014197.
- [14] P. Code, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, (2005).
- [15] V.C. Li, On engineered cementitious composites (ECC), *Journal of advanced concrete technology*, 1(3) (2003) 215-230.
- [16] R. Mayes, I. Friedland, Recommended Lrfd Guidelines For The Seismic Design Of Highway Bridges, in: Third National Seismic Conference and Workshop on Bridges and Highways: Advances in Engineering and Technology for the Seismic Safety of Bridges in the New Millennium Federal Highway Administration; Oregon, Washington State, California Departments of Transportation; Mid America Earthquake Center; Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research; Pacific Earthquake Engineering Research Center; and TRB, 2002.
- [17] J. McCormick, J. Tyber, R. DesRoches, K. Gall, H.J. Maier, Structural engineering with NiTi. II: mechanical behavior and scaling, *Journal of Engineering Mechanics*, 133(9) (2007) 1019-1029.
- [18] R. DesRoches, J. McCormick, M. Delemont3, Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars, *Journal of Structural Engineering*, 130(1) (2004) 38-46.
- [19] R. Park, Ductility evaluation from laboratory and analytical testing, in: Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988, pp. 605-616.
- [20] S. Varela, A bridge column with superelastic NiTi SMA
- [1] T. Paulay, M.N. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, (1992).
- [2] K. Pilakoutas, A. Elnashai, Cyclic behavior of reinforced concrete cantilever walls, Part I: Experimental results, *ACI Structural Journal*, 92(3) (1995) 271-281
- [3] M. Fintel, M. Fintel, Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years, *PCI journal*, 40(3) (1995) 62-80.
- [4] M.S. Saiidi, M. O'Brien, M. Sadrossadat-Zadeh, Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete, *ACI Structural Journal*, 106(1) (2009).
- [5] X. Lu, Y. Mao, Y. Chen, J. Liu, Y. Zhou, New structural system for earthquake resilient design, *Journal of Earthquake and tsunami*, 7(03) (2013) 1350013.
- [6] A. Abdulridha, D. Palermo, Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall, *Engineering Structures*, 147 (2017) 77-89.
- [7] L. Cortés-Puentes, M. Zaidi, D. Palermo, E. Dragomirescu, Cyclic loading testing of repaired SMA and steel reinforced concrete shear walls, *Engineering Structures*, 168 (2018) 128-141.
- [8] A. Dazio, K. Beyer, H. Bachmann, Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls, *Engineering Structures*, 31(7) (2009) 1556-1571.
- [9] K. Kolozvari, T.A. Tran, K. Orakcal, J.W. Wallace, Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation, *Journal of Structural Engineering*, 141(5) (2015) 04014136.
- [10] X. Lu, L. Xie, H. Guan, Y. Huang, X. Lu, A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees, *Finite Elements in Analysis and Design*, 98 (2015) 14-25.
- [11] F. Bartlett, Canadian Standards Association standard A23. 3-04 resistance factor for concrete in compression,

[21] E.J. Lumpkin, Enhanced seismic performance of multi-story special concentrically brace frames using a balanced design procedure, University of Washington, 2009.

and replaceable rubber hinge for earthquake damage mitigation, *Smart Materials and Structures*, 25(7) (2016) 075012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*J. Hosseini, F. Basaligeh, J. Shafaei, Seismic Performance of a New Self-Centering Repairable RC Shear Wall, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 201-224.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.20769.7524



