

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران

معرفی و ارزیابی لرزه‌ای یک نوع دیوار برشی مرکز‌گرای جدید با قابلیت تعمیر پس از زلزله

نگارنده: سید جعفر حسینی

استاد راهنما

دکتر فرنوش باسلیقه

استاد مشاور

دکتر جلیل شفائی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۱۷۲-۱۴۰۷

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید جعفر حسینی با شماره دانشجویی ۹۶۳۲۴۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان معرفی و ارزیابی لرزه ای یک نوع دیوار برشی مرکزگرا با قابلیت تعمیر پس از زلزله که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐	ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹ ☒
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷ ☐	د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐	
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	جناب آقای دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-		
۳- استاد مشاور	جناب آقای دکتر جلیل شفاei	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	جناب آقای دکتر میثم جلالی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	جناب آقای دکتر فرشید جندقی علانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	جناب آقای دکتر محمد شامخی امیری	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ:

آنان کہ وجودم برایشان ہمہ رخ بود و وجودشان برایم ہمہ مرا، توانشان رفت تا بہ توانایی برسم و مویشانشان سپید کشت تا رویم سپید بماند...

آنان کہ فروغ نگاہشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایہ ہی جاودان زندگی من است...

آنان کہ راستی قائم در سنگتکی قائمان تجلی یافت...

در برابر وجود کرامیشان زانوی ادب بر زمین می نیم و بادی ملو از عشق و محبت و خضوع بردستان بوسہ می زنم.

وجودتان ہمیشہ سبز و استوار...

شکر و قدردانی:

حال که به لطف خداوند متعال مراحل این پیمان نامه روبه اتمام نهاده، لازم می‌دانم از کلیه عزیزانی که در مسیر سودن این راه ایجاب ریاری نموده‌اند مراتب قدردانی خالصانه را داشته باشم.

ابتداء بر خود لازم می‌دانم تا از پشتیبانی و راه‌پیمایی‌های صبورانه اساتید فرهیخته جناب آقای دکتر فرناوش باسلویه و دکتر جلیل شغالی که راه‌پیمایی این پیمان نامه را برهمه داشته‌اند شکر ویژه‌ای داشته باشم. بی‌شک انجام این

تحقیق مدیون حمایت و پشتیبانی‌های این عزیزان است.

پنجین از دوستان عزیزم دکتر علی هروی، مهندس مسلم حلدی و مهندس رضایزدی ثرا که در مراحل مختلف این پیمان نامه ریاری نموده‌اند پاسکزارم و موفقیت این عزیزان را در مراحل مختلف زندگی ازینرو

متان خواستارم.

در پیمان از تمامی عزیزانی که به اشکال مختلف در طول مدت انجام این تحقیق ریاری رسانند شکر و قدردانی می‌نمایم.

سید جعفر حسینی

مهر ۱۴۰۰

تعهد نامه

اینجانب سید جعفر حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه، معرفی و ارزیابی لرزه ای یک نوع دیوار برشی مرکز گرای جدید با قابلیت تعمیر پس از زلزله تحت راهنمایی دکتر فرنوش باسلیقه و دکتر جلیل شفائی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

تغییر شکل‌های ماندگار بعد از وقوع زلزله باعث افزایش هزینه‌های مقاوم‌سازی و حتی اجرایی شدن طرح بهسازی می‌گردد. یکی از روش‌های کنترل غیرفعال برای کنترل نیروهای جانبی وارده 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 مایکروفاйبر 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 ثقلی 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.

کلمات کلیدی: دیوار برشی بتنی، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، جابه‌جایی پسماند، رفتار مرکزگرا، تحلیل چرخه‌ای

فهرست مطالب

چکیده.....	أ
فهرست جدول‌ها.....	ك
فهرست شکل‌ها.....	ن

فصل ۱ کلیات	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تعریف مسئله.....	۳
۳-۱- هدف پژوهش.....	۴
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۴
۵-۱- روش تحقیق.....	۵
۶-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۶

فصل ۲ ادبیات فنی	۷
۱-۱- آلیاژ حافظه‌دار شکلی.....	۸
۲-۱-۱- ساختار کریستالی.....	۸
۲-۱-۲- تأثیر دما در تبدیل فاز.....	۹
۳-۱-۲- خصوصیات ویژه.....	۱۱
۴-۱-۲- پیچیدگی‌های رفتاری.....	۱۲
۲-۲- انواع آلیاژهای حافظه‌دار شکلی.....	۱۵
۱-۲-۲- آلیاژهای نیکل-تیتانیوم.....	۱۵
۲-۲-۲- آلیاژهای بر پایه مس.....	۱۷
۳-۲- کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های کنترل غیرفعال.....	۱۸

۴-۲- پژوهش پیشینیان ۱۹

فصل ۳ روش اجرای تحقیق ۲۹

۳-۱- بررسی نرم افزار اجزای محدود OpenSEES	۳۰
۳-۱-۱- مزایای نرم افزار اجزای محدود OpenSEES	۳۰
۳-۱-۲- معرفی کوتاهی بر زبان برنامه نویسی Tcl /Tk	۳۱
۳-۱-۳- خصوصیات مصالح در نرم افزار OpenSEES	۳۲
۳-۱-۴- خصوصیات المان ها در نرم افزار OpenSEES	۳۳
۳-۲- مدل سازی دیوار برشی بتن مسلح در نرم افزار OpenSEES	۳۴
۳-۲-۱- مدل سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان ستون معادل	۳۴
۳-۲-۲- مدل سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان های چهارگوشه ای	۳۵
۳-۲-۳- مدل سازی دیوار برشی بتنی توسط المان های صفحه ای لایه لایه	۳۶
۳-۲-۴- مدل سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان های قائم چندتایی	۳۸
۳-۳- مشخصات مدل های اعتبارسنجی مورد مطالعه	۳۹
۳-۳-۱- مدل اعتبارسنجی اول	۴۰
۳-۳-۱-۱- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی W1-SR و W2-NR	۴۸
۳-۳-۱-۲- مدل اعتبارسنجی دوم و سوم	۴۸
۳-۳-۱-۳- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی WSH3	۵۱
۳-۳-۱-۴- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی RNE	۵۴
۳-۳-۲- معرفی مصالح Self Centering مدل کننده SMA در نرم افزار	۵۴
۳-۳-۳- معرفی مشخصات مصالح بتنی در نرم افزار	۵۶
۴-۳- پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق	۶۴

- ۱-۴- معرفی مدل‌ها و پارامترهای مورد بررسی ۶۸
- ۱-۱-۴- معرفی مدل‌های اعتبارسنجی ۶۸
- ۲-۱-۴- معرفی پارامترهای مورد بررسی ۶۸
- ۲-۴- معرفی خروجی‌ها ۷۱
- ۱-۲-۴- اعتبارسنجی دیوارهای W1-SR و W2-NR ۷۱
- ۲-۲-۴- خروجی برش پایه-جابه‌جایی دیوار W2-NR تحت پارامتر نیروی ثقلی ۷۳
- ۳-۲-۴- خروجی برش پایه-جابه‌جایی دیوار W2-NR تحت پارامتر عرض نواحی مرزی ۷۴
- ۴-۲-۴- خروجی برش پایه-جابه‌جایی دیوار W2-NR تحت پارامتر قطر میلگردهای SMA ۷۴
- ۵-۲-۴- اعتبارسنجی دیوار WSH3 ۷۵
- ۶-۲-۴- اعتبارسنجی ستونک RNE ۷۷
- ۷-۲-۴- خروجی برش پایه-جابه‌جایی جانبی مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های پایه RNE تحت پارامتر متغییر ارتفاع ستونک‌ها ۷۷
- ۳-۴- خروجی مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ۷۹
- ۱-۳-۴- مقاومت تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W1-SR و W2-NR ۷۹
- ۲-۳-۴- مقاومت تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر نیروی ثقلی ۸۱
- ۳-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر عرض نواحی مرزی .. ۸۳
- ۴-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر قطر میلگرد SMA . ۸۵
- ۵-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار WSH3 ۸۷
- ۶-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون RNE ۸۷
- ۷-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های مرزی RNE ۸۸

۴-۴- محاسبه پارامتر انرژی جذب شده در تحلیل چرخه‌ای ۹۱

فصل ۵	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۹۵
-------	------------------------	----

۵-۱- مقدمه ۹۶

۵-۲- نتیجه‌گیری ۹۷

۵-۳- پیشنهادات ۹۹

مراجع ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ ساختار و نحوه تبدیل کریستال‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به یکدیگر ۹
- شکل ۲-۲ تأثیر دما در کرنش پسماند حالت آستنیت و مارتنزیت ۱۰
- شکل ۳-۲ رفتار ویژه آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت آستنیت و مارتنزیت ۱۲
- شکل ۴-۲ منحنی تنش - کرنش سیم آستنیت در کشش برای دماهای مختلف ۱۳
- شکل ۵-۲ نمودار تنش-کرنش سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۱۳
- شکل ۶-۲ نمودار تنش-کرنش در چرخه‌های مختلف ۱۴
- شکل ۷-۲ اثر فرکانس بارگذاری بر روی رفتار سیم آستنیت پیش‌تنیده ۱۵
- شکل ۸-۲ پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی با فرکانس ۰/۰۲۵ هرتز ۲۱
- شکل ۹-۲ مقایسه تنش بارگذاری، تنش باربرداری و کرنش پسماند برای آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۲۲
- شکل ۱۰-۲ دریافت ماندگار نمونه‌ها تحت تحلیل چرخه‌ای ۲۳
- شکل ۱۱-۲ مدل سازنده نمودار چرخه‌ای مصالح SMA ۲۴
- شکل ۱۲-۲ نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی ۲۶
- شکل ۱-۳ مدل‌سازی دیوار برشی توسط المان‌های چهارگوشه و المان‌های تیر- ستون غیرخطی ۳۶
- شکل ۲-۳ مدل‌سازی دیوار برشی بتن مسلح به صورت لایه‌ای در نرم‌افزار OpenSEES ۳۷
- شکل ۳-۳ مدل‌سازی دیوار برشی بتنی به روش SFI-MVLEM ۳۹
- شکل ۴-۳ مقطع طولی و عرضی دیوار برشی W1-SR ۴۲
- شکل ۵-۳ وصله مکانیکی اتصال دهنده میلگردهای SMA و میلگردهای فولادی M15 ۴۶
- شکل ۶-۳ جزئیات آرماتور گذاری در دیوار W2-NR ۴۷
- شکل ۷-۳ مقایسه پاسخ چرخه‌ای تنش - کرنش مصالح SMA و فولاد شکل‌پذیر ۴۷

- ۵۰ شکل ۳-۸ مقطع عرضی دیوار برشی با جزئیات میلگرد گذاری
- ۵۱ شکل ۳-۹ نمای روبرو و جانبی دیوار برشی WSH3
- ۵۳ شکل ۳-۱۰ جزئیات محل مفصل پلاستیک مدل RNE
- ۵۵ شکل ۳-۱۱ نمودار چرخه‌ای مصالح شبه پرچمی Self Centering در نرم افزار OpenSEES
- ۵۷ شکل ۳-۱۲ منحنی رفتاری مصالح ECC01
- ۵۹ شکل ۳-۱۳ شکل رفتاری ConcreteCM
- ۵۹ شکل ۳-۱۴ مقایسه نمودار تنش - کرنش برای بتن محصور و غیرمحصور
- ۶۱ شکل ۳-۱۵ مکانیزم محصورشدگی در مقاطع بتنی دایروی و مستطیلی
- ۶۹ شکل ۴-۱ نواحی مرزی در محدوده تقریبی محل تشکیل مفاصل پلاستیک
- ۷۲ شکل ۴-۲ شماتیک مدل نرم افزاری دیوارهای W1-SR و W2-NR
- ۷۲ شکل ۴-۳ نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوار تحت بار ثقیلی 0.1AgFc
- ۷۳ شکل ۴-۴ نمودارهای چرخه‌ای دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف نیروی ثقیلی
- ۷۴ شکل ۴-۵ نمودارهای چرخه‌ای دیوار W2-NR در اثر مقادیر متفاوت عرض نواحی مرزی
- ۷۵ شکل ۴-۶ نمودارهای چرخه‌ای دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف قطر میلگردهای SMA
- ۷۶ شکل ۴-۷ شماتیک مدل نرم افزاری دیوار WSH3
- ۷۷ شکل ۴-۸ نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی ستونک RNE
- ۷۸ شکل ۴-۹ شماتیک مدل نرم افزاری دیوار ترکیبی نوآورانه
- ۷۸ شکل ۴-۱۰ ستونک RNE و نحوه اتصال آن
- ۷۹ شکل ۴-۱۱ نمودار چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونهای RNE
- ۸۰ شکل ۴-۱۲ نمودارهای چرخه‌ای دوخطی شده دیوارهای W1-SR و W2-NR

- ۸۲ شکل ۴-۱۳ نمودار دوخطی دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقلی وارد بر دیوار
- ۸۴ شکل ۴-۱۴ نمودار دوخطی دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر عرض ناحیه مرزی
- ۸۶ شکل ۴-۱۵ نمودار دوخطی شده دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگرد SMA
- ۸۷ شکل ۴-۱۶ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده دیوار WSH3
- ۸۸ شکل ۴-۱۷ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده ستون RNE
- ۹۰ شکل ۴-۱۸ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE
- ۹۱ شکل ۴-۱۹ دیاگرام محاسبه انرژی تلف شده در طی تحلیل‌های چرخه‌ای

فهرست جدول‌ها

۱۱	جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی و دماهای تبدیل آلیاژ حافظه‌دار شکلی
۱۶	جدول ۲-۲ خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار شکل NiTi
۱۶	جدول ۳-۲ مقایسه خصوصیات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی NiTi با فولاد ساختمانی مرسوم
۱۸	جدول ۴-۲ مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه مس
۲۷	جدول ۵-۲ پارامترهای پاسخ پیش‌بینی شده دیوارها
۴۱	جدول ۱-۳ مشخصات میلگردهای فولادی 10M
۴۴	جدول ۲-۳ مشخصات میلگردهای فولادی M15
۴۸	جدول ۳-۳ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای مدل W1-SR و W2-NR
۵۰	جدول ۴-۳ مشخصات میلگردهای فولادی
۵۱	جدول ۵-۳ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه‌ای مدل WSH3
۵۴	جدول ۶-۳ مشخصات میلگردهای فولادی M15 و SMA
۵۴	جدول ۷-۳ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه‌ای مدل RNE
۵۵	جدول ۸-۳ پارامترهای عددی مصالح Self Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA
۵۷	جدول ۹-۳ مشخصات بتن غیر محصور استفاده شده در دیوارهای W1-SR و W2-NR
۶۳	جدول ۱۰-۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار W1-SR
۶۳	جدول ۱۱-۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار W2-NR
۶۴	جدول ۱۲-۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار WSH3
۶۴	جدول ۱۳-۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن و ECC محصورشده ستون RNE
۶۵	جدول ۱۴-۳ معرفی پارامترهای متغیر و مقادیر هر پارامتر

- ۶۵ جدول ۳-۱۵ مقادیر درصد آرماتور متناظر با قطر میلگردهای SMA
- ۶۸ جدول ۴-۱ مدل‌های اعتبارسنجی
- ۶۹ جدول ۴-۲ پارامتر نیروی ثقلی محوری وارد بر دیوار برشی W2-NR
- ۷۰ جدول ۴-۳ پارامتر میزان عرض نواحی مرزی دیوار W2-NR
- ۷۰ جدول ۴-۴ پارامتر میزان قطر میلگردهای SMA دیوار W2-NR
- ۷۱ جدول ۴-۵ پارامتر میزان ارتفاع ستونک‌های دیوار برشی دیوار WSH3
- ۸۰ جدول ۴-۶ پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوارهای W1-SR و W2-NR
- ۸۲ جدول ۴-۷ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقلی
- ۸۴ جدول ۴-۸ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف عرض ناحیه مرزی
- ۸۶ جدول ۴-۹ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگرد SMA
- ۸۷ جدول ۴-۱۰ مقاومت تسلیم، سختی اولیه و مقدار شکل‌پذیری دیوار WSH3
- ۸۸ جدول ۴-۱۱ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون RNE
- ۹۰ جدول ۴-۱۲ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل نوآورانه تحت مقادیر مختلف ارتفاع ستونک‌ها
- ۹۱ جدول ۴-۱۳ مقادیر انرژی تلف شده مدل‌های مختلف دیوار W1-SR و W2-NR تا دررفت ۴ درصد
- ۹۳ جدول ۴-۱۴ مقادیر انرژی تلف شده مدل‌های مختلف مدل نوآورانه تا دررفت ۲ درصد

فصل ۱ کلیات

امروزه باتوجه به هزینه‌ی بالای ساخت‌وساز، اگر طراحی سازه‌ها به گونه‌ای باشد که در مقابل زلزله‌های شدید رفتار کاملاً کشسان داشته باشد و اصلاً وارد ناحیه خطی نشود، اجرای این نوع سازه‌ها اصلاً مقرون به صرفه نمی‌باشد؛ لذا 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 باید رفتار کشسان داشته باشند، کاهش یافته و سازه از آسیب‌های جدی در امان بماند.

دیوار برشی یکی از سیستم‌های کنترل غیر فعال سازه محسوب می‌شود که در سازه‌های بتن مسلح، برای تحمل نیروی جانبی زلزله بکار می‌روند. 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^۱ مجبور به استفاده‌ی از این اعضای سازه‌ای است [۲]. استفاده از دیوار برشی باعث کاهش تغییر شکل‌های ناشی از زلزله^۲ روی کل سازه و همچنین روی تغییر شکل‌ها و نیروهای اعضای سازه‌ای و از جمله تغییر شکل‌های خود دیوار برشی است [۳].

با بررسی گزارشات فنی تدوین شده پس از زلزله در ۲۰ سال اخیر، سازه‌های دارای دیوار برشی در زلزله‌های

^۱ Lateral Drift

^۲ Earthquakes Displacement Demands

گذشته رفتاری متفاوت از خود نشان داده اند. تعدادی از آن ها چندین زلزله ی بسیار قوی را تقریباً بدون هیچ آسیبی پشت سر گذاشته اند (به طور مثال سازه های ایندین هیلز^۱ و پاناراما^۲ در زلزله های فرناندو^۳ و نورتریج^۴) ولی تعدادی دیگر با وجود رفتار کلی مناسب دچار خرابی های متعددی گردیده اند [۴]. در این ساختمان ها غالباً با به وجود آمدن ستون کوتاه، موجبات آسیب ستون ها را که خود نقش بسیار مهمی در پایداری سازه ها دارند، فراهم می کنند. در این سیستم های سازه ای معمولاً این مشکل با استفاده از تیرهای هم بند عمیق و دیوارهای بتنی بسیار سخت در تراس ها به وجود می آید. در نهایت با توجه به عدم وجود محصورشدگی و فولادهای عرضی لازم برای داشتن شکل پذیری مناسب، این سازه ها دچار خرابی هایی در اعضای کوتاه خود شده و بعضاً آن ها را تا سطح خرابی مستعد تخریب پیش می برد. با توجه به بررسی های انجام شده، امروزه دیوارهای برشی طراحی شده با آیین نامه های فعلی، ظرفیت برشی بالایی داشته و عملاً با مکانیزم خمشی که با جاری شدن فولادهای طولی در المان های مرزی همراه است، موجبات جذب و استهلاک انرژی را به خوبی تأمین می کنند.

اکثر سیستم های کنترل غیرفعال که امروزه استفاده می شوند، 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 حافظه دار شکلی (SMA) به عنوان موادی هوشمند که بسیاری از این مشکلات و محدودیت ها را ندارند، اخیراً در کنترل غیرفعال سازه ها مورد توجه قرار گرفته اند.

۱-۲- تعریف مسئله

مهم ترین ضعف دیوار برشی احتمال شکست برشی در صورت عدم طراحی مناسب، به وجود آمدن ترک های

^۱ Indian Hills Building, USA

^۲ Panarma Building, USA

^۳ Fernando Earthquake

^۴ Northridge earthquake

زیاد در نواحی مرزی دیوار و همچنین وجود تغییر شکل‌های ماندگار پس از زلزله‌های شدید می‌باشد. برای افزایش رفتار خمشی و جلوگیری از به‌وجود 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^۱ استفاده می‌کنیم.

۱-۳- هدف پژوهش

باتوجه به مزایایی که برای آلیاژ حافظه‌دار شکلی ذکر شد ما در این تحقیق نوع خاصی از دیوار برشی را پیشنهاد می‌دهیم که در نواحی مرزی و بحرانی دیوار از یک المان مجزای بتنی مسلح با میله های SMA استفاده شده است. استفاده از این المان باعث می‌شود که دیوار برشی مورد نظر رفتار مناسب تری را از خود نشان دهد و با توجه به خاصیت ابر کشسانی این آلیاژ، آسیب کمتری در نواحی مرزی دیوار بوجود می‌آید و همچنین خاصیت حافظه شکلی این آلیاژ باعث عدم وجود تغییر شکل های ماندگار پس از زلزله های نسبتاً شدید در سازه می‌شود.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

تغییر شکل‌های ماندگار که بعد از وقوع زلزله در سازه‌ها برجای می‌ماند باعث کاهش استحکام در سازه می‌شود و همچنین هزینه‌های مقاوم‌سازی آنها بسیار زیاد و حتی غیرممکن می‌باشد. برای کنترل نیروهای جانبی وارده ناشی از زلزله یکی از روش‌های مرسوم کنترل غیرفعال، استفاده از دیوار برشی می‌باشد که استهلاک انرژی خوبی دارد؛ ولی تغییر شکل‌های ماندگار و به‌وجود آمدن ترک در نواحی مرزی و بحرانی دیوار پس از زلزله‌های نسبتاً شدید همچنان مشکل ساز می‌باشد.

باتوجه به خواصی که برای آلیاژ حافظه‌دار شکلی ذکر شده، می‌توان از این آلیاژ برای کاهش آسیب در دیوار بعد از زلزله‌های نسبتاً شدید استفاده کرد. همچنین خواص حافظه شکلی این آلیاژ باعث بازگشت دیوار برشی

^۱ Smart Material Alloy

به شکل اولیه و وجود تغییر شکل‌های ماندگار حداقل در سازه می‌شود.

۱-۵- روش تحقیق

در این تحقیق تأثیر استفاده از مصالح هوشمند SMA در دیوارهای برشی، جهت کاهش تغییرشکل‌های 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 عبدالرضا و پالرمو [۵] نوشته شده، به بررسی عملکرد دو نوع دیواربرشی 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 می‌باشد. دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای معکوس قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه - جابه جایی گره بالای دیوار رسم شده‌اند.

به‌منظور 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 [۶] می‌باشد. مدل دوم یک ستون با میلگردهای SMA و بتن شکل‌پذیر ¹ECC است که از مطالعات سعیدی و همکاران [۷] می‌باشد. 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 WSH3 برای دیوار برشی و RNE برای ستون که N حرف نشانگر ستون دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل - تیتانیوم) و E نشانگر بتن شکل‌پذیر ECC می‌باشد.

پس از مدل‌سازی دیوارهای W1-SR، W2-NR، WH3 و ستون RNE و سپس بدست آوردن خروجی‌های انرژی مستهلک شده و برش پایه - جابه جایی تیرفوقانی به صورت چرخه‌ای و اعتبارسنجی خروجی‌های بدست آمده با مقالات مرجع به منظور بررسی بیش تر از سه پارامتر متغیر که شامل نیروی ثقلی وارد بر دیوار، طول

¹ Engineered cementitious composite

افقی نواحی مرزی و قطر میلگردهای SMA که درصد آنها نیز بر روی دیوار تاثیرگذار می‌باشد، استفاده شده است. همچنین یک مدل نوآورانه از ترکیب دیوار برشی با ستونک هایی از جنس بتن ECC و میلگرد SMA ارائه میشود. مدل ارائه شده به این صورت است که ستونک های ارتجاعی در نواحی مرزی دیوار قرار میگیرد و باعث رفتار مرکزگرایی در دیوار برشی میشود.

۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر در شش فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

فصل اول: به ارائه کلیات ضرورت انجام تحقیق، هدف پژوهش، اهمیت موضوع و روش تحقیق پرداخته شده است.

فصل دوم: معرفی آلیاژ حافظه دار شکلی و کاربرد آن در این تحقیق و مطالعات صورت گرفته در مورد تحقیق حاضر در این فصل ارائه شده است.

فصل سوم: نرم افزار OpenSEES، انواع روش مدل سازی دیوار برشی، خصوصیات مصالح و المان های مورد استفاده مورد بررسی قرار گرفته اند.

فصل چهارم: نتایج مربوط به مدل سازی های عددی و صحت سنجی نتایج ارائه شده است.

فصل پنجم: در این فصل به جمع بندی نتایج مدل سازی ها پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات بیشتر و جامع تر در بحث حاضر ارائه شده است.

فصل ۲ ادبیات فنی

۲-۱-آلیاژ حافظه‌دار شکلی

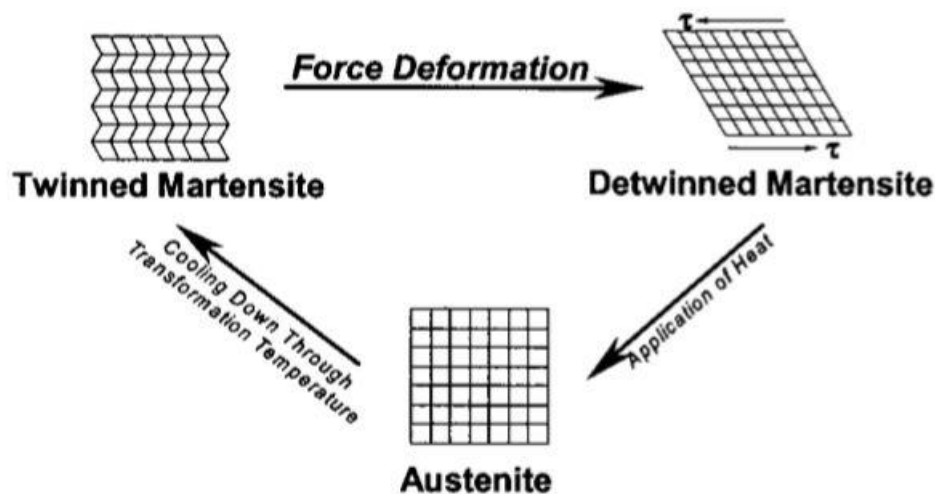
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که به‌عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند، نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک‌کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که از آن جمله می‌توان به عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به‌وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا ۸ درصد بدون باقی‌گذاشتن 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.

۲-۱-۱- ساختار کریستالی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دو صورت کریستالی آستنیت^۱ و مارتنزیت^۲ وجود دارند که رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. فاز آستنیت که فاز مرجع نامیده می‌شود از لحاظ ساختار مولکولی به شکل متقارن است و ساختار کریستالی مکعبی دارد، درحالی‌که فاز مارتنزیت دارای تقارن کمی است. حالت آستنیت در دماهای بالا و تنش‌های پایین پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار سوپر الاستیک است؛ درحالی‌که حالت مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار حافظه شکلی است. همچنین فاز مارتنزیت دارای دو ساختار کریستالی Twinned و Detwinned است. ساختار کریستالی مارتنزیت Twinned به دلیل کاهش دمای فاز آستنیت و ساختار کریستالی مارتنزیت Detwinned در اثر اعمال تنش به مارتنزیت Twinned ایجاد می‌شوند و با حرارت دادن بیش از A_f (دمای پایان آستنیت) دوباره به حالت آستنیت تبدیل می‌شوند. در شکل ۲-۱ ساختار کریستال‌ها و نحوه تبدیل کریستال‌ها به یکدیگر نشان داده شده است [۸].

^۱ Austenite

^۲ Martensite



شکل ۲-۱ ساختار و نحوه تبدیل کریستال‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به یکدیگر [۴]

۲-۱-۲- تأثیر دما در تبدیل فاز

از آنجاکه این مواد دارای طبیعت ترمومکانیکی هستند، رفتار آنها به دما و تنش‌های اعمال شده بر آنها بستگی داشته و می‌توانند با اعمال گرادیان حرارتی یا تنش، تغییر فاز دهند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر می‌باشد. در حالت بدون تنش، یک آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای چهار دمای مشخصه می‌باشد:

A_s : دمای آغاز حالت آستنیت

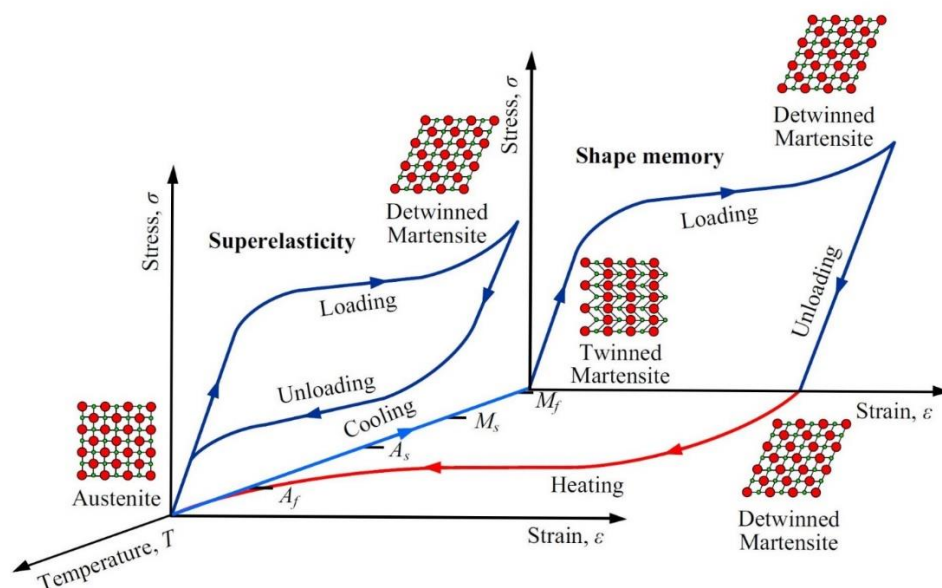
A_f : دمای پایان حالت آستنیت

M_s : دمای آغاز حالت مارتنزیت

M_f : دمای پایان حالت مارتنزیت

اگر دمای محیط بالاتر از A_f باشد، ماده اصطلاحاً در حالت آستنیت قرار دارد و رفتار فوق الاستیک از خود بروز خواهد داد و اگر دمای محیط کمتر از M_f باشد، ماده اصطلاحاً در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه شکلی از خود بروز خواهد داد. تا زمانی که ماده به دمای A_s نرسیده است، به صورت کاملاً مارتنزیت است. زمانی که به A_s می‌رسد، تبدیل از مارتنزیت به آستنیت آغاز شده تا به دمای A_f برسد. سرانجام زمانی که به

دمای A_f می‌رسد، تبدیل فاز پایان پذیرفته و ماده به حالت کاملاً آستنیت درمی‌آید. در تبدیل معکوس، زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار می‌گیرد، تا زمانی که ماده به دمای M_s نرسیده است، در حالت کاملاً آستنیت قرار دارد. وقتی به دمای M_s می‌رسد، کریستال‌های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می‌کنند و زمانی که ماده به دمای M_f می‌رسد، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل معکوس، در دمای بین M_s و M_f ، ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. حالت مارتنزیت می‌تواند هم توسط دما و هم توسط تنش ایجاد شود. اگر ماده در حالت آستنیت باشد، کرنش پسماند به جای نمی‌گذارد؛ اما اگر در حالت مارتنزیت باشد، کرنش پسماند به جای می‌گذارد که می‌توان با اعمال دما، کرنش پسماند را به صفر رساند. در شکل ۲-۲ این فرایند به خوبی نمایش داده شده است [۵].



شکل ۲-۲ تأثیر دما در کرنش پسماند حالت آستنیت و مارتنزیت

در جدول ۱-۲ تأثیر تغییر ترکیب شیمیایی و نحوه ساخت بر دماهای تبدیل در حالت بدون اعمال تنش قابل مشاهده است [۹]. همانگونه که قابل مشاهده است با تغییر ترکیب شیمیایی و نحوه ساخت آلیاژ حافظه‌دار شکلی دمای تبدیل فازها به یکدیگر تغییر می‌کنند.

جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی و دماهای تبدیل انواع مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حالت بدون اعمال تنش [۶]

Alloy	Source	Composition (%)	Fabrication process	M_f (K)	M_s (K)	A_s (K)	A_f (K)
Ni-Ti	Manach and Favier 1997	50.5, 49.5	Hot-rolled and subsequently cold-rolled with intermediate annealing	277.0	306.0	317.0	335.0
Ni-Ti	Delgadillo-Holtfort et al. 2004	50.8, 49.2	Annealed followed by water quenching	227.0	252.0	270.0	284.0
Ni-Ti	Hesse et al. 2004	55.7, 44.3	Unannealed	204.0±2.0	287.0±1.0	264.0±2.0	295.0±2.0
			Annealed	233.0±2.0	278.0±2.0	291.0±0.3	324.0±1.5
Ni-Ti	Strnadel et al. 1995	50.9, 49.1	Vacuum annealed followed by water quenching	157.4	242.5	275.1	317.8
		50.5, 49.5	Vacuum annealed followed by water quenching	195.4	254.7	282.2	326.2
		50.0, 50.0	Vacuum annealed followed by water quenching	245.2	310.7	321.4	351.0
Ni-Ti-Cu	Strnadel et al. 1995	40.0, 50.0, 10.0	Vacuum annealed followed by water quenching	294.1	314.6	325.9	339.8
Cu-Zn-Al	Vivet et al. 2001	25.6, 4.2, 70.2	Annealed followed by ageing in a quenching bath	288.5	292.3	293.2	298.3
Cu-Al-Ni	Recarte et al. 2004	82.0, 14.0, 4.0	Annealed followed by water quenching	252.0	246.0	274.0	285.0
Cu-Al-Be	Rejzner et al. 2002	11.6, 0.6, 87.8	—	157.0	179.0	169.0	195.0
Ni-Ti-Fe	Special Metals Corporation 2006	53.5, 45.0, 1.5	Cold-drawn	—	—	263.0±5.0	283.0±5.0
Ti-Ni-Hf	Wang et al. 1999	36, 49, 15	Hot-rolled	421.0	452.0	489.0	504.0

۲-۱-۳- خصوصیات ویژه

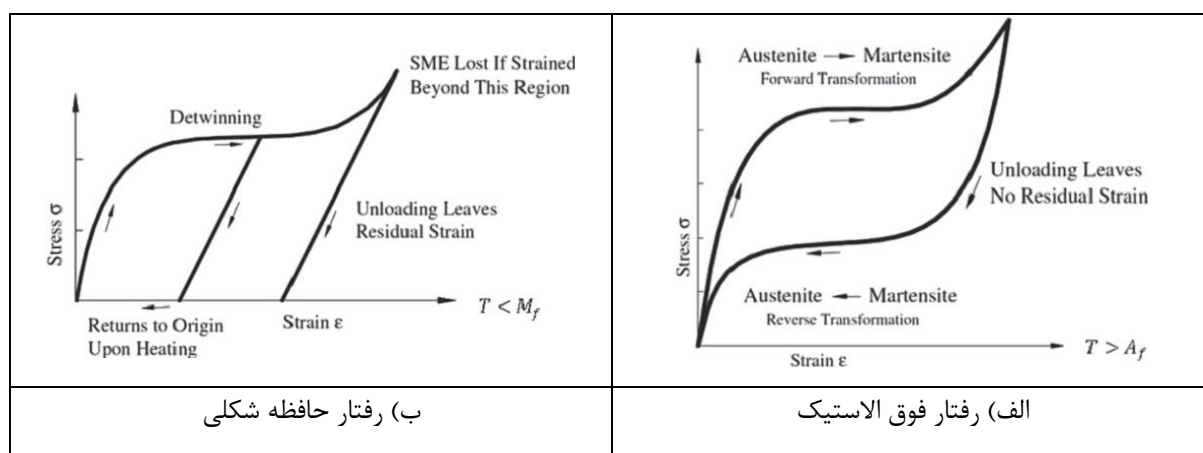
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو ویژگی منحصر به فرد، رفتار فوق الاستیک^۱ و حافظه‌دار شکلی^۲ هستند که در ادامه به توضیح آنها خواهیم پرداخت.

رفتار فوق الاستیک: رفتار فوق الاستیک در صورتی ایجاد می‌شود که دمای ماده بیش از A_f باشد. در ابتدا ماده در حالت آستنیت می‌باشد و نمودار تنش- کرنش بصورت خطی افزایش می‌یابد تا جایی که ماده تسلیم می‌شود، سپس نمودار در تنش ثابتی شروع به افزایش کرنش می‌کند و کریستال‌های ماده به تدریج از حالت آستنیت شروع به تبدیل شدن به حالت مارتنزیت می‌کنند تا جایی که ماده شروع به سخت شوندگی کرنشی کرده و به حالت مارتنزیت کامل می‌رسد. در اثر باربرداری و کاهش تنش، کریستال‌های مارتنزیت شروع به تبدیل شدن به آستنیت می‌کنند تا آنجا که به حالت کاملاً آستنیت می‌رسند. این چرخه به دلیل پایدار بودن آستنیت در دمای بالا و تنش کم و مارتنزیت در تنش زیاد و دمای پایین برقرار است که منجر به رفتاری

^۱ Superelastic

^۲ Shape memory

غیرخطی با توانایی تحمل کرنش زیاد بدون ایجاد تغییر شکل پسماند می‌شود (شکل ۳-۲-الف) [۱۰]. رفتار حافظه‌دار شکلی: رفتار حافظه‌دار شکلی به شرطی که دمای ماده کمتر از M_f باشد ایجاد می‌شود. به دلیل اینکه در دماهای پایین فاز مارتنزیت پایدار است بعد از باربرداری ماده به حالت آستنیت بازمی‌گردد و در ماده تغییر شکل باقی می‌ماند. برای بازگرداندن ماده به حالت اولیه و حذف تغییر شکل، به آن دمای بیش از A_f اعمال شده و به این صورت تغییر شکل‌های پسماند حذف می‌شوند (شکل ۳-۲-ب) [۱۰].



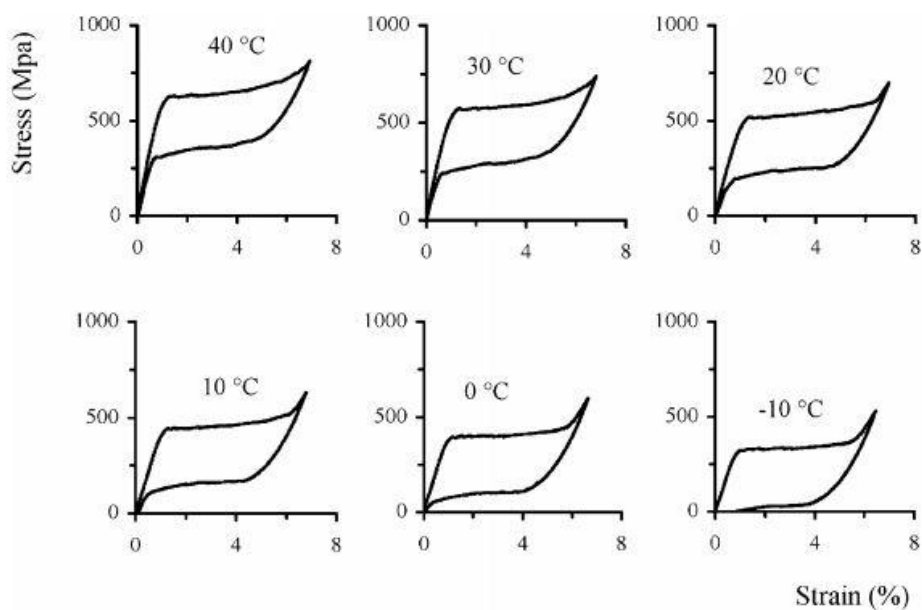
شکل ۳-۲ رفتار ویژه آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت آستنیت و مارتنزیت [۱۰]

۴-۱-۲- پیچیدگی‌های رفتاری

آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای رفتار پیچیده‌ای است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است.

۴-۱-۲-۱- اثر دما

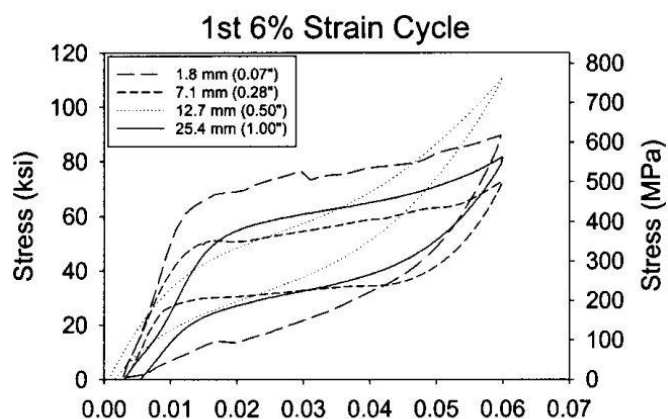
همان‌طور که در شکل ۴-۲ مشاهده می‌شود با کاهش دما مقدار تنش قابل تحمل کم شده و آلیاژ از حالت فوق الاستیک به حالت حافظه‌دار شکلی تبدیل می‌شود، در این نمونه دمای A_f منفی پنج درجه سانتی‌گراد است [۱۱].



شکل ۲-۴ منحنی تنش - کرنش سیم آستنیت در کشش برای دماهای مختلف [۱۱]

۲-۴-۱-۲- اثر ابعاد نمونه‌ها

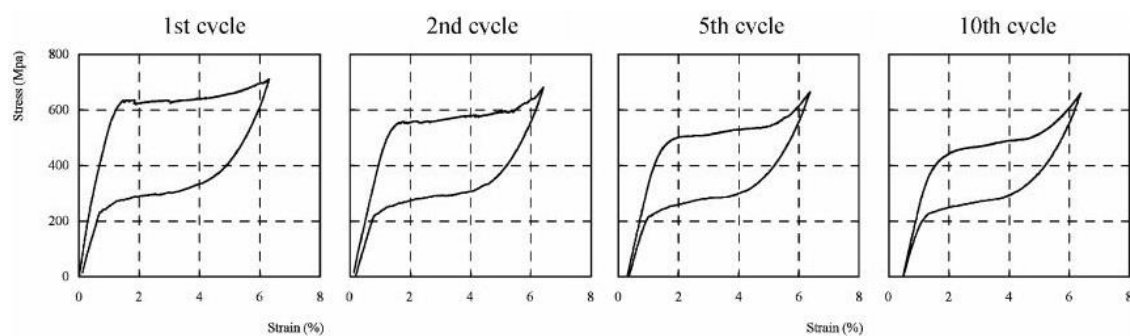
از آنجاکه هزینه ساخت آلیاژ حافظه‌دار شکلی گران است معمولاً به صورت سیم و میله تولید می‌شود. در شکل ۲-۵ نمودار تنش-کرنش سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیکل اول کرنش ۶ درصد آورده شده است [۱]. همانطور که قابل مشاهده است سطح زیر نمودار آلیاژ با قطر ۱/۸ میلی‌متر نسبت به قطرهای دیگر بزرگتر است که نشان دهنده استهلاک انرژی بیشتر آن می‌باشد.



شکل ۲-۵ نمودار تنش-کرنش سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ابعاد مختلف [۱]

۲-۱-۴-۳- اثر تعداد چرخه‌های بارگذاری

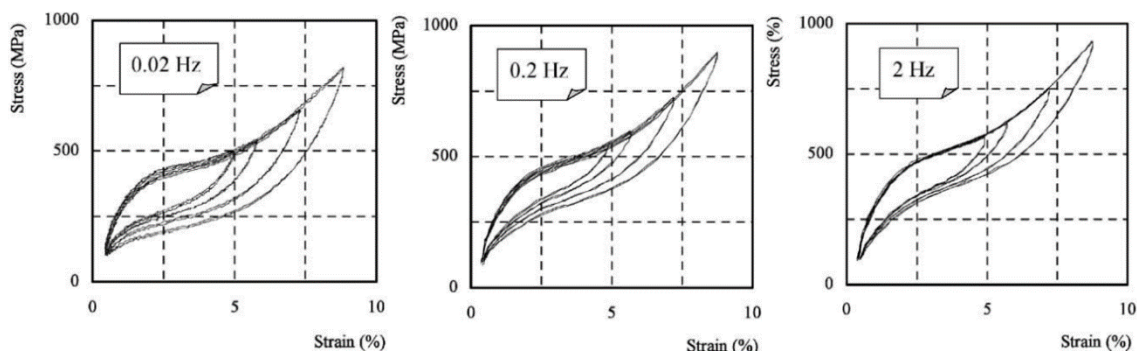
تعداد چرخه‌های بارگذاری یکی از عوامل تأثیرگذار بر رفتار آلیاژ حافظه‌دار شکلی است، با افزایش تعداد چرخه بارگذاری تنش تبدیل و سطح زیر نمودار کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۶ تأثیر تعداد چرخه بارگذاری بر نمودار تنش- کرنش سیم با قطر ۱ میلی‌متر با فرکانس بارگذاری ۱ هرتز و دامنه کرنش ۶/۵٪ نمایش داده شده است [۱۱].



شکل ۲-۶ نمودار تنش-کرنش در چرخه‌های مختلف [۱۱]

۲-۱-۴-۴- اثر سرعت بارگذاری

در هنگام زلزله به دلیل سرعت بالای بارگذاری زمان کافی برای مبادله گرما بین آلیاژ و محیط وجود ندارد، به این شرایط بارگذاری بی‌دررو گفته می‌شود. از آنجاکه تبدیل فازهای آستنیت و مارتنزیت به یکدیگر به دما وابسته هستند در رفتار آلیاژ تغییراتی ایجاد می‌شود. نتایج آزمایش برای فرکانس بارگذاری ۰/۲، ۰/۲ و ۲ هرتز در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. این آزمایش بر روی سیم آستنیت با قطر ۱/۸۴ میلی‌متر، پیش کشیده شده در حدود ۵٪ درصد و در دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. این سیم نیز باهدف تثبیت رفتار ماده با چرخه‌های متعدد تربیت شده است. نتایج نشان دادند با افزایش فرکانس بارگذاری حلقه‌های هیستریزس باریک شده درحالی‌که تنش‌های تبدیل فاز و ناحیه سخت‌شدگی افزایش می‌یابند [۱۱].



شکل ۲-۷ اثر فرکانس بارگذاری بر روی رفتار سیم آستنیت پیش‌تنیده شده [۱۱]

۲-۲-۲- انواع آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای ترکیبات مختلفی هستند که در این بخش به توضیح و مقایسه برخی از خواص مکانیکی دودسته آلیاژهای نیکل-تیتانیوم و آلیاژهای بر پایه مس که از مهم‌ترین ترکیبات این آلیاژها هستند پرداخته شده است.

۲-۲-۱- آلیاژهای نیکل-تیتانیوم^۱

آلیاژهای نیکل-تیتانیوم بر اساس ترکیب اتمی مساوی نیکل و تیتانیوم ساخته می‌شوند. علاوه بر دارا بودن رفتار فوق الاستیک و حافظه‌دار شکلی، دارای پایداری بالایی در برابر بارگذاری‌های چرخه‌ای می‌باشد. همچنین این مواد دارای مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر خوردگی بالایی نیز است. خصوصیت دیگر این مواد محدوده حل‌پذیری متوسط آنها می‌باشد که به آنها اجازه ترکیب مناسب با سایر مواد برای اصلاح خصوصیات حافظه‌دار شکلی و مکانیکی را می‌دهد. برای بهینه‌کردن مصرف تجاری و همچنین برای بهبود خصوصیات رفتاری معمولاً یک فلز دیگر به این دو عنصر اضافه می‌شود. در بعضی موارد مقدار نیکل تا یک درصد اضافی افزوده می‌شود. این امر موجب افزایش مقاومت تسلیم فاز آستنیت و کاهش دماهای تبدیل می‌شود.

پروژه ساخت آلیاژ NiTi کاری سخت و دشوار بوده و نیاز به ماشین‌آلات پیشرفته و گران است، این امر

^۱ Nickel-Titanium(NiTi)

موجب افزایش هزینه ساخت آن می‌شود. با این حال به دلیل خواص مکانیکی عالی آنها منجر شده تا در کاربردهای تجاری به عنوان مرسوم‌ترین مواد SMA شناخته شوند. در جدول ۲-۲ خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار NiTi و در جدول ۳-۲ مقایسه خصوصیات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی NiTi با فولاد ساختمانی مرسوم و ارائه شده است [۱۲].

جدول ۲-۲ خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار شکل NiTi [۱۲]

ویژگی	آلیاژ حافظه‌دار شکلی NiTi	فولاد
تغییر طول قابل بازگشت (%)	8	2
مدول الاستیسیته (MPa)	8.7×10^4 (A) و 1.4×10^4 (M)	2.07×10^5
مقاومت تسلیم (MPa)	200 – 700 (A) و 70 – 140 (M)	248 – 517
مقاومت کششی نهایی (MPa)	900 (f. a.) و 2000 (w. h.)	448 – 827
تغییر طول در هنگام شکست (%)	25 – 50 (f. a.) و 5 – 10 (w. h.)	20
عملکرد در مقابل خوردگی	عالی	نسبتاً خوب

جدول ۳-۲ مقایسه خصوصیات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی NiTi با فولاد ساختمانی مرسوم [۱۲]

دمای ذوب	1300	°C
چگالی	6.45	g/cm ³
مقاومت آستنیت	≈ 100	μΩ cm
مقاومت مارتنزیت	≈ 70	μΩ cm
هدایت حرارتی آستنیت	18	W/cm°C
هدایت حرارتی مارتنزیت	8.5	W/cm°C
مقاومت در برابر خوردگی	مشابه آلیاژ تیتانیوم	
مدول الاستیسیته آستنیت	≈ 80	MPa
مدول الاستیسیته مارتنزیت	40 تا 20 ≈	MPa
مقاومت تسلیم آستنیت	700 تا 190	MPa
مقاومت تسلیم مارتنزیت	140 تا 70	MPa

مقاومت نهایی کششی	≈ 900	MPa
دمای تبدیل	110 تا -200	$^{\circ}\text{C}$
کرنش حافظه‌دار شکلی	8.5	%

۲-۲-۲- آلیاژهای بر پایه مس

آلیاژ مس-روی-آلومینیوم^۱ اولین آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه مس بودند که به کاربرد تجاری رسیدند. این آلیاژ از روی آلیاژ دو عضوی مس-آلومینیوم^۲ ساخته شد، آلیاژ دو عضوی مس-آلومینیوم با وجود خصوصیت حافظه‌دار شکلی به دلیل دمای تبدیل بالا برای استفاده عملی مناسب نیست. آلیاژهای مس-روی-آلومینیوم دارای برتری برخورداری از مواد نسبتاً ارزان و قابلیت تولید آسان می‌باشند. اشکال اصلی این آلیاژها پایدار شدن حالت مارتنزیت در طول زمان در دمای محیط بوده که موجب می‌شود دمای تبدیل در طول زمان افزایش پیدا کند. این آلیاژها همچنین در مقایسه با آلیاژهای نیکل-تیتانیوم قابلیت تحمل کرنش‌های قابل‌بازگشت کمتری در حدود ۵٪ را دارند. همچنین بدون افزودن مواد مخصوص با رشد دانه‌ها امکان ایجاد شکست ترد در این مواد وجود دارد.

امروزه آلیاژهای مس-آلومینیوم-نیکل^۳ رشد زیادی کرده و نسبت به آلیاژهای مس-آلومینیوم ارجح می‌باشند. مزیت اصلی این آلیاژها نسبت به دیگر آلیاژها محدوده وسیع دماهای تبدیل قابل‌استفاده آنها می‌باشد. درصد آلومینیوم در این آلیاژها به میزان زیادی بر روی دماهای تبدیل اثر می‌گذارد. گرچه این آلیاژها نیز از مواد نسبتاً ارزان ساخته می‌شوند اما فرآیند تولید آنها مشکل بوده و فقط با نورد گرم قابل ساخت بوده و نورد گرمایی نهایی نیز باید به‌شدت کنترل شود، این عیب، قیمت تمام شده این آلیاژ را بیشتر از آلیاژهای مس-روی-آلومینیوم کرده ولی قیمت تمام شده هنوز از نیکل-تیتانیوم کمتر است. مشخصات مکانیکی آلیاژهای

^۱ CuZnAl

^۲ CuAl

^۳ CuAlNi

مس- روی- آلومینیوم و مس- آلومینیوم-نیکل در جدول ۲-۴ ذکر شده است [۱۲].

جدول ۲-۴ مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه مس [۱۲]

نوع آلیاژ	CuZnAl	CuAlNi
دمای ذوب	950 – 1020	1000 – 1050
چگالی	7.64	7.12
مقاومت	8.5 – 9.7	11 – 13
هدایت حرارتی	120	30 – 43
مدول الاستیسیته آستنیت	72 (*)	85 (*)
مدول الاستیسیته مارتنزیت	70 (*)	80 (*)
مقاومت تسلیم آستنیت	350	400
مقاومت تسلیم مارتنزیت	80	130
مقاومت کششی نهایی	600	500 – 800
دمای تبدیل	≤ 120	≤ 200
کرنش حافظه‌دار شکلی	4	4

* تعیین مدول الاستیسیته در دماهای بین M_s و A_s به راحتی امکان پذیر نیست زیرا این نوع SMAها در این محدوده رفتار الاستیسیته غیر خطی از خود نشان می‌دهند و مدول الاستیسیته وابسته به دما و کرنش می‌باشد.

۲-۳- کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های کنترل غیرفعال

ظرفیت استهلاک انرژی مناسب و قابلیت بازگرداندن مواد حافظه‌دار شکلی، دو خاصیت مهم این مواد برای استفاده در سیستم‌های کنترل غیرفعال می‌باشند. قابلیت استهلاک انرژی این مواد، تقاضا را بر روی اعضای اصلی سازه کاهش می‌دهد و از آنجایی که این مواد دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل خستگی هستند، می‌توانند پس از زلزله نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آنها نمی‌باشد. همچنین قابلیت بازگرداندن این مواد موجب می‌شود که سازه در طول زلزله به دفعات به وضعیت اولیه خود بازگردد که این امر مانع از تجمع کرنش‌ها در سازه شده و در نتیجه سازه پس از زلزله بدون برجای گذاشتن تغییر شکل‌های ماندگار، به وضعیت اولیه خود بازمی‌گردد. رفتار این مواد می‌تواند از حالت خالص آستنیت تا حالت خالص مارتنزیت تغییر کند. در محدوده بین دو حالت حدی، رفتاری بین این دو حالت به دست خواهد آمد. با حرکت از سمت رفتار آستنیت به سمت رفتار مارتنزیت، ظرفیت استهلاک انرژی افزایش خواهد یافت، ولی با افزایش

درصد مارتنزیت از یک حد مشخص، قابلیت بازگردانده‌ی این آلیاژ از بین خواهد رفت. لذا این دو حالت به‌گونه‌ای با یکدیگر ترکیب می‌شوند که رفتار بهینه که تضمین‌کننده اتلاف انرژی زیاد و قابلیت بازگرداندگی باشد، به دست آید.

تجهیزات تخصصی با ترکیبی از اجزاء حافظه‌دار شکلی، برای بهره‌مندی از اثر حافظه‌دار شکلی و یا خاصیت فوق الاستیک آنها طراحی شده‌اند. باتوجه‌به اثر حافظه‌دار شکلی برای کاربردهای فوق‌الذکر معمولاً سه مقوله مختلف بازگردانی آزاد، بازگردانی اجباری و محرک‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بازگردانی آزاد زمانی است که یک جزء حافظه‌دار شکلی اجازه ایجاد یک کرنش بازیابی برای بازگردانی آزادانه شکل اولیه در مدت گرم‌شدن را داشته باشد. اگر از این بازیابی جلوگیری شود، مصالح مجبورند در حین بازگشت در فرم مارتنزیتی خود باقی بمانند. در مواردی که در مدت گرم‌شدن هر دو کرنش و تنش بازیابی وجود دارند، مانند حالت گرم‌شدن فتر نیتینول برای بالا بردن توپ، کار انجام می‌شود. چنین کاربردهایی، اغلب بر اساس مود فعال‌سازی آنها یعنی الکتریکی و یا گرمایی، دسته‌بندی می‌شوند [۱۳].

۲-۴- پژوهش پیشینیان

کاشف خاصیت فوق الاستیک مواد، فیزیک‌دان سوئدی آرن اولاندر است که در سال ۱۹۳۲ با استفاده از آلیاژ طلا کادمیوم (AuCd) اولین برخورد را با رفتار فوق الاستیک داشت [۱۳].

در سال ۱۹۳۸، گرینیگر و موراندین ناپدید شدن و پیدا شدن مجدد یک سازه کریستالی مارتنزیتی را با افزایش و کاهش دمای یک آلیاژ روی و مس (CuZn) مشاهده کردند.

در سال ۱۹۶۰ بوشلر و ویلی آلیاژهای نیکل تیتانیوم (NiTi) را در آزمایشگاه Naval Ordnance (NOL) کشف کردند [۱۳].

در سال ۱۹۶۷، بوشلر و وانگ تحقیقات گسترده خود را بر روی نیتینول و کاربردهای تجاری آن در صنایع ارائه دادند [۱۴]. در سال ۱۹۸۰ میلادی هارت و میکائیل با انتشار مقاله‌ای از نتایج تحقیقات خودشان بر روی فلز برنج، آنرا به عنوان ماده جدید حافظه‌دار معرفی کردند [۱۵].

اولین تحقیق در زمینه کاربرد مواد حافظه‌دار شکلی در مهندسی عمران در سال ۱۹۹۱ توسط گریسر و کوزارلی صورت پذیرفت [۱۶]، آنها استفاده از میراگرهای ساخته شده از مواد حافظه‌دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند.

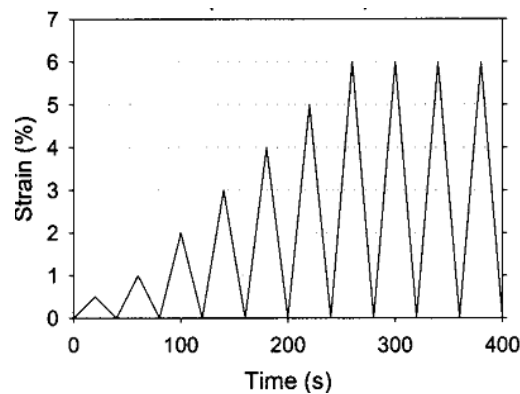
برج ناقوس کلیسای سان-جورجیا در منطقه تریگنانو ایتالیا در اثر زلزله ۴/۸ ریشتری سال ۱۹۹۶ دچار آسیب شد، برای ترمیم برج این کلیسا از آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شد. چهار میله فولادی پیش‌تنیده قائم با SMA در گوشه‌های داخلی برای افزایش مقاومت خمشی سازه جای‌گذاری شدند. دستگاه SMA از ۶۰ سیم به قطر ۱ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر ساخته شد. در سال ۲۰۰۰ سازه تحت زلزله ۴/۵ ریشتری قرار گرفت، مشاهدات حاکی از آن بود آسیبی بر سازه وارد نشده است. بهسازی برج ناقوس کلیسای سان-جورجیا اولین کاربرد شناخته شده SMA برای بهسازی و طراحی در مقابل زلزله است [۱۷].

در پروژه مشابه دیگری بنایی که در اثر زلزله سال ۱۹۹۷ در آسیزی ایتالیا آسیب‌دیده بود توسط SMAهای سوپر الاستیک ترمیم شد. چالش اصلی ترمیم سازه، رسیدن به سطح ایمنی کافی بود درحالی‌که ماهیت اصلی سازه همچنان بدون تغییر باقی بماند [۱۷].

در سال ۲۰۰۴ دسراچز و همکاران [۱] به بررسی ویژگی‌های سیم و میله‌های از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی که از دو آلیاژ نیکل و تیتانیوم تشکیل شده بود برای تعیین اثرات اندازه میله، تاریخچه بارگذاری و میزان بارگذاری بر روی مقدار استهلاک انرژی، توانایی خود بازگرداندگی و تنش تغییر فاز پرداختند.

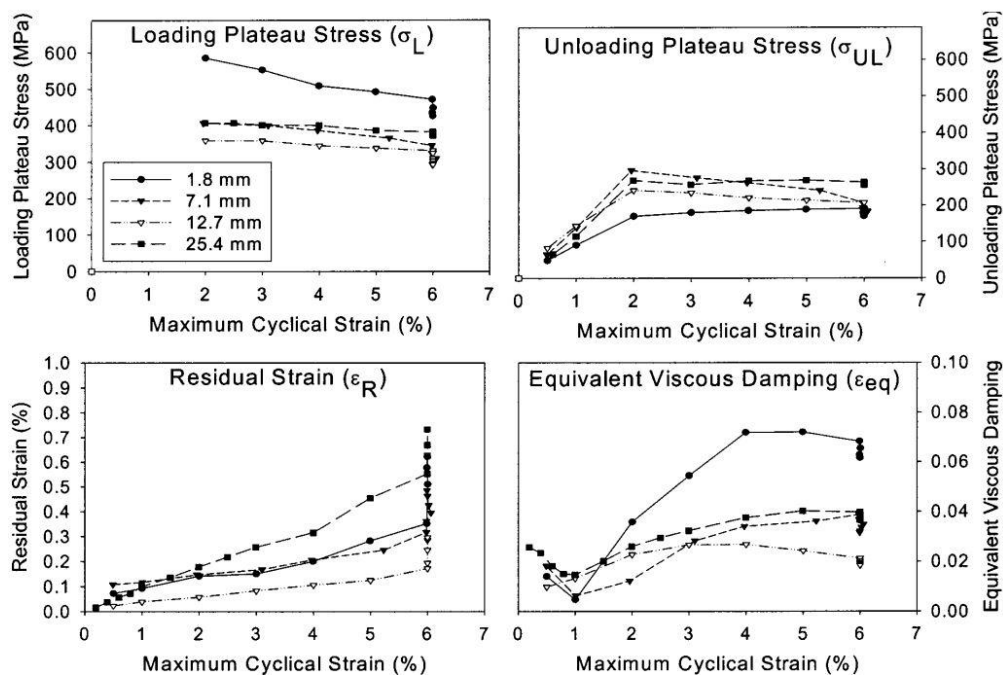
نمونه‌ها از قطر ۱/۸ تا ۲۵/۴ میلی‌متر تحت آزمایشات بارگذاری کششی شبه استاتیکی و دینامیکی تا کرنش ۶٪ قرار گرفتند. قبل از انجام آزمایش تمامی نمونه‌ها به‌غیر از نمونه ۲۵/۴ میلی‌متری در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه تحت حرارت قرار گرفتند و نمونه ۲۵/۴ میلی‌متری در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه تحت حرارت قرار گرفت. تاریخچه بارگذاری از یک چرخه کششی در کرنش ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد و چهار چرخه کششی در کرنش ۶ درصد متشکل بود. اثرات میزان بارگذاری در فرکانس بارگذاری شبه استاتیکی ۰/۰۲۵ هرتز و برای بارگذاری دینامیکی ۰/۵ و ۱/۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲-۲۰

۸ پروتکل بارگذاری با فرکانس ۰/۰۲۵ هرتز آورده شده است.



شکل ۸-۲ پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی با فرکانس ۰/۰۲۵ هرتز [۱]

در شکل ۹-۲ مقایسه بین تنش بارگذاری، تنش باربرداری، کرنش پسماند و نسبت میرایی معادل ویسکوز برای سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت بارگذاری شبه استاتیکی سیکلی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد کرنش پسماند به تدریج از متوسط ۰/۰۱۵٪ در کرنش ۰/۰۳٪ تا میانگین ۰/۰۶۵٪ بعد از چهارمین سیکل در کرنش ۰/۰۶٪ افزایش می‌یابد و همچنین میرایی معادل ویسکوز در کرنش ۰/۰۴-۰/۰۵٪ به حداکثر می‌رسد و برای کرنش‌های فراتر از ۰/۰۵٪ شروع به کاهش می‌کند. میرایی معادل ویسکوز به طور کلی کمتر از ۰/۰۲٪ برای میله ۱۲/۷ میلی‌متری و حداکثر ۰/۰۷/۶٪ برای سیم ۱/۸ میلیمتری بود. این مقادیر بیان‌کننده این است که اگر سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی به تنهایی بکار روند برای کاربردهای لرزه‌ای کم مناسب هستند. در نتایج آزمایشات تفاوت زیادی دیده شد که نشان‌دهنده حساسیت این آلیاژ به ابعاد، چگونگی ساخت و گرمادهی است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش فرکانس منجر به افزایش گستره تنش مسطح بارگذاری و باربرداری، کاهش هیستریزیس و کاهش قابل توجهی در میرایی معادل ویسکوز در سیم‌ها و میله‌ها می‌شود. با این حال به این نتیجه رسیدند که قابلیت خود مرکزی اندازه‌گیری شده توسط کرنش باقی‌مانده، تحت تأثیر نرخ بارگذاری نیست.

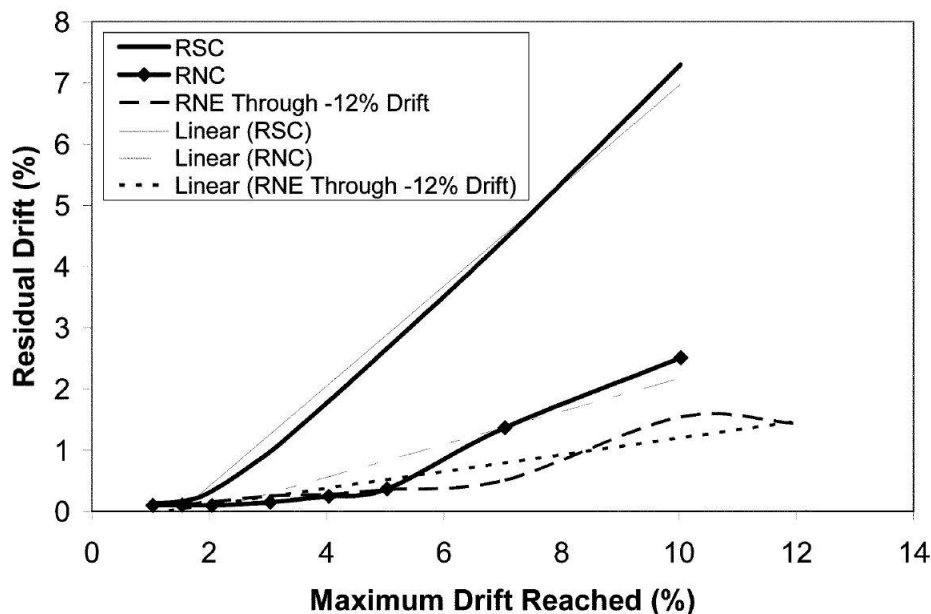


شکل ۲-۹ مقایسه تنش بارگذاری، تنش باربرداری، کرنش پسماند و نسبت میرایی معادل ویسکوز برای سیم و میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت بارگذاری شبه استاتیکی سیکلی [۱]

در سال ۲۰۰۷ مطهری و قاسمیه [۱۸] یک مدل‌سازی یک بعدی ترمودینامیکی برای شبیه‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs) تحت شرایط مختلف بارگذاری و در دماهای مختلف ارائه کردند. توانایی مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری با سرعت بالا بویژه برای آلیاژ NiTi نشان داد که برای بارگذاری‌های لرزه‌ای مناسب می‌باشند. ماهیت چند خطی این مدل آن را مناسب برای استفاده در بسته‌های نرم‌افزاری غیر خطی اجزای محدودی می‌کند. شبیه‌سازی عددی مدل پیشنهاد شده توسط نویسندگان در مقایسه با سایر مدل‌های موجود و با داده‌های تجربی مطابقت می‌کرد.

در سال ۲۰۰۹ سعیدی و همکاران [۷] نوعی ستون مرکزگرای جدید را برای پل‌ها ارائه کردند 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 انعطاف پذیر ECC در ناحیه مفصل پلاستیک استفاده شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای تا حداکثر دریفت ۱۰٪ قرار گرفتند. در شکل

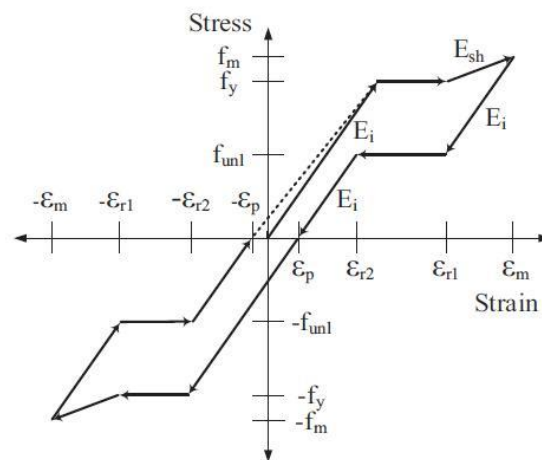
۲-۱۰ تغییر شکل نسبی ماندگار نمونه ها تحت تحلیل چرخه‌ای آورده شده است. به طور میانگین تغییر شکل ماندگار در نمونه RNE، ۱/۶ نمونه RSC و ۱/۲ نمونه RNC بود. نتایج نشان دهنده تاثیر قابل توجه استفاده ترکیبی SMA و ECC در کاهش تغییر شکل ماندگار بود.



شکل ۲-۱۰ دریفت ماندگار نمونه‌ها تحت تحلیل چرخه‌ای [۷]

در سال ۲۰۱۳ لو و همکارانش [۱۹] 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 بتنی مجهز به اعضای قابل تعویض در پای دیوار انجام دادند. هر سه سیستم سازه‌ای عملکرد موثری در مقابل نیروی جانبی از خود نشان دادند.

در سال ۲۰۱۳ عبدالرضا و همکاران [۲۰] به مدل نرم افزاری جهت مدلسازی SMA توسعه دادند که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۲ - ۱۱ مدل سازنده نمودار چرخه‌ای مصالح SMA [۲۰]

مدل نشان داده شده در شکل بالا در برنامه Vector2 [۲۱] به کار گرفته شده است. نرم‌افزار مذکور جهت تحلیل های غیرخطی دو بعدی سازه های بتنی با المان های غشایی مناسب می باشد. مدل فوق ارتجاعی SMA نشان داده شده بر پایه پاسخ های حداکثر ۳ خطی که مشابه پاسخ ها در تحلیل های یکنوای تک جهته فرض می شود، می باشد. نمودار کلی شامل سه قسمت می باشد. شیب اولیه خطی الاستیک بارگذاری، تسلیم (تحول یا تبدیل شوندگی رو به جلو)^۱، و سخت شوندگی کرنشی که معرف پاسخ های الاستیک ناشی از تنش در حالت مارتنسیت^۲ می باشد. در شکل ۲-۴ پارامترهای ϵ_{T1} و ϵ_{T2} به ترتیب اولین و دومین کرنش باربرداری می باشند که مشخص کننده ناحیه مسطح تنش تحتانی f_{unl} می باشد، پارامتر ϵ_m کرنش حداکثر در گام جاری، ϵ_p کرنش انحراف پلاستیک می باشد.

عبدالرضا و همکاران [۲۰] با انجام آزمایشات کششی بر روی میلگردهای SMA توانسته اند روابطی را بین پارامترهای ϵ_p و ϵ_{r1} و f_{unl} با پارامتر کرنش در گام جاری ϵ_m پیدا کنند.

^۱ Forward Transformation

^۲ Martensite

رابطه بین کرنش انحراف پلاستیک با کرنش حداکثر در گام جاری از رابطه ۲-۱ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\varepsilon_p = 0.0013 (\varepsilon_m)^2 - 0.025 (\varepsilon_m) + 0.71 \quad (1-2)$$

کرنش باربرداری اولیه برحسب کرنش حداکثر در گام جاری از رابطه ۲-۲ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\varepsilon_{r1} = 0.86 (\varepsilon_m) - 0.45 \quad (2-2)$$

نسبت تنش در ناحیه مسطح تحتانی به تنش تسلیم مصالح SMA رابطه ۲-۳ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$f_{unl} / f_y = -0.006(\varepsilon_m) + 0.73 \quad (3-2)$$

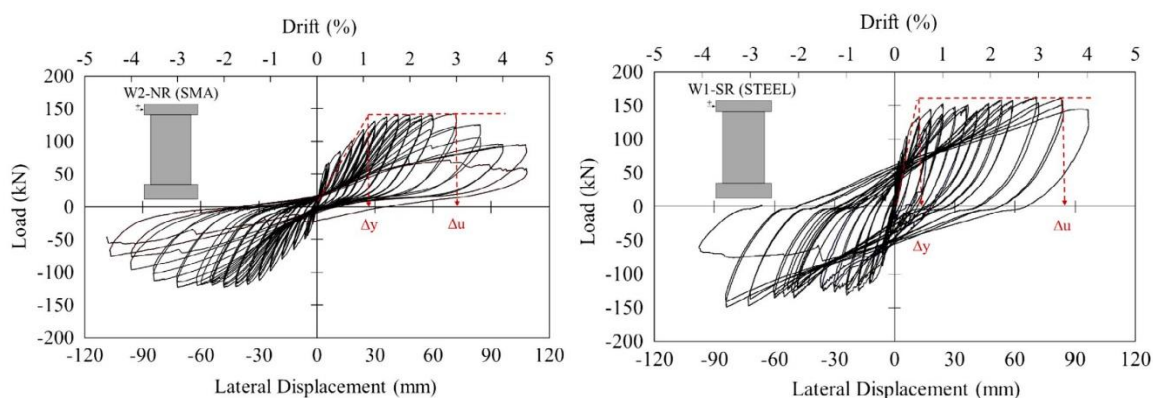
کرنش باربرداری ثانویه ε_{r2} به صورت ضمنی یا غیرمستقیم از نقطه تلاقی تنش در ناحیه مسطح تحتانی با شاخه الاستیک باربرداری که تا کرنش پلاستیک انحراف رسم می‌شود، مشخص می‌گردد.

نمودار در انتقال از حالت فشار به کشش با رسم خط صافی از نقطه انحراف پلاستیک ε_p تا کرنش حد تسلیم اولیه یا ε_y ایجاد می‌شود. پس از این پاسخ‌ها از منحنی رسم شده در نقاط حداکثر پیروی می‌کند. مقدار عددی پارامترهای E_{sh} ، E_i ، f_y ، ε_u و ε_{sh} یا از طریق انجام آزمایش‌های کششی بر روی مصالح و یا به وسیله کارخانه‌های ارائه‌دهنده میلگردهای تعیین می‌شوند.

وارلا و سعیدی [۲۲] در سال ۲۰۱۶ یک ایده منحصر به فرد برای ستون‌های ارتجاعی پل که می‌تواند بار شدید زمین لرزه را تحمل کند و با کمترین آسیب و تغییر مکان نسبی ماندگار را ارائه کردند. در این ایده، ستون طوری طراحی شده است که اجزای آن را می‌توان به راحتی از هم جدا و برای بازیافت مصالح و استفاده مجدد، از اجزای سازنده استفاده کرد. خواص مرکزگرا و استهلاک انرژی در ستون از طریق میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل تیتانیوم (NiTi)، جایگذاری شده در محل مفصل پلاستیک رخ می‌دهد. ایده پیشنهادی با استفاده از آزمایش یک مدل ستون ۱/۴ مقیاس با شبیه سازی حرکات زلزله نزدیک به گسل در یک میز لرزه مورد آزمایش قرار گرفت. پس از آزمایش، مدل دوباره تکه تکه شد و دوباره تست شد. عملکرد لرزه ای مدل مشابه با مدل "دست نخورده" قابل مقایسه است. نمونه مورد نظر در نرم افزار OpenSEES مدل سازی و نتایج آن با مدل آزمایشگاهی مطابقت داده شد.

عبدالرضا و پالرمو [۵] در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه آزمایشگاهی برای مقایسه عملکرد دیوار برشی مسلح با آرماتور فولادی و دیوار برشی بتونی 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 اثر تغییر مکان جانبی بیش از ۴٪ موثر است. در شکل ۲-۱۲ نمودار نیرو-جابه‌جایی دو مدل آزمایشگاهی مذکور نمایش داده شده است.

دیوار برشی SMA ترکیبی، مقاومت جانبی و ظرفیت جابه‌جایی مشابه دیوار تقویت شده فولادی را تجربه کرد. همچنین در این مدل کاهش قابل‌ملاحظه‌ای استهلاک انرژی و کاهش سختی در ناحیه تسلیم مشاهده شد. علاوه بر این محققین از تحلیل اجزای محدود نیز برای نشان دادن اثر بار محوری بر ظرفیت بازگردانی دیوار برشی استفاده کردند. نتایج نشان داد اعمال بار محوری تأثیر مثبت در مرکزگرایی دیوار دارد.



الف) نمونه با آرماتور فولادی در نواحی مرزی
ب) نمونه با آرماتور SMA در نواحی مرزی
شکل ۲-۱۲ نمودار نیرو-جابه‌جایی دیوار برشی [۵]

در سال ۲۰۱۷ کرتز و پالرمو [۲۳] دیوار برشی بتنی بدون مهاربند و با مهاربند فولادی و SMA را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند در مدل دیوار برشی مجهز به مهاربند، مقاومت، اتلاف انرژی و بازیابی جابه‌جایی افزایش یافته و تنزل سختی و مقاومت کاهش می‌یابد. در جدول ۲-۵ نتایج مدل‌سازی دیوارهای SQ1 (دیوار بدون مهاربند)، SQ1S (دیوار با مهاربند SMA) و SQ1R (دیوار با مهاربند فولادی) آورده شده است.

جدول ۵-۲ پارامترهای پاسخ پیش‌بینی شده دیوارها

Wall	Yield	Ultimate			Residual Disp. (mm)	Stiffness (kN/mm)	Ductility (mm/mm)
	Disp. (mm)	Disp. (mm)	Strength (kN)	Cum. Energy (kN-mm)			
SQ1	6.25	50	127	53597	37.2	20.3	8.00
SQ1S	12.50	40	220	48680	17.0	17.6	3.20
SQ1R	8.00	30	234	31147	18.5	29.3	3.75

کرتز و همکاران [۲۴] 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 مجموعه ای از دیوار که قبلاً در شرایط اولیه آنها آزمایش شده بود را ارائه کردند. استراتژی تعمیر شامل حذف بتن شدیداً آسیب دیده در ناحیه مفصل پلاستیکی، جایگزینی آرماتور فولاد شکسته و کمانش یافته با SMA در مناطق مرزی است. بتن ترمیم شونده جایگزین بتن حذف شده می‌شود. بتن بالای مفصل پلاستیکی با توجه به آسیب ناچیز (ترک مویی) دیواره های اصلی در این منطقه باقی ماند. نتایج آزمایش نشان داد که سازه های ساختمانی بتنی مسلح با SMA، مرکزگرا هستند، که امکان تعمیر نواحی آسیب دیده را فراهم می‌کند. علاوه بر این، میله های SMA به دلیل توانایی آنها برای بازگشت آنها به حالت اصلی خود در محدوده کرنش های غیرالاستیک تا ۶ درصد، قابل استفاده مجدد می باشند. دیوارهای تعمیر شده قادر به بازگرداندن تسلیم و ظرفیت بار جانبی نهایی بودند، اما ظرفیت تغییر مکان نسبی پایین تر را حفظ کردند. دیوار تعمیر شده SMA توانست تغییر مکان جانبی نسبی را تا ۲ درصد بهبود دهد، که بعد از آن جابجایی های باقی مانده به علت شکستن میله های SMA در ناحیه مرزی، متوقف شد. دیوارهای ترمیم شده به میزان ۷/۸٪ انرژی بیشتری نسبت به دیواره های اصلی خود را برای بخش قابل توجهی از محدوده بارگذاری مستهلک کردند.

فصل ۳ روش اجرای تحقیق

۳-۱- بررسی نرم‌افزار اجزای محدود OpenSEES

نرم‌افزار ^۱ OpenSEES یک نرم‌افزار اجزای محدود می‌باشد که بر پایه زبان برنامه نویسی C++ که زبانی شیء گرا می‌باشد نوشته شده است. شیء گرایی بدان معنی است که برنامه داده ها و توابع را تا حد امکان به واحد های کوچک تری به نام شیء تقسیم بندی می‌کند. این مفهوم به این معناست که این داده ها و توابع در قالب شیء در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک مجموعه بزرگ تر را پدید می آورند. اشیاء ویژگی خاص خود را دارند و به صورت موازی با هم تحلیل میشوند. سپس با استفاده از روابط و توابع تعریف شده بین این اجزای کوچک تر پاسخ نهایی سیستم بدست می آید. از مهم ترین ویژگی های زبان شیء گرا می‌توان به پیچیدگی کم، سرعت بالا در انجام محاسبات، امکان گسترش سریع برنامه با خطای کمتر و اشغال حجم کمتر از حافظه موقت دستگاه است.

نام نرم‌افزار در ابتدا G3 بوده که برگرفته از رساله دکتری فرانک مک کنا^۲ با عنوان ”تحلیل موازی سازه ها به شیوه شیء گرا” در دانشگاه برکلی است. پس از آن با همکاری مؤسسه Pacific نام نرم‌افزار به OpenSEES تغییر یافت اما علی رغم نام نرم‌افزار که در عنوان تنها به گرایش زلزله اشاره دارد، این نرم‌افزار برای استفاده طیف وسیعی از دانشجویان در گرایش های زلزله، سازه، سازه های هیدرولیکی، ژئوتکنیک و سازه های دریایی درمقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری قابل استفاده می‌باشد. OpenSEES به مدد برخورداری ازطیف وسیعی از مصالح، مقاطع، المان ها و الگوریتم های حل، قابلیت مدل سازی و تحلیل خطی و غیرخطی پیشرفته انواع مختلف سیستم های سازه ای و ژئوتکنیکی را دارد.

۳-۱-۱- مزایای نرم‌افزار اجزای محدود OpenSEES

نرم‌افزار OpenSEES به عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند در زمینه اجزای محدود دارای قابلیت های متعددی

^۱ Open System for Earthquake Engineering Simulation

^۲ Frank McKenna

در زمینه تحلیل مدل به صورت ماکرو و میکرو شناخته شده است. در زیر چند مزیت این نرم افزار برشمرده شده است .

- سرعت پردازش بالا و اشغال حجم کمتری از حافظه موقت دستگاه در مقیاس با سایر نرم افزارها
- کدباز بودن نرم افزار و قابلیت تغییر دستورات توسط کاربر
- حجم بسیار پایین نرم افزار که خروجی های آن غالباً به صورت متنی می باشد.
- نرم افزار برخلاف بسیاری از نرم افزارهای دیگر رایگان می باشد و به علت نداشتن قفل برای استفاده در مقالات مناسب می باشد.
- قابلیت مدل سازی به صورت پارامتری که در تحلیل های خاص نظیر تحلیل های دینامیکی افزایشی بسیار حائز اهمیت می باشد.
- قابلیت انجام تحلیل های استاتیکی و دینامیکی به صورت خطی و غیرخطی
- توانایی مدل سازی دقیق مقاطع بتنی و فولادی یا ترکیبی از این دو
- قابلیت اتصال به نرم افزار MATLAB
- نتایج بسیار دقیق و قابل قبول در حوزه های خطی و غیرخطی
- پشتیبانی از نرم افزار در تالار گفتمان اصلی وابسته به سایت اصلی دانشگاه برکلی امریکا

۳-۱-۲- معرفی کوتاهی بر زبان برنامه نویسی Tcl/Tk

زبان برنامه نویسی Tcl^۱ در ژانویه سال ۱۹۸۸ توسط جان استرهوت^۲ در دانشگاه برکلی ایالات متحده ابتدا با اهداف آموزشی ایجاد شده است. این زبان برنامه نویسی برپایه کدنویسی استوار می باشد و در ترکیب با رابط گرافیکی Tk با نام Tcl/Tk شناخته شده است. رابط های گرافیکی بین برنامه و کاربر به منظور ساده سازی برنامه نویسی ایجاد شده اند. به نقل از جان استرهوت، زبان برنامه نویسی Tcl توسط برنامه های مربوط به طراحی مدارهای مختلط توسط وی در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه برکلی ایجاد شده است. کاربران OpenSEES مدل های اجزای محدود خود را با نوشتن کدهای مربوطه در Tcl ایجاد می کنند.

^۱ Tool Command Language

^۲ John Ousterhout

۳-۱-۳- خصوصیات مصالح در نرم افزار OpenSEES

مصالح در نرم افزار OpenSEES با نام Materials شناخته می شوند که هر کدام از این مصالح وظایف گوناگونی را برعهده دارند. از یک مصالح موجود در برنامه هم می توان به عنوان ماده اولیه جهت مدل سازی مقاطع که در گام معرفی مقاطع برای مدل سازی المان های سازه ای مورد استفاده قرار می گیرد بهره برد که از مثال های بارز آنها می توان به مصالح فولادی و بتنی اشاره کرد و هم می توان از مصالح به عنوان تعریف رفتار خاصی از یک المان بهره برد برای نمونه از یک مصالح چندبعدی^۱ جهت معرفی رفتار لنگر- انحنای مقطع مشخصی استفاده می شود. هم چنین می توان از مصالح خاصی مانند مصالح الاستیک به طور مستقیم جهت مدل سازی المان های سازه ای بدون اینکه نیاز به تعریف مقطع از پیش تعریف شده ای داشته باشیم استفاده نمود یا مصالح موجود جهت مدل سازی فنرها از مثال های دیگر این مشخصه می باشد.

به طور کلی مصالح در نرم افزار OpenSEES به ۳ دسته کلی زیرتقسیم بندی می شوند که هر کدام از این دسته ها دارای شاخه بندی های متعدد مربوط به خود می باشند.

الف) مصالح تک بعدی یا یک جهته که تنها برای مدل سازی رفتار المان در یک جهت مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله این موارد موجود در این دسته می توان به مصالح زیر اشاره کرد.

- Elastic
- Elastic Perfectly Plastic
- Elastic No Tension
- Steel01 , Steel 02 , Steel4 , Reinforcing Steel , SteelMPF
- Concrete01, Concrete02, Concrete04, Concrete06, Concrete07(Chang & Mander),
Confined Concrete01, ConcreteD, FRP Confined Concrete, ConcreteCM
- ViscousDamper
- SAWS
- BarSlip

و موارد بسیار زیاد دیگری اشاره نمود.

ب) مصالح چند محور یا چند درجه که از این دسته از مصالح برای مدل سازی المان های پیوسته و حجمی

^۱ Multi-Dimensional Material Or ND Material

مانند المان‌های پوسته‌ای یا غشایی در فونداسیون‌ها، سقف‌ها و یا دیوارهای برشی استفاده می‌شود.

- Elastic Isotropic
- Elastic Orthotropic
- J2 Plasticity
- Drucker Prager
- Concrete Damage
- Plane Stress And Plane Strain And Plate Fiber
- Bounding Surface Cam Clay
- FSAM – 2D RC Panels Constitutive Behavior
- Manzari- Dafalias
- Pressure Dependent Multi Yield , Pressure Independent Multi Yield
- Fluid- Solid Porous

و موارد متنوع دیگری اشاره نمود که هر کدام برای مدل‌سازی محیط‌های خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ج) مصالح حرارتی که از این مصالح جهت تحلیل‌های خزشی ناشی از اعمال حرارت و گرما به المان‌های

سازه استفاده می‌شود. در زیر به برخی از این مصالح حرارتی اشاره شده است.

- Elastic Thermal
- Steel01 Thermal, Steel02 Thermal, Steel EC Thermal
- Concrete02 Thermal, Concrete EC Thermal

۳-۱-۴- خصوصیات المان‌ها در نرم‌افزار OpenSEES

پس از اینکه در نرم‌افزار مصالح و مقاطع تعریف گردید نوبت به معرفی المان‌های سازه‌ای می‌رسد. در گام

معرفی المان تمامی گام‌های قبلی انجام شده در کنار یکدیگر قرار گرفته و هندسه مدل ایجاد می‌گردد.

به‌عنوان نمونه المان تیر- ستون نیرویی، از یک مقطع از پیش معرفی شده تغذیه شده که این مقطع نیز از

مصالح از پیش تعریف شده بهره می‌برد، بین دو گره که مختصات آنها در گام‌های ابتدایی مدل‌سازی در برنامه

معرفی شده است ترسیم می‌گردد. مجموعه المان‌های قرار گرفته در کنار یکدیگر هندسه کلی مدل را ایجاد

می‌کند.

المان‌ها در نرم‌افزار OpenSEES طیف گسترده‌ای را پوشش می‌دهد که از جمله آنها می‌توان به المان‌های

بدون طول فنر، میراگرها و جداسازهای سازه‌ای اشاره نمود که مابین دو گره با مختصات یکسان تعریف می‌شود.

المان‌های خرپایی جهت مدل‌سازی مهاربندها یا تیرها درسازه‌های قاب بندی شده مفصلی به کاربرده می‌شوند، المان‌های ستون که بر مبنای روابط نیرویی و یا جابه جایی تعریف می‌شوند. المان‌های لینک دو گرهی که جهت مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون در قاب‌های مختلف کاربرد دارند. المان‌های برخورد که جهت مدل‌سازی برخورد یا اصطکاک بین دو جسم در حالت دو بعدی صفحه‌ای یا فضای سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. المان‌های سه گوشه ای، چهار گوشه‌ای، المان‌های پوسته‌ای و یا غشایی و... از المان‌های متنوع موجود در کتاب خانه نرم‌افزار هستند.

۳-۲- مدل‌سازی دیوار برشی بتن مسلح در نرم‌افزار OpenSEES

دیوار برشی بتنی در نرم‌افزار OpenSEES را می‌توان با روش‌های مختلفی مدل‌سازی کرد که در این مطالعه با ۴ روش اصلی مدل‌سازی پرداخته شده است.

۳-۲-۱- مدل‌سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان ستون معادل

در مدل‌سازی دیوار برشی به روش ستون معادل، می‌توان از المان‌های تیر- ستون غیرخطی با توزیع مفصل‌های پلاستیک به صورت گسترده در طول المان یا از المان‌های الاستیک خطی همراه با مفاصل متمرکز در ابتدا و انتهای دیوار استفاده نمود.

در این روش که ساده‌ترین روش و درعین حال کم دقت‌ترین روش در مدل‌سازی دیوار برشی می‌باشد، از یک المان خطی به صورت قائم که دارای مشخصات فیزیکی معادل با دیوار برشی می‌باشد استفاده می‌شود. این مشخصات شامل سطح مقطع، ممان اینرسی، مدول الاستیک می‌باشد. در این روش ابتدا مصالح فولادی میلگردها، مصالح بتنی پوشش و مصالح بتنی هسته دیوار برشی تعریف شده و در گام بعدی این مصالح به قسمت‌های مختلف مقطع دیوار که به صورت فایبر تعریف می‌شوند اختصاص داده می‌شود. پس از معرفی مقطع المان ستون بین دو گرهِ از پیش تعریف شده که مشخص‌کننده مختصات بالا و پایین دیوار برشی می‌باشند ترسیم می‌گردد. این روش به علت استفاده تنها از یک المان طولی نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی ساده

بوده و دارای محدودیت‌های زیادی در ارائه نتایج خروجی می‌باشد.

۳-۲-۲- مدل‌سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان‌های چهارگوشه‌ای

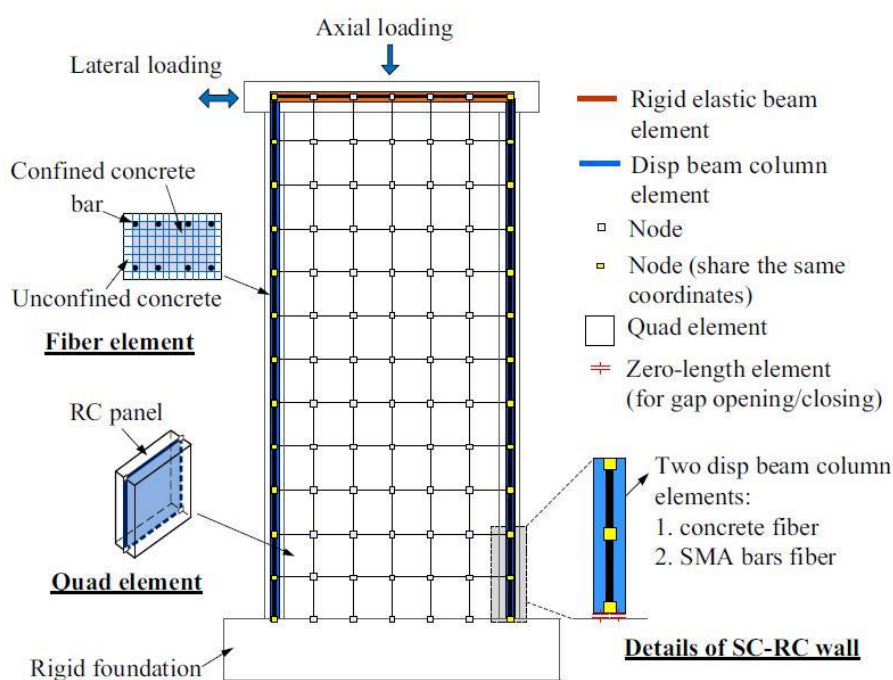
در این روش از مدل‌سازی دیوار برشی که وانگ و ژو [۲۵] در مطالعه خود به آن پرداخته اند اندرکنش میان نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر دیوار از طریق مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی دیوار برشی در نرم افزار OpenSEES در نظر گرفته می‌شود.

در این روش از المان‌های چهارگوشه مستطیلی تنش مسطح یا تنش صفحه‌ای^۱ که هر کدام از این المان‌های چهارگوشه دارای ۸ درجه آزادی می‌باشند (هر گر دارای دو درجه آزادی در راستاهای انتقالی افقی و قائم در داخل صفحه) جهت مدل‌سازی پانل‌های ناحیه جان دیوار استفاده می‌شود. تقسیم‌بندی جان دیوار به المان‌های کوچک‌تر یا به عبارت دیگر کوچک شدن مش‌بندی جان دیوار در این روش دقت مدل‌سازی را بالا می‌برد. نواحی مرزی دیوارهای برشی بتن مسلح توسط المان‌های فایبر تیر-ستون بر پایه روابط جابه‌جایی^۲ مدل‌سازی می‌شود که استفاده از این المان‌ها مرتبه بالاتری از دقت و همگرایی عددی در هنگام تحلیل را در پی دارد [۲۶]. در نواحی مرزی در قسمت تحتانی دیوار که از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار استفاده می‌شود از دو ستون غیرخطی که هر کدام دارای مقطع فایبر مختص به خود می‌باشند (مقطع فایبر براساس مصالح SMA) و (مقطع فایبر براساس مصالح بتنی) استفاده می‌شود. در قسمت های فوقانی دیوار و در نواحی مرزی که میلگردهای فولادی وجود دارد از یک المان تیر-ستون غیرخطی که شامل مقطع فایبر دارای مصالح ترکیبی (بتن پوشش، بتن هسته و میلگردهای فولادی) استفاده می‌شود. بتن استفاده شده در المان های چهارگوشه ناحیه جان دیوار از Concrete02 بوده و المان‌های چهارگوشه ای دارای ضخامتی هم اندازه با ضخامت دیوار برشی می‌باشند. شکاف بین دیوار برشی و فونداسیون زیرین که در هنگام تحلیل های رفت و برگشتی چرخه‌ای در اثر

^۱ Plane – Stress

^۲ Displacement-Based Relation

گسیختگی بتن رویه ایجاد می‌شود توسط المان‌ها فنر غیرخطی (صرفاً فشاری) که بین گره تحتانی المان تیر- ستون در ناحیه مرزی و گره فونداسیون (در محل اتصال دیواره فونداسیون) مدل‌سازی می‌شود. گره‌های انتهای المان‌های تیر- ستون در نواحی مرزی و گره‌های المان‌های چهار گوشه جان دیوار در ترازهای مختلف می‌بایست در راستاهای انتقالی و دورانی به یکدیگر بسته شوند. در شکل ۳-۱ شماتیکی از نحوه مدل‌سازی دیوار برشی بتنی همراه میلگردهای SMA آورده شده است.



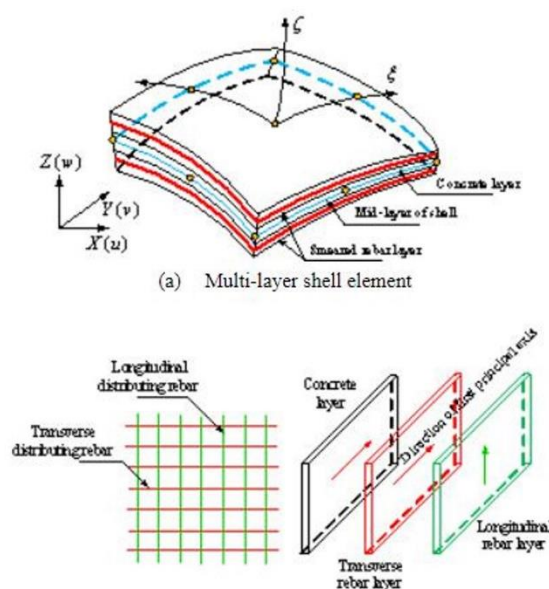
شکل ۳-۱ مدل‌سازی دیوار برشی توسط المان‌های چهار گوشه و المان‌های تیر- ستون غیرخطی [۲۵]

۳-۲-۳- مدل‌سازی دیوار برشی بتنی توسط المان‌های صفحه‌ای لایه لایه

این روش از مدل‌سازی دیوار برشی مبتنی بر اصول مکانیزم مصالح کامپوزیت می‌باشد. در این روش دیوار برشی توسط تعدادی لایه با مشخصات و ضخامت متفاوت مدل‌سازی می‌شود. در این روش ابتدا با استفاده از روابط مقاومت مصالح، کرنش‌ها و انحنای لایه میانی مشخص می‌شود سپس کرنش و یا تغییر شکل‌های لایه‌های دیگر بر اساس اندرکنش میان لایه‌ها و سایر فرضیات مدل‌سازی محاسبه می‌شود. در نهایت تنش در هر لایه و همچنین نیروهای داخلی لایه‌های مختلف بر اساس روابط مقاومت مصالح و اجزای محدود محاسبه می‌گردد.

استفاده از این روش جهت در نظر گرفتن خمش‌های درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای، برش‌های درون صفحه‌ای و همچنین رفتار ترکیبی ناشی از خمش و برش در دیوارهای برشی بتن مسلح مناسب است. همچنین آرماتورهای موجود در دیوار توسط لایه‌های متفاوت در این شیوه مدل‌سازی می‌گردند.

در این روش که بر پایه مطالعات لو و همکاران [۲۷] می‌باشد در ابتدا جهت مدل‌سازی بتن از مصالح بتنی چند بعدی تنش صفحه ای `PlaneStressUserMaterial` استفاده می‌شود جهت مدل‌سازی آرماتورهای طولی و عرضی از مصالح چند بعدی `PlateRebar` استفاده می‌گردد، در ادامه با استفاده از مصالح `PlateFromPlaneStress` مدول برشی یا سختی خارج از صفحه مصالح بتنی در مصالح جدید معرفی می‌شود. در ادامه با استفاده از مقاطع لایه لایه‌ای `LayeredShell` مقطع دیوار برشی مشخص می‌گردد و در نهایت با استفاده از المان‌های چهارگانه‌ای چهار ضلعی که بر پایه روابط دوخطی ایزوتروپیک می‌باشد دیوار برشی بتنی به صورت لایه لایه ای معرفی می‌شود. ذکر این نکته نیز که المان‌های صفحه‌ای چهار گوشه `LayeredShell` با استفاده از برش دورن یابی شده عملکرد خمشی صفحات جدارنازک را بهبود می‌بخشند ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۲-۳ شماتیکی از روش مدل‌سازی لایه‌ای دیوار برشی بتنی آورده شده است.



شکل ۲-۳ مدل‌سازی دیوار برشی بتن مسلح به صورت لایه‌ای در نرم‌افزار OpenSEES [۲۷]

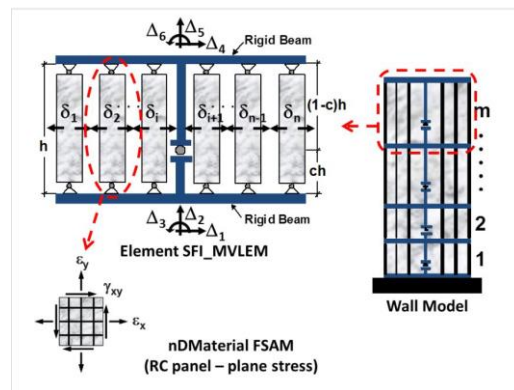
۳-۲-۴- مدل سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از المان های قائم چندتایی

در این روش مدل سازی دیوار برشی از المان قائم چندتایی خطی که به اختصار $SFI-MVLEM^1$ نامیده می شوند، استفاده می شود. در این روش همانند دو روش قبلی توضیح داده شده، اندرکنش میان نیروی محوری وارد بر دیوار برشی و لنگر خمشی ایجاد شده تحت نیروهای وارده از طریق مدل سازی دیوار با المان های قائم چندتایی که به صورت موازی هم مدل می شوند، در نظر گرفته می شود. مدل سازی دیوار از طریق المان های قائم چندتایی بر پایه مطالعات کلوزواری و همکاران در سال ۲۰۱۵ می باشد [۲۸].

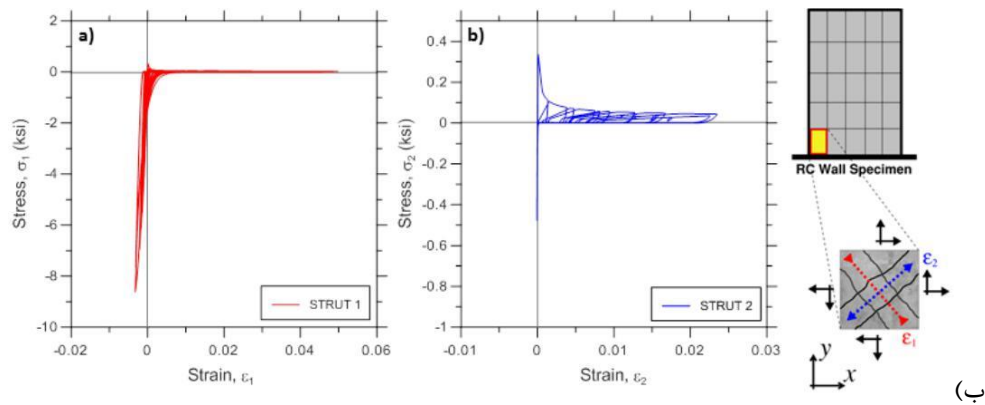
روش مدل سازی دیوار با المان های قائم چندتایی علاوه بر دیوارهای بتنی جهت مدل سازی ستون های بتنی نیز کاربرد دارد. در این روش دیوار با استفاده از تعدادی پانل بتن مسلح که از مصالح $FSAM^2$ بهره می برند، مدل می شود. المان های $SFI-MVLEM$ در فضای دوبعدی کاربرد داشته که هر کدام دارای شش درجه آزادی شامل سه درجه آزادی در هر انتهای المان می باشند (درجات آزادی انتقالی در راستاهای افقی و قائم و درجه آزادی دورانی حول محور عمود بر صفحه مدل سازی). ساختار در نظر گرفته شده برای مدل سازی دیوار در این روش به صورت یک سری المان دو سرفصل موازی به ازای هر ماکروفاایر، رفتار برشی و دورانی المان است. پس از معرفی تعداد ماکروفاایرهای مورد نیاز جهت معرفی مقطع دیوار، مشخصات مرکز دوران المان به صورت نسبت فاصله آن تا گره ابتدایی المان در نظر گرفته می شود. در ادامه ضخامت و پهنای هر ماکروفاایر، نسبت سطحی فولاد در ماکروفاایر شماره تگ مصالح بتنی و فولادی به صورت آرایه ای از اعداد و در انتهای دستور شماره تگ مصالح برشی المان معرفی می شود. در شکل ۳-۳ شماتیک مدل سازی دیوار برشی بتنی به روش المان های قائم چندتایی آورده شده است.

^۱ Multiple Vertical Line Element Model

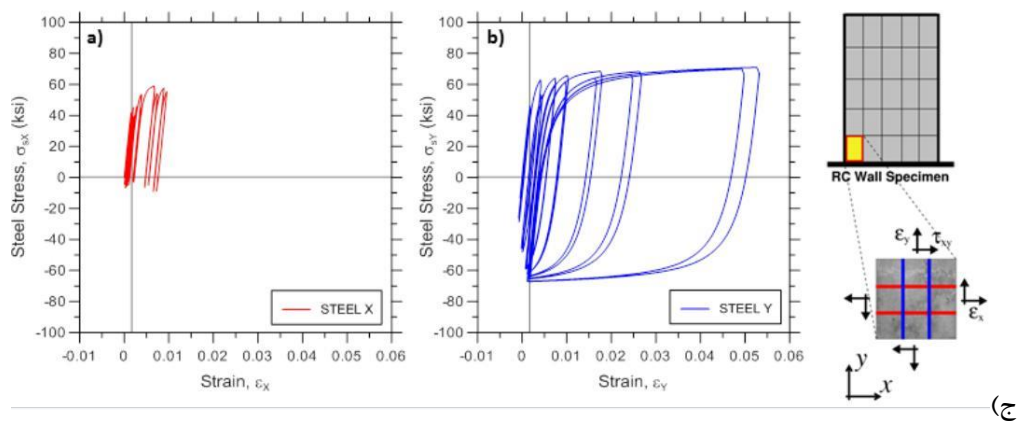
^۲ Fixed Strut Angel



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۳ مدل سازی دیوار برشی بتنی به روش SFI-MVLEM [۲۷]

(الف) نمایش ماکروفاایبرها در مقطع دیوار (ب) نمودار رفتاری بتن در هر پانل دیوار (ج) رفتار میلگردهای فولادی در هر پانل

۳-۳- مشخصات مدل های اعتبارسنجی مورد مطالعه

در این تحقیق از سه مقاله آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی استفاده شده است.

۳-۳-۱- مدل اعتبارسنجی اول

در مقاله اول که توسط عبدالرضا و پالرمو [۵] 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 - جابه جایی گره بالای دیوار رسم شده اند. برای تشخیص بهتر نوع دیوارها از حروف مشخصه W1-SR که S حرف نشانگر دیوار دارای میلگرد فولادی شکل‌پذیر معمولی Steel و حروف مشخصه W2-NR که N حرف نشانگر دیوار دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل - تیتانیوم) و فولاد نرمه^۱ می‌باشد استفاده شده است. مشخصات و پارامترهای دیوارها از مطالعات عبدالرضا و پالرمو [۵] انتخاب شده اند.

۳-۳-۱-۱- مشخصات دیوار برشی بتنی دارای میلگردهای فولادی W1-SR

دیوار دارای میلگردهای فولادی شکل‌پذیر دارای مقطعی مستطیلی به ابعاد 150×1000 میلی‌متر می‌باشد که در آن عرض دیوار و ۱۵۰ ضخامت دیوار می‌باشد. ارتفاع دیوار ۲۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که منجر به نسبت ابعادی $2/2$ (ارتفاع تقسیم بر عرض) می‌شود. رفتار حاکم بر دیوارهای برشی انتخاب شده باتوجه به نسبت ابعادی دیوار رفتار خمشی می‌باشد.

۳-۳-۱-۱-۱- مشخصات میلگردها در دیوار W1-SR

طراحی دیوار بر اساس جزئیات لرزه‌ای دیوارهای شکل‌پذیر مطرح شده در آیین نامه بتن کانادا A23.3-04 [۲۹] انجام شده است. دو ردیف میلگرد در راستاهای متعامد افقی و قائم در داخل جان دیوار قرار گرفته است. میلگردهای قائم داخل جان شامل ۳ ردیف دوتایی از میلگرد 10M (با قطر $11/3$ میلی‌متر و مساحت مقطع 100 میلی‌متر) با فاصله یکنواخت ۱۵۰ میلی‌متر قرار گرفته اند. میلگردهای فولادی در ردیف افقی شامل ۱۵

^۱ Steel Deformed

ردیف دوتایی از میلگرد 10M با فاصله یکسان ۱۵۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنابراین درصد آرماتورهای طولی دیوار برشی درراستاهای افقی وقائم جان به میزان ۰/۸۸٪ محاسبه می‌گردد. در جدول ۱-۳ مشخصات میلگردهای 10M آورده شده است [۲۵].

جدول ۱-۳ مشخصات میلگردهای فولادی 10M [۲۵]

نوع میلگرد فولادی	تنش تسلیم (Mpa) f_y	تنش نهایی (Mpa) f_u	مدول الاستیک (Gpa) E_s
M10	۴۲۵	۶۱۵	۲۰۵

میلگردهای فولادی قائم در داخل نواحی مرزی دیوار شامل ۴ عدد میلگرد 10M می‌باشد که جهت جلوگیری از کمانش میلگردهای قائم در نواحی مرزی از میلگردهای عرضی دور گیر بسته با شماره 10M استفاده گردیده است.

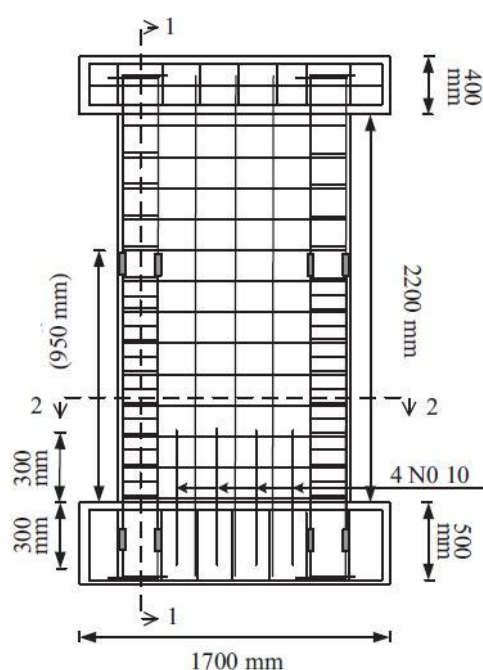
۳-۳-۱-۲- ابعاد ناحیه مفصل پلاستیک در دیوار W1-SR

طول قائم ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک^۱ در دیوار W1-SR 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 صفحه ای بیشتر در این منطقه فاصله بین میلگردهای عرضی دور گیر 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. به علاوه ۴ عدد میلگرد فولادی 10M به طول ۶۰۰ میلی‌متر از فونداسیون به جان دیوار به صورت قائم قرار گرفته‌اند. ۳۰۰ میلی‌متر از طول این میلگردها در داخل فونداسیون و ۳۰۰ میلی‌متر دیگر در داخل جان دیوار امتداد یافته‌اند. میلگردهای فوق تنها به منظور افزایش مقاومت دیوار برشی در برابر لغزش‌های جانبی در تحلیل‌های چرخه‌ای یا جلوگیری از لغزش در ناحیه اتصال جان دیوار به فونداسیون زیرین در هنگام

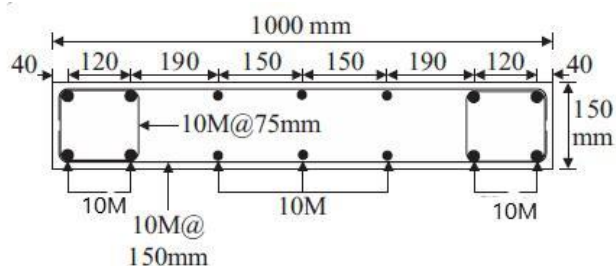
^۱ Plastic Hinge Zone

ورود نیروهای جانبی، در داخل دیوار برشی جایگذاری می‌شود.

علاوه بر موارد گفته شده در بالا تیر بتنی با درصد آرماتورهای فولادی زیاد در قسمت فوقانی دیوار قرار گرفته است. دلیل استفاده از این تیر که در آزمایشگاه به صورت همزمان همراه با دیوار بتن‌ریزی می‌شود، ایجاد ناحیه‌ای برای اعمال نیروهای جانبی و ثقلی وارد بر دیوار برشی در طول تحلیل‌های چرخه‌ای می‌باشد. در شکل ۳-۴ مقطع عرضی و نمای جانبی دیوار برشی W1-SR به همراه ابعاد فونداسیون زیرین و تیر فوقانی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۴ مقطع طولی و عرضی دیوار برشی W1-SR [۵]

(الف) نمای جانبی ب) مقطع عرضی ۲-۲

۳-۱-۲-۳- مشخصات دیوار برشی بتنی دارای میلگردهای ترکیبی فولاد نرمه و آلیاژ حافظه‌دار

W2-NR

ابعاد دیوارهای دارای میلگردهای فولادی و مصالح SMA نیز دارای ابعاد مشابهی با دیوار W1-SR دارد. ضخامت دیوار ۱۵۰ میلی‌متر و دارای عرضی برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع دیوار ۲۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که با تقسیم میزان ارتفاع بر عرض دیوار به نسبت ابعادی ۲/۲ خواهیم رسید. رفتار حاکم بر این دیوار نیز از نوع شکل‌پذیر همراه اثرات هم‌زمان برش - خمش و نیروی محوری می‌باشد. دیوار برشی بر روی فونداسیونی به ابعاد سطح مقطع ۱۷۰۰ در ۱۴۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر قرار گرفته است. در قسمت بالای دیوار برشی تیری به ابعاد مقطع ۴۰۰ در ۱۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر جهت پخش نیروی جانبی به طور یکنواخت در طول دیوار و نیروی ثقلی وارده به دیوار می‌باشد.

۳-۱-۲-۱-۳- مشخصات آرماتورهای فولادی و حافظه‌دار در دیوار W2-NR

دیوار W2-NR که از آرماتورهای فولادی شکل‌پذیر فولادی و آرماتورهایی با آلیاژ حافظه‌دار تشکیل شده در ناحیه جان همانند دیوار W1-SR در راستای قائم دارای ۳ ردیف دوتایی از میلگردهای M10 بوده و در راستای افقی ۱۵ ردیف دوتایی از میلگردهای مشابه M10 می‌باشد. فاصله بین دو میلگرد متوالی در داخل جان در هر دو راستای طولی و عرضی ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

درصد آرماتورهای طولی و عرضی در داخل جان دیوار W2-NR همانند دیوار W1-SR به میزان ۰/۸۸ درصد می‌باشد.

در نواحی مرزی دیوار W2-NR 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 مفصل پلاستیک از ۴ عدد میلگرد فولادی M15 استفاده شده است. دلیل استفاده از میلگردهای M15 که دارای مقاطع بزرگ تری می‌باشد مقاومت بیش‌تر این شماره از میلگردها در برابر تسلیم یا کمانش طولی می‌باشد.

جهت جلوگیری از کمانش میلگردهای طولی SMA و M15 درنواحی مرزی همانند دیوار برشی W1-SR از میلگردهای عرضی دورگیر M10 با فاصله ۷۵ میلی‌متر در ناحیه مفصل پلاستیک و ۱۵۰ میلی‌متر در خارج از ناحیه مفصل پلاستیک استفاده شده است. فاصله کمتر میلگردهای عرضی در ناحیه ایجاد مفصل پلاستیک، باعث نیروهای بیش‌تر در این ناحیه و امکان کمانش بیش‌تر میلگردهای طولی می‌باشد. در جدول ۲-۳ مشخصات مربوط به میلگرد M15 آورده شده است [۲۵].

جدول ۲-۳ مشخصات میلگردهای فولادی M15 [۲۵]

نوع میلگرد فولادی	تنش تسلیم f_y (Mpa)	تنش نهایی f_u (Mpa)	مدول الاستیک E_s (Gpa)
M15	۴۴۰	۶۵۰	۲۰۰

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.

۳-۳-۱-۲-۲-۲-۳-۳ مشخصات میلگردهای SMA استفاده شده در مدل دیوار W2-NR

دلیل استفاده از میلگردهای SMA در دیوار W2-NR بهبود پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار نسبت به دیوار با مصالح فولادی تنها W1-SR می‌باشد. 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^۱ 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 حافظه‌شکلی^۲ نام برد می‌شود. علاوه بر مطالب بالا مصالح SMA می‌توانند انرژی ورودی به سازه‌ها را از طریق خاصیت میرایی چرخه‌ای مستهلک کرده و

^۱ Super Elastic Effects

^۲ Shape Memory Effects

ظرفیت‌های جابه‌جایی و مقاومتی المان‌های سازه‌ای را در مقایسه با میلگردهای فولادی معمول افزایش دهند. در مدل دیوار W2-NR 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 As_{fy} یا نیروی ایجاد شده توسط آرماتورهای طولی M10 در نواحی مرزی در مدل

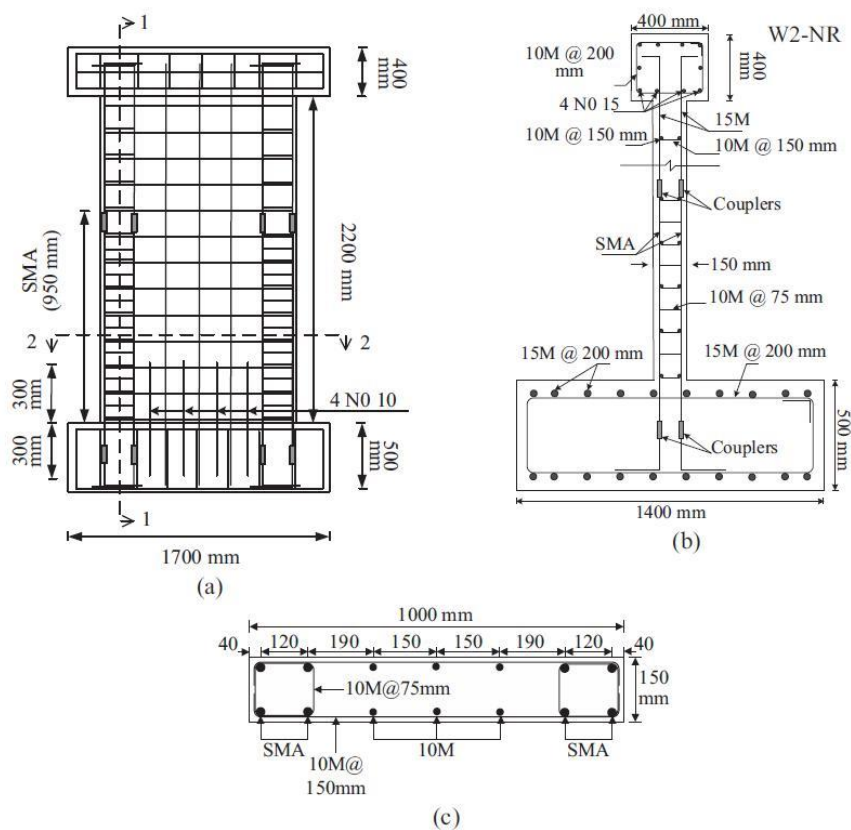
W1-SR

در مدل دیوار با میلگردهای ترکیبی فولاد و SMA، W2-NR همانند دیوار با میلگردهای فولادی تنها W1-SR فونداسیونی با ابعاد مقطع ۱۷۰۰ در ۱۴۰۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر در زیر دیوار و تیر بتنی با ابعاد ۱۵۰۰ در ۴۰۰ و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر در قسمت فوقانی قرار گرفته‌اند. به منظور اتصال میلگردهای M15 در ناحیه مرزی خارج از نواحی در نظر گرفته شده جهت تشکیل مفصل پلاستیک، با میلگردهای SMA در نواحی مرزی داخل ناحیه مفصل پلاستیک از وصله‌های مکانیکی با مقاومت بالا استفاده شده است. به صورتیکه طول این وصله‌های مکانیکی ۱۵۰ میلی‌متری باشد و مرز بین ناحیه ایجاد مفصل پلاستیک و نواحی بیرونی رو مشخص می‌کند. مقداری از طول میلگردهای SMA و M15 در داخل وصله‌های مکانیکی قرار گرفته که این همپوشانی جهت چفت و بست شدن دو میلگرد از جنس‌های متفاوت به یکدیگر و انتقال نیروهای ایجاد شده تحت بارهای چرخه‌ای از میلگردهای فوقانی دیوار به میلگردهای تحتانی در نظر گرفته شده است. در شکل ۳-۵ مدل اصلاح شده وصله‌های مکانیکی به کار رفته در دیوار W2-NR نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ وصله مکانیکی اتصال دهنده میلگردهای SMA و میلگردهای فولادی M15 [۵]

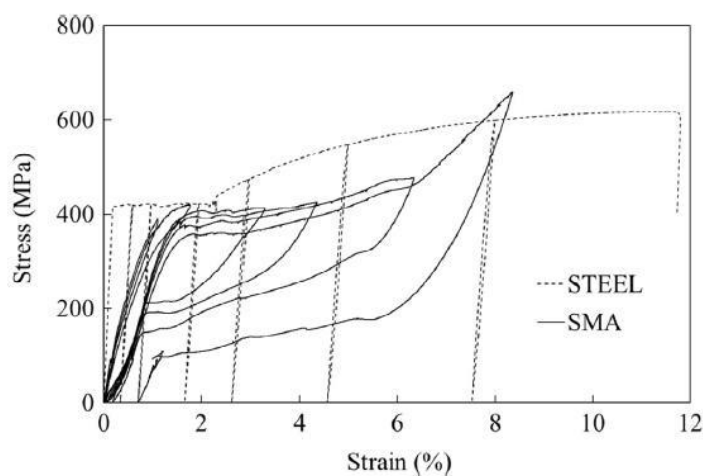
در مدل اولیه المان‌های اتصال دهنده مکانیکی در کارخانه با تعداد ۶ عدد پیچ با انتهای تیز گوشه در هر ردیف اتصال دهنده ساخته می‌شود. آزمایش کششی بر روی وصله‌های مکانیکی در حالی که از یک سمت وصله میلگردهای SMA و از سمت دیگر میلگردهای فولادی M15 قرار گرفته اند باعث ایجاد لغزش‌های فراوانی در سطح میلگردهای SMA به دلیل داشتن سطح صیقلی و فاقد اصطکاک می‌شود به منظور بهبود عملکرد اتصال دهنده‌ها، شش عدد پیچ تیز گوشه اضافی در دو ردیف انتها و ابتدا اتصال دهنده‌ها ایجاد می‌شود. در شکل ۳-۶ نمای جانبی و برش‌های طولی و عرضی دیوار W2-NR نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ جزئیات آرماتور گذاری در دیوار W2-NR [۵]

الف) نمای جانبی دیوار ب) مقطع طولی ۱-۱ ج) مقطع عرضی ۲-۲

در شکل ۳-۷ پاسخ تنش-کرنش چرخه‌ای مصالح SMA و میلگردهای فولادی شکل‌پذیر بر اساس آزمایش‌های کششی بر روی نمونه ۳۰۰ میلی‌متری از میلگرد SMA با قطر ۱۲/۷ میلی‌متر آورده شده است.



شکل ۳-۷ مقایسه پاسخ چرخه‌ای تنش - کرنش مصالح SMA و فولاد شکل‌پذیر [۵]

با دقت در شکل بالا مشاهده می‌شود که کرنش‌های پسماند دو مصالح پس از تکمیل فرایند باربرداری تفاوت‌های ملموسی با یکدیگر دارند. در طول بارگذاری چرخه آخر میلگردهای SMA دارای کرنشی معادل $8/4\%$ را تجربه می‌کنند، در هنگام باربرداری از مصالح این مقدار کرنش ماندگار به مقدار $72/0\%$ می‌رسد که این نشانگر ظرفیت جبران ۹۱ درصدی در میلگردهای SMA می‌باشد. درحالی‌که در مصالح فولادی میزان کرنش در چرخه آخر بارگذاری به میزان ۸ درصد می‌باشد که در هنگام باربرداری مجدد کرنش ماندگار به میزان ۷.۵ درصد می‌رسد این امر نشان‌دهنده ظرفیت ترمیم $7/5$ درصدی کرنش برای میلگردهای فولادی می‌باشد. دلیل عمده استفاده روزافزون از مصالح مسلح کننده SMA توانایی بالای این مصالح در جبران کرنش‌ها و تغییر شکل‌های چرخه‌ای ایجاد شده در المان‌های سازه به هنگام برداشته شدن بار وارده در مقایسه با میلگردهای فولادی معمول می‌باشد.

۳-۳-۱-۳-۲-۳- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی W1-SR و W2-NR

نحوه بارگذاری چرخه ای مدل‌ها طبق پروتکل ATC24 انجام شده است. در جدول ۳-۳ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای آورده شده است.

جدول ۳-۳ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای مدل W1-SR و W2-NR

مقادیر دریافت (%)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۵	۲	۳	۴
---------------------	-----	------	-----	------	---	-----	---	---	---

۳-۳-۲- مدل اعتبارسنجی دوم و سوم

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 [۶] می‌باشد. مدل دوم یک ستون با میلگرد های

SMA و بتن شکل پذیر¹ ECC است که از مطالعات سعیدی و همکاران [۷] می‌باشد. هر دو مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و نمودارهای مربوط به برش پایه - جابه جایی رسم شده است. برای تشخیص بهتر نوع مدل ها از حروف مشخصه WSH3 برای دیوار برشی و RNE برای ستون که N حرف نشانگر ستون دارای مصالح ترکیبی NiTi (نیکل - تیتانیوم) و E نشانگر بتن شکل پذیر ECC می‌باشد.

۳-۳-۱-۲-۳-۳ مشخصات دیوار برشی WSH3

دیوار دارای میلگردهای فولادی شکل پذیر دارای مقطعی مستطیلی به ابعاد 150×2000 میلی متر می‌باشد که در آن عرض دیوار و ۱۵۰ ضخامت دیوار می‌باشد. ارتفاع دیوار ۴۵۶۰ میلی متر می‌باشد که منجر به نسبت ابعادی $2/3$ (ارتفاع تقسیم بر عرض) می‌شود. رفتار حاکم بر دیوارهای برشی انتخاب شده باتوجه به نسبت ابعادی دیوار رفتار خمشی می‌باشد.

۳-۳-۱-۱-۲-۳-۳ مشخصات میلگردها در دیوار WSH3

طراحی دیوار بر اساس جزئیات دستورالعمل لرزه‌ای اروپا EuroCode 08 [۳۰] انجام شده است. دو ردیف میلگرد در راستاهای متعامد افقی و قائم در داخل جان دیوار قرار گرفته است. میلگردهای قائم داخل جان شامل ۱۱ ردیف دوتایی از میلگرد با قطر ۸ میلی متر با فاصله یکنواخت ۱۲۵ میلی متر قرار گرفته اند. میلگردهای فولادی در ردیف افقی شامل ۳۳ ردیف دوتایی از میلگرد ۶ میلی متر با فاصله یکسان ۱۵۰ میلی متر از یکدیگر قرار گرفته اند. بنابراین درصد آرماتورهای طولی دیوار برشی در راستاهای افقی و قائم جان به میزان 0.54% محاسبه می گردد.

میلگردهای فولادی قائم در داخل نواحی مرزی دیوار شامل ۴ عدد میلگرد با قطر ۱۲ میلی متر می‌باشد که جهت جلوگیری از کماتش میلگردهای قائم در نواحی مرزی از میلگردهای عرضی دورگیر بسته با قطر $4/2$ میلی متر با فاصله قائم ۷۵ میلی متر استفاده گردیده است. مشخصات میلگردها تحت آزمایش کشش تک محوری

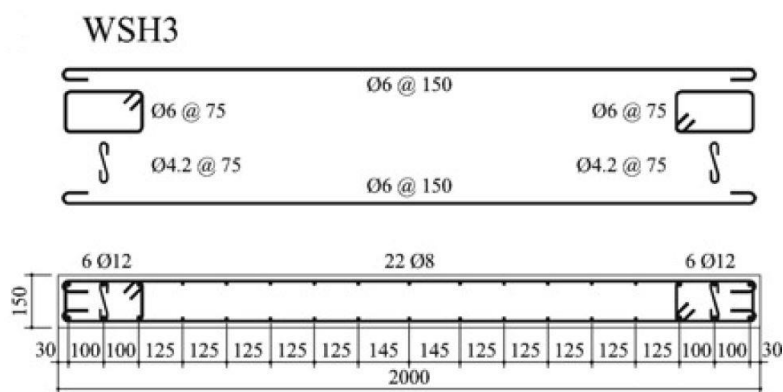
^۱ Engineered cementitious composite

با طول خالص ۷۵۰ میلی‌متر توسط دازیو و همکاران [۶] بدست آمده است که در جدول ۳-۴ مشخصات آنها آورده شده است.

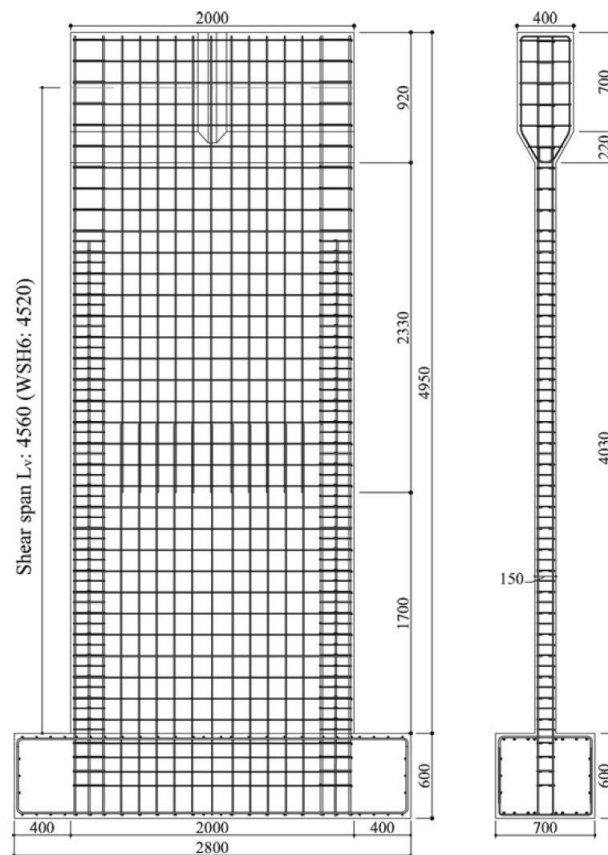
جدول ۳-۴ مشخصات میلگردهای فولادی [۶]

نوع میلگرد فولادی (mm)	تنش تسلیم f_y (Mpa)	تنش نهایی f_u (Mpa)	مدول الاستیک E_s (Gpa)
۴/۲	۵۶۲	۶۱۵	۲۰۰
۶	۴۸۹	۵۵۲	۲۰۰
۸	۵۶۹	۷۰۰	۲۰۰
۱۲	۶۰۱	۷۲۵	۲۰۰

در شکل ۳-۸ مقطع عرضی دیوار برشی با جزئیات میلگرد گذاری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-۹ نمای روبرو و جانبی دیوار برشی WSH3 به همراه ابعاد فونداسیون زیرین نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ مقطع عرضی دیوار برشی با جزئیات میلگرد گذاری [۶]



شکل ۳-۹ نمای روبرو و جانبی دیوار برشی WSH3 [۶]

۳-۳-۲-۱-۲- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی WSH3

نحوه بارگذاری چرخه ای مدل WSH3 طبق پروتکل پیشنهادی پارک [۳۱] انجام شده است. در جدول ۳-۳

۵ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای آورده شده است.

جدول ۳-۵ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای مدل WSH3

مقادیر دریافت (%)	۰/۲۵	۰/۶	۱	۱/۳	۱/۶	۲
---------------------	------	-----	---	-----	-----	---

۳-۳-۲-۲-مشخصات ستون RNE

ستون ارائه شده در این مطالعه به صورت ارتجاعی با قابلیت رسیدن به دریفتهای زیاد تا ۱۲٪ می باشد. آلیاژ حافظه دار شکلی (SMA) تغییر مکان جانبی ماندگار را به حداقل می رساند و بتن شکل پذیر (ECC) آسیب ها را به حداقل می رساند.

مصالص SMA بسیار گران است اما نیتینول (NiTi) که برای این مطالعه انتخاب شده است به دلیل در دسترس بودن و تقاضای نسبتاً زیاد آن در سایر زمینه ها یکی از ارزان ترین انواع SMA ها می باشد. ECC یک بتن مرکب تقویت شده با فیبر و دارای عملکرد بالا است. این بتن شکل پذیر در اثر رفتار سخت شوندگی کرنشی، مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی از خود نشان می دهد [۳۲]. در این مطالعه بتن ECC تقویت شده با الیاف پلی وینیل الکل (PVA) استفاده شد.

۳-۳-۲-۱-ابعاد ستون RNE

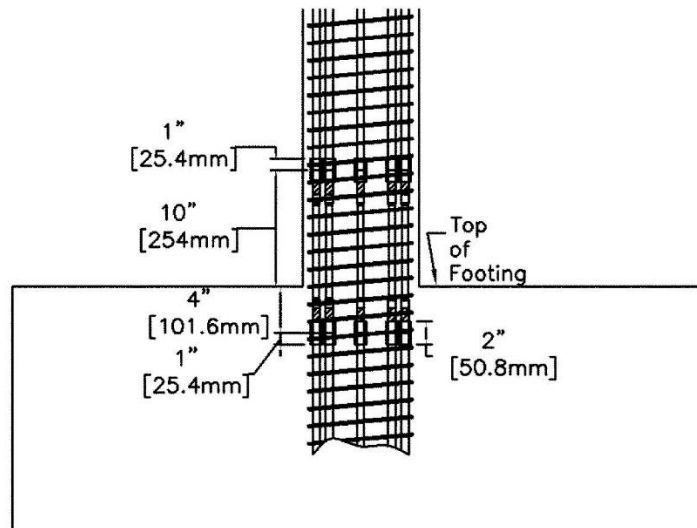
تمرکز این مطالعه بر روی رفتار خمشی ستون ها بود. برای اطمینان از حاکم بودن رفتار خمشی و جلوگیری از شکست برشی، از نسبت بُعدی (ارتفاع کنسول به قطر ستون) $4/5$ و نسبت میلگرد طولی ۲٪ و فولاد عرضی مطابق با دستورالعمل LRFD طراحی لرزه ای پل ها بزرگراهی ارائه شده توسط Friedland و Mayes [۳۳] استفاده شده است.

ستون ها با قطر ۱۰ اینچ (۲۵۴ میلی متر) و ارتفاع ۴۵ اینچ (۱۱۴۳ میلی متر) از بالای پایه تا مرکز محل اثر بار جانبی می باشد. یک مکعب بتنی به بعد ۲۰ اینچ (۵۰۸ میلی متر) در بالای ستون جهت انتقال بار جانبی از دستگاه محرک قرار داده شد.

۳-۳-۲-۲-محل مفصل پلاستیک ستون RNE

مدل RNE برای ارزیابی تاثیر استفاده از NiTi و ECC طراحی شده اند. این مصالح فقط در محل مفصل پلاستیک برای به حداقل رساندن هزینه استفاده شده اند. شکل ۳-۱۰ [۷] جزئیات محل مفصل پلاستیک را

برای مدل RNE نشان می دهد. طول کلی میله های NiTi، ۱۴ اینچ (۳۵۵/۶ میلی متر) و قطر آن ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی متر) می باشد.



شکل ۳-۱۰ جزئیات محل مفصل پلاستیک مدل RNE [۷]

۳-۳-۲-۲-۳-۳- مشخصات میلگرد های ستون RNE

ستون RNE با هشت میلگرد طولی با فواصل مساوی در یک الگوی دایره ای میلگرد گذاری شده است. آرماتورهای طولی با هشت میله NiTi به قطر ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی متر) در محل مفصل پلاستیک و میلگرد فولادی با قطر ۱۶ میلی متر و درجه ۶۰ در بقیه ستون تقویت شدند. آرماتورهای عرضی با استفاده از دستورالعمل طراحی لرزه ای پل های بزرگراهی NCHR12-49 [۳۳] طراحی شده اند، آرماتور عرضی مارپیچ شامل کابل فلزی گالوانیزه به قطر ۴/۵ میلی متر با گام های ۱/۵ اینچ (۳۸/۱ میلی متر) بود. همچنین کاور بتن به مقدار ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی متر) در نظر گرفته شد. در جدول ۳-۶ مشخصات مربوط به میلگرد فولادی و SMA آورده شده است.

جدول ۳-۶ مشخصات میلگردهای فولادی M15 و SMA [۲۵]

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

۳-۳-۲-۴- مشخصات بتن ستون RNE

مقاومت فشاری بتن معمولی ۲۸ روزه ۵۲۱۷ psi (۳۶mpa) بود. مخلوط ECC حاوی ۱/۳۵ وزنی و ۲ درصد حجمی الیاف pva بود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط ECC ۴۷۴۶ psi (۳۲/۷ mpa) بود.

۳-۳-۲-۵- پروتکل بارگذاری مدل اعتبارسنجی RNE

نحوه بارگذاری چرخه ای مدل RNE طبق پروتکل پیشنهادی سعیدی و همکاران [۷] انجام شده است. در جدول ۳-۷ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای آورده شده است.

جدول ۳-۷ مقادیر دریافت هر گام از تحلیل چرخه ای مدل RNE

مقادیر دریافت (%)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۳	۴	۵	۷	۱۰	۱۲
-------------------	-----	---	-----	---	---	---	---	---	----	----

۳-۳-۳- معرفی مصالح Self Centering مدل کننده میلگردهای SMA در نرم افزار

جهت مدل سازی مصالح SMA در نرم افزار OpenSEES از مصالح Self Centering که دارای رفتار چرخه ای شبه پرچمی^۱ می باشند، استفاده شده است که در ادامه نمودار چرخه ای مصالح Self Centering و پارامترهای عددی این مصالح آورده شده است. از مصالح Self Centering عمدتاً در مدل سازی مهاربندهای مستهلک کننده انرژی خودمحور^۲ همراه با گزینه مدل سازی لغزش یک فیوز اصطکاکی خارجی (که موجب تغییر شکل

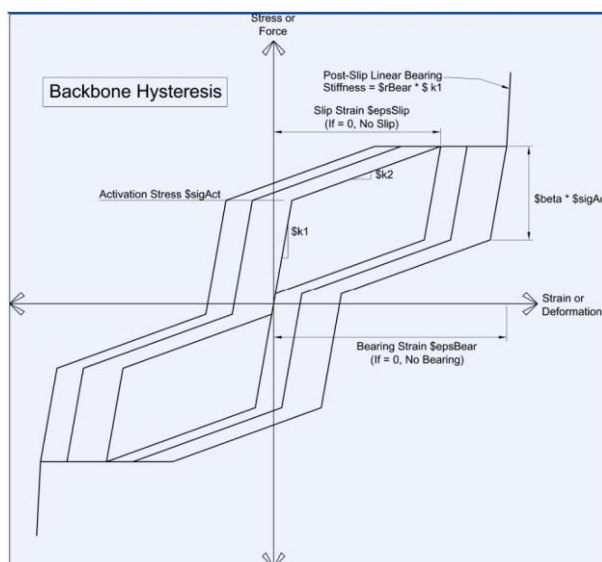
^۱ Flagged Shape Hysteretic Behavior

^۲ Self Centering Energy Dissipative (SCED)

غیرقابل بازگشت در ناحیه پس از کرنش معرفی شده در مهاربند می‌شود) استفاده می‌گردد. در واقع استفاده از فیوز اصطکاکی جهت محدود کردن نیروی محوری مهاربند به کار برده می‌شود. گزینه تکیه‌گاه^۱ برای مدل‌سازی تقریبی تکیه‌گاه پیچی در مهاربند و یا مکانیزم فیوز خارجی کاربرد داشته که منجر به افزایش شدید سختی محوری مهاربند می‌شود [۳۴]. از این مصالح در هر گونه سیستمی که دارای رفتار شبه پرچمی باشد می‌توان استفاده کرد. در جدول ۳-۸ پارامترهای عددی مصالح Self Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA آورده شده است [۳۵]. در شکل ۳-۱۱ نمودار چرخه‌ای مصالح شبه پرچمی Self Centering در نرم‌افزار OpenSEES نشان داده شده است.

جدول ۳-۸ پارامترهای عددی مصالح Self Centering جهت مدل‌سازی میلگردهای SMA [۳۵]

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



شکل ۳-۱۱ نمودار چرخه‌ای مصالح شبه پرچمی Self Centering در نرم‌افزار OpenSEES [۳۴]

^۱ Bearing

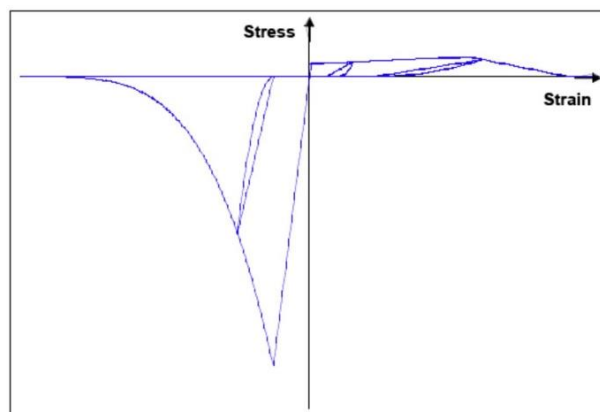
۳-۳-۴- معرفی مشخصات مصالح بتنی در نرم افزار

جهت مدل سازی دقیق تر دیوارهای برشی در نرم افزار از دو رده بتنی شامل بتن پوشش و بتن هسته استفاده می شود. در روش مدل سازی انتخاب شده برای نواحی جان دیوار از بتن پوشش و جهت مدل سازی بتن نواحی مرزی از بتن هسته استفاده می شود که در ادامه مشخصات هر کدام از بتن های مصرفی آورده شده است.

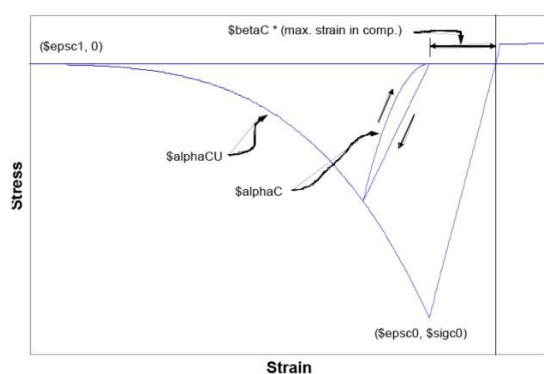
۳-۳-۴-۱- مشخصات بتن ECC استفاده شده در ستون RNE

شکل پذیری بالای بتن ECC باعث رفتار شبه الاستیک تحت فشار در آن می شود و این باعث می شود کرنش های فشاری بزرگ را بدون ازدست دادن کامل ظرفیت خود تجربه کند. ECC توانایی رسیدن به کرنش کششی نهایی تقریبی تا ۵ درصد می باشد [۳۲]. این ظرفیت بالای کرنشی (تقریباً ۵۰۰ برابر بزرگتر از بتن قراردادی) در اثر رفتار سخت شدگی کرنشی و ترک های خاص در ECC می باشد [۳۶]. هنگامی که بتن ECC تحت بار کششی قرار می گیرد، تعداد زیادی ریز ترک های نازک و با فاصله نزدیک در آن تشکیل می شود، در حالی که در بتن معمولی تغییر شکل ها به صورت تعداد کمی ترک با عرض زیاد می باشد. ریز ترک ها پیوسته باعث توزیع نیرو در بتن افزایش مقاومت آن می شوند و این رفتار مشابه سخت شدگی کرنشی فلزات شکل پذیر می باشد [۳۲].

بتن ECC در نرم افزار OpenSEES با دستور ECC01 که توسط Han و همکاران [۳۷] توسعه داده شده، مدل می شود. این دستور منحنی رفتاری ECC را به صورت خطی مدل می کند. در شکل ۳-۱۲ منحنی رفتاری مصالح ECC01 نشان داده شده است. پارامترهای مدل سازی ECC بر اساس مطالعات Kesner و Bilington [۳۸] استفاده شده است. بر اساس گزارش سعیدی و همکاران [۷]، در روز آزمایش مقاومت فشاری ECC ۳۵/۸ مگاپاسکال و مدول گسیختگی ۲۵ مگاپاسکال می باشد. محصوریت بتن ECC طبق توصیه مقاله مرجع بر اساس مدل پیشنهادی Chang و Mander [۳۹] اعمال شده است.

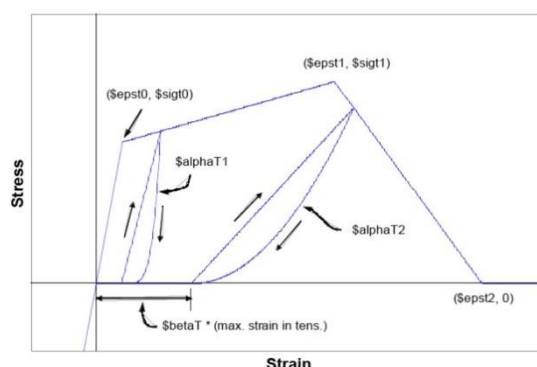


(الف)



Strain

(ج)



Strain

(ب)

شکل ۳-۱۲ الف) منحنی رفتاری مصالح ECC01 ب) ناحیه فشاری ج) ناحیه کششی [۳۷]

۳-۴-۳-۲- مشخصات بتن محصور نشده استفاده شده در ناحیه جان دیوار

مشخصات بتن محصور نشده در ناحیه جان دیوارهای W1-SR و W2-NR و WSH3 مطابق جدول ۳-۹

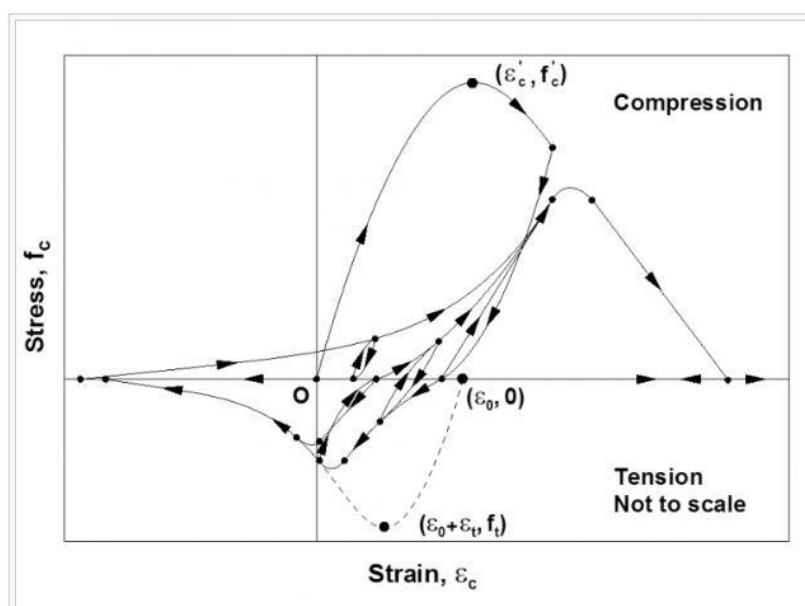
می باشد [۵].

جدول ۳-۹ مشخصات بتن غیر محصور استفاده شده در دیوارهای W1-SR و W2-NR

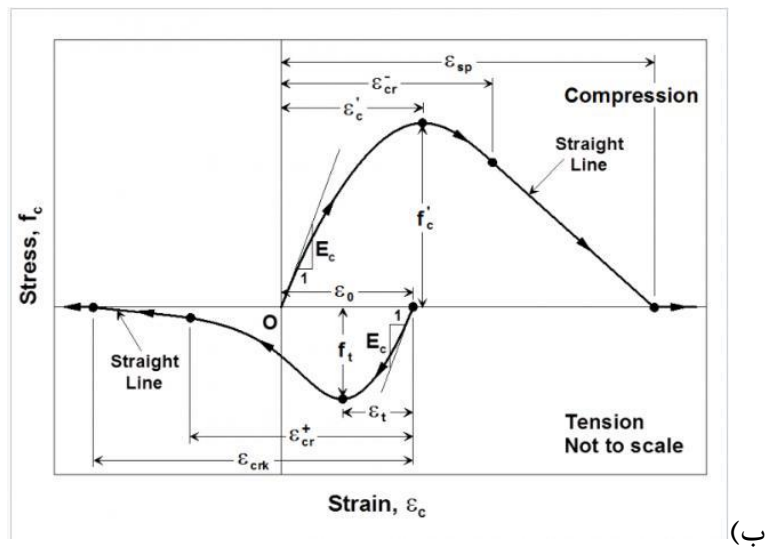
نام دیوار	مقاومت مشخصه بتن (Mpa)	کرنش در حداکثر تنش فشاری	مدول الاستیک (Gpa)	تنش کششی حداکثر (Mpa)	کرنش در حداکثر تنش کششی
W1-SR	۳۰/۵	۰/۰۰۲۷	۲۹/۵۴۱	۳/۴۲	۰/۰۰۰۲۳۱۸
W2-NR	۳۱/۶	۰/۰۰۲۶	۲۹/۹۳۶	۳/۴۸	۰/۰۰۰۲۳۲۸
WSH3	۳۹/۲	۰/۰۰۲۱۷	۳۵/۲	۳/۹	۰/۰۰۰۲۲۱۶

جهت مدل سازی مصالح بتنی در نرم افزار از مصالح بتنی ConcreteCM بر مبنای مطالعات انجام شده توسط Kolozvari و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۴۰] ایجاد شده است. با استفاده از این مصالح می توان رفتار چرخه ای بتن در دو حالت محصور شده و محصور نشده را در کشش و فشار مدل سازی کرد. بتن ConcreteCM مدلی بر پایه مدل رفتاری بتن Chang و Mander که در سال ۱۹۹۴ توسعه داده شده بود می باشد [۳۹].

این مدل ارائه شده برای بتن مدلی بهبود یافته، قاعده محور، تعمیم یافته و بدون بعدی می باشد که به استفاده کننده اجازه کالیبره کردن پارامترهای مدل سازی مصالح در تحلیل های چرخه ای و یکنواخت یک جهته را می دهد. هم چنین این مدل از مصالح می تواند بتن های معمولی و با مقاومت بالا را مدل سازی کند. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا این مدل از بتن نمایشگر شاخص های رفتاری مهمی می باشد که از جمله می توان به رفتار چرخه ای پیوسته تحت بارهای فشاری و کششی سیکلی، کاهش تدریجی سختی به علت افزایش کرنش های وارده در هر مرحله از بارگذاری چرخه ای و تأثیرات مربوط به بسته شدن تدریجی ترک های ایجاد شده در بتن اشاره نمود. در شکل ۳-۱۳ رفتار چرخه ای بتن ConcreteCM در نرم افزار OpenSEES نشان داده شده است.



(الف)



باتوجه به شکل بالا این نکته مشخص می‌شود که وجود میلگردهای عرضی در مقطع باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت و شکل‌پذیری بتن می‌شود. محققان مدل‌های بسیاری را برای در نظرگیری اثرات محصورشدگی در مقاطع بتنی دایره‌ای و مستطیلی ارائه داده‌اند. این نتیجه به دست آمده که حلقه‌های دایروی نسبت به حلقه‌های بسته مستطیلی محصوریت بیش‌تری را در مقطع به وجود می‌آورند. به‌طور کلی محصوریت را می‌توان به دو مدل محصوریت حلقه‌های خاموت و مدل محصوریت مصالح دسته‌بندی کرد.

در مدل محصوریت حلقه‌های خاموت صحبت درباره سازوکار محصوریت در مفهوم سطح مقطع المان است درحالی‌که در مدل محصوریت مصالح موضوع درباره اثرات دو جهته و سه جهته تنش‌ها بر روی مقاومت نهایی بتن متمرکز می‌شود.

۳-۳-۴-۲-۱- مدل استفاده شده در این تحقیق جهت در نظرگیری اثرات محصوریت بتن

در این تحقیق از مدل پیشنهاد شد توسط Chang و Mander [۳۹] جهت در نظرگیری رفتار چرخه‌ای بتن محصورشده استفاده شده است. مدل پیشنهاد شده توسعه یافته مدل پیشنهادی Sheikh و Uzumeri [۴۱] در سال ۱۹۸۲ می‌باشد. این روش برای هر سطح مقطعی از بتن من جمله مقطع دایروی و مستطیلی کاربرد دارد. این روش همچنین تنها روشی می‌باشد که اثرات بارهای دینامیکی و بارهای چرخه‌ای را در روابط خود در نظر می‌گیرد. تنش‌های بوجود آمده ناشی از محصوریت به طور غیریکنواخت در عمق ناحیه تحت فشار پخش می‌گردد. فشارهای محصورشدگی از طرف خاموت‌های عرضی وارد می‌گردد. این خاموت‌ها به صورت فعال مقاومت جانبی بتنی که تحت نیروهای فشاری می‌باشد را افزایش می‌دهند. این اثرات میلگردهای جانبی بتن را مقاوم‌تر و درحین حال شکل‌پذیرتر می‌نماید. ساده‌ترین روش، استفاده از روابط تجربی برای مرتبط سازی مقاومت و شکل‌پذیری بتن محصورشده به خصوصیات بتن غیرمحصور می‌باشد. راه‌کار معقولانه استفاده از مدل سازگاری جهت توصیف تاثیرات تنش‌های چندین جهته بر روی مقاومت نهایی بتن می‌باشد.

در زیر روابط سطح مؤثر محصور شده A_e و سطح مقطع خالص بتن هسته A_{cc} برای مقاطع بتنی مستطیلی آورده شده‌اند.

$$A_e = [b_c \times d_c - \sum_{i=1}^n (w_i'^2/6)] [1 - (0.5 \times S'/b_c) (1 - (0.5 \times S'/d_c))] \quad (1-3)$$

$$A_{cc} = b_c \times d_c - A_{st} \quad (2-3)$$

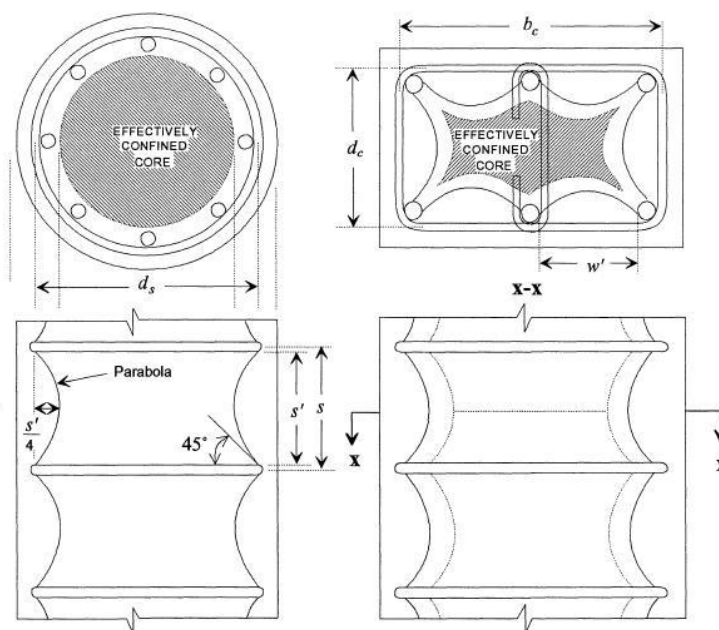
پارامترهای رابطه فوق به صورت زیر تعریف می شود:

b_c : طول مقطع مستطیلی

d_c : عرض مقطع مستطیلی

A_{st} : مساحت میلگردهای طولی عمود بر مقطع بتن می باشد.

در شکل ۱۵-۳ پارامترهای b_c ، d_c و w_i' نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۳ مکانیزم محصورشدگی درمقاطع بتنی دایروی و مستطیلی [۳۹]

پارامتر فشار جانبی ناشی از محصوریت وارد بر بتن در هر راستا مقادیر متفاوتی دارد. در حالت کلی فشار

جانبی در سه راستای مختلف به بتن محصور شده وارد خواهد شد. فشار وارده در جهات x و y مطابق روابط

زیر می باشد.

$$f_{lx} = K_e \rho_x f_{yh} \quad (3-3)$$

$$f_{ly} = K_e \rho_y f_{yh}$$

$$\rho_x = A_{sx} / S d_c \quad (4-3)$$

$$\rho_y = A_{sy} / S b_c$$

پارامترهای رابطه فوق به صورت زیر تعریف می شود:

f_{lx} : فشار محصورشدگی وارده بر بتن در راستای x

f_{ly} : فشار محصورشدگی وارده بر بتن در راستای y

ρ_x : درصد آرماتورهای محصورکننده در راستای x

ρ_y : درصد آرماتورهای محصورکننده در راستای y

K_e : ضریب مؤثر محصوریت بتن A_e / A_{cc}

f_{yh} : تنش تسلیم آرماتورهای عرضی (حلقه های دورگیر آرماتورهای طولی)

همچنین پارامترهای A_{sx} و A_{sy} به ترتیب برابر سطح مقطع کل آرماتورها موازی با محورها x و y می باشد.

ضریب تنش بتن محصورشده با توجه به مدل پیشنهادی توسط Mander, Chang از روابط زیر محاسبه

می شود.

$$q = f_{lx} / f_{ly} \quad f_{ly} > f_{lx}$$

$$X' = (f_{lx} + f_{ly}) / 2f'_{c0}$$

$$A = 6.886 - (0.6069 + 17.275q) e^{-4.989q} \quad (5-3)$$

$$B = (4.5 / ((5/A) \times [0.9849 - 0.6306e^{-3.8939q}] - 0.1)) - 5$$

$$K_1 = A \times [0.1 + (0.9/1 + Bx')]$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \times (1 + K_1 X') \quad (6-3)$$

پارامترهای روابط فوق به صورت زیر تعریف می شود:

f'_{c0} : مقاومت حداکثر بتن غیرمحصور

f'_{cc} : مقاومت حداکثر بتن محصور

کرنش نظیر تنش حداکثر در بتن محصورشده از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{c0} (1 + K_2 x') \quad (7-3)$$

$K_2 = 5 K_1$ در صورتی که از آرماتورهای عرضی با مقاومت متوسط برای محصور شدگی استفاده شود.

$K_2 = 3 K_1$ در صورتی که از آرماتورهای عرضی با مقاومت بالا برای محصور شدگی استفاده شود.

در دیوارهای W1-SR و W2-NR به دلیل تفاوت در فاصله قائم میلگردهای خاموت در نواحی مرزی درون ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک (۸۰۰ میلی متر از سطح فونداسیون) و نواحی خارج از ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در مدل دیوارهای مورد مطالعه می بایست دو ضریب متفاوت جهت ضرایب تنش و کرنش بتن محصورشده محاسبه گردد. تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوارهای W1-SR و W2-NR در جدول ۳-۱۰ و ۳-۱۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱۰ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار W1-SR

ناحیه مرزی	تنش بتن محصورشده (Mpa)	کرنش بتن محصورشده	مدول الاستیک بتن محصورشده (Gpa)
درون ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک دیوار	۵۳	۰/۰۰۴۶۷	۳۶/۳۴۲۷
خارج از ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک دیوار	۳۷/۰۲۷	۰/۰۰۴۴۳۴	۳۱/۷۶۹

جدول ۳-۱۱ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار W2-NR

ناحیه مرزی	تنش بتن محصورشده (Mpa)	کرنش بتن محصورشده	مدول الاستیک بتن محصورشده (Gpa)
درون ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک دیوار	۵۴/۹۱۴	۰/۰۰۴۴۹۷	۳۶/۸۲۹
خارج از ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک دیوار	۳۸/۳۶	۰/۰۰۴۲۷	۳۲/۱۹۳

در دیوار WSH3 فاصله قائم میلگردهای خاموت با فاصله ۷۵ میلی‌متر تا ۹۸ درصد ارتفاع دیوار ادامه پیدا کرده است. لذا برای ناحیه مرزی دیوار WSH3 از یک ضریب محصورشدگی استفاده می‌کنیم.

جدول ۳-۱۲ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن محصورشده دیوار WSH3

ناحیه مرزی	تنش بتن محصورشده (Mpa)	کرنش بتن محصورشده	مدول الاستیک بتن محصورشده (Gpa)
ناحیه مرزی به ارتفاع کل دیوار	۴۹/۱۵	۰/۰۰۴۹۲	۳۵/۳۳

در ستون RNE محصورشدگی توسط کابل فلزی گالوانیزه با قطر ۴/۵ میلی‌متر و با گام‌های ۳۸/۱ میلی‌متر انجام شده است. همچنین با پیشنهاد سعیدی و همکاران [۷] برای محاسبه مقاومت محصورشدگی ECC از روابط محصورشدگی Chang و Mander [۳۹] استفاده شده است. در جدول ۳-۱۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک ستون RNE در ناحیه خارج از مفصل پلاستیک و ناحیه مفصل پلاستیک از جنس ECC آورده شده است.

جدول ۳-۱۳ تنش، کرنش و مدول الاستیک بتن و ECC محصورشده ستون RNE

ناحیه	تنش بتن محصورشده (Mpa)	کرنش بتن محصورشده	مدول الاستیک بتن محصورشده (Gpa)
خارج از ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک (بتن معمولی)	۶۱/۲	۰/۰۰۷	۳۱/۴۳۶
درون ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک (ECC)	۶۰/۸۶	۰/۰۱۷۳	---

۳-۴- پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

پس از مدل‌سازی دیوارهای WSH3، W2-NR، W1-SR و ستون RNE و به‌دست‌آوردن خروجی‌های انرژی

مستهلك شده و برش پایه-جابه‌جایی تیر فوقانی به‌صورت چرخه‌ای و اعتبارسنجی خروجی‌های به‌دست‌آمده با مقالات مرجع به‌منظور بررسی بیش‌تر از سه پارامتر متغیر که شامل نیروی ثقلی وارد بر دیوار، طول افقی نواحی مرزی و قطر میلگردهای SMA که درصد آنها نیز در دیوار تأثیرگذار می‌باشد، 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 ۳-۱۴ معرفی پارامترهای متغیر و مقادیر هر پارامتر

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

در جدول فوق A_g سطح مقطع خالص دیوار برشی و F_c مقاومت فشاری بتن استفاده شده در دیوار می‌باشد. از آنجا که ۴ میلگرد SMA در نواحی مرزی قرار می‌گیرد، مقادیر مختلف قطر آرماتور SMA باعث بوجود آمدن درصد آرماتور متفاوت در آن نواحی می‌شود. در جدول ۳-۱۵ درصد آرماتور مربوط به مقادیر مختلف آرماتورهای SMA آورده شده است.

جدول ۳-۱۵ مقادیر درصد آرماتور متناظر با قطر میلگردهای SMA

پارامتر متغیر				مقدار عددی
قطر آرماتورهای SMA (mm)				۱۶ ۱۲/۷ ۹ ۵
درصد آرماتور متناظر (%)				۲/۶۸ ۱/۶۸ ۰/۸۵ ۰/۲۶

مقادیر خروجی و نمودارهای مربوط به خروجی نرم‌افزار در فصل چهارم آمده است.

فصل ۴ تجزیہ و تحلیل داده‌ها

در این فصل جهت ساده‌سازی اشاره به مدل‌های مورد بررسی و خلاصه‌تر شدن نام هریک از مدل‌های مورد مطالعه، هرکدام از مدل‌های بررسی شده در غالب جداولی همراه با نام اختصاری مختص به خود معرفی شده‌اند.

۴-۱- معرفی مدل‌ها و پارامترهای مورد بررسی

۴-۱-۱- معرفی مدل‌های اعتبارسنجی

در جدول ۴-۱ مدل‌های اعتبارسنجی شده یا مدل‌های مرجع برداشته شده از مطالعات عبدالرضا و پالرمو [۵]، دازیو و همکاران [۶] و سعیدی و همکاران [۷] آورده شده است.

جدول ۴-۱ مدل‌های اعتبارسنجی

عنوان مدل	دیوار عبدالرضا و پالرمو شامل میلگرد فولادی	دیوار عبدالرضا 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

۴-۱-۲- معرفی پارامترهای مورد بررسی

۴-۱-۲-۱- پارامترهای متغیر دیوار برشی با میلگردهای SMA فاقد ستونک های مرزی

۴-۱-۲-۱-۱- پارامتر نیروی ثقلی وارد بر دیوار

در جدول ۴-۲ میزان نیروی ثقلی محوری وارده بر دیوار برشی دارای میلگردهای ترکیبی SMA و فولاد شکل‌پذیر بر حسب درصدی از $Ag \times F_c$ آورده شده است. که پارامتر Ag سطح مقطع کلی دیوار برشی و F_c تنش فشاری ۲۸ روزه بتن مصرفی در دیوار برشی می‌باشد.

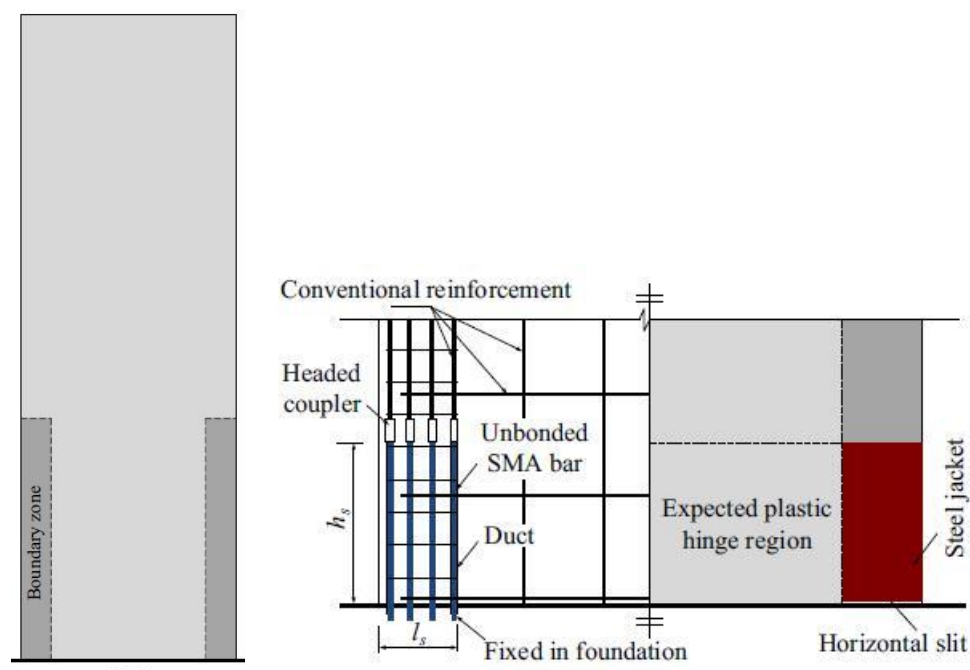
جدول ۲-۴ پارامتر نیروی ثقلی محوری وارد بر دیوار برشی W2-NR

نیروی ثقلی وارد بر دیوار برشی	هفت صدم سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	ده صدم سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	پانزده صدم سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن	بیست صدم سطح مقطع دیوار در تنش فشاری بتن
علامت اختصاری مدل	$N(0.07AgFc)$	$N(0.1AgFc)$	$N(0.15AgFc)$	$N(0.2AgFc)$

۲-۱-۲-۱-۴ پارامتر عرض نواحی مرزی دیوار

باتوجه به فرضیات مدل سازی دیوارهای برشی به روش المان های قائم خطی چندتایی SFI-MVLEM استفاده شده در نرم افزار OpenSEES نواحی مرزی از بتن محصور شده و ناحیه میانی دیوار یا جان از بتن محصور نشده تشکیل شده اند.

تغییر در ابعاد ناحیه مرزی دیوار به عنوان تغییر مهمی در اغلب مطالعات مربوط به پاسخ های چرخه ای دیوار برشی بتنی شناخته می شود. در شکل ۱-۴ این نواحی مرزی در محدوده محل تشکیل مفاصل پلاستیک نمایش داده شده اند.



شکل ۱-۴ نواحی مرزی در محدوده تقریبی محل تشکیل مفاصل پلاستیک

جدول ۳-۴ پارامتر میزان عرض نواحی مرزی دیوار W2-NR

عرض نواحی مرزی دیوار	صد میلی متر	صد و پنجاه میلی متر	دویست میلی متر	دویست و پنجاه میلی متر
علامت اختصاری مدل	BoundWidth (100mm)	BoundWidth (150mm)	BoundWidth (200mm)	Boundwidth (250mm)

۴-۱-۲-۳- پارامتر قطر میلگردهای طولی SMA در نواحی مرزی

باتوجه به استفاده از میلگردهایی با جنس آلیاژ حافظه دار SMA در 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 McCormick و همکاران [۴۲] میزان قطر میلگردهای فوق ارتجاعی SMA می‌باشد. ازسوی دیگر تأثیرات فرم مصالح SMA به کار رفته در سازه‌های گوناگون ازجمله فرم رشته‌ای مصالح یا فرم میلگرد در میزان خودمحموری^۱ شدن پاسخهای چرخه‌ای و میزان میرایی کلی سازه قابل توجه می‌باشد [۱]. در جدول ۴-۴ پارامتر مربوط به میزان قطر میلگردهای SMA بررسی شده در این تحقیق آورده شده است.

جدول ۴-۴ پارامتر میزان قطر میلگردهای SMA دیوار W2-NR

قطر میلگردهای SMA به کار رفته	پنج میلی متر	نه میلی متر	دوازده و هفت دهم میلی متر	شانزده میلی متر
علامت اختصاری مدل	SMAdiam (5mm)	SMAdiam (9mm)	SMAdiam (12.7)	SMAdiam (16mm)

۴-۱-۲-۲- پارامترهای متغیر دیوار برشی دارای ستونک‌های مرزی با میلگردهای SMA و بتن

ECC

در این بخش به مطالعه رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی همراه با ستونک‌های بتنی با میلگردهای SMA و بتن با ترکیبات سیمانی مهندسی ECC پرداخته شده است به منظور مطالعه گسترده‌تر، رفتار دیوارهای برشی همراه با ستونک‌هایی در پایه‌های دیوار به عنوان نواحی مرزی و امان اتصال دهنده دیوار به فونداسیون بررسی شده است.

به این جهت مطالعه پارامتریک دیوارهای برشی همراه با ستونک‌های SMA شامل پارامتر میزان ارتفاع

ستونک‌ها به‌عنوان متغیر بررسی شده می‌شود.

در جدول ۴-۵ میزان ارتفاع بررسی شده ستونک‌های مرزی اتصال‌دهنده دیوار برشی به فونداسیون آورده شده است.

جدول ۴-۵ پارامتر میزان ارتفاع ستونک‌های دیوار برشی دیوار WSH3

ارتفاع ستونک‌ها	دویست و پنجاه و چهار میلی‌متر	سیصد و هشتاد و یک میلی‌متر	پانصد و هشت میلی‌متر	ششصد و سی و پنج میلی‌متر
علامت اختصاری مدل	SMAColumn (10inch)	SMAColumn (15inch)	SMAColumn (20inch)	SMAColumn (25inch)

۴-۲- معرفی خروجی‌ها

خروجی‌های گرفته شده از مطالعه پارامتریک دیوار برشی و ستونک‌های SMA درلیست زیر آورده شده است.

الف) خروجی برش پایه - جابه‌جایی جانبی

ب) خروجی مقاومت، سختی و شکل‌پذیری

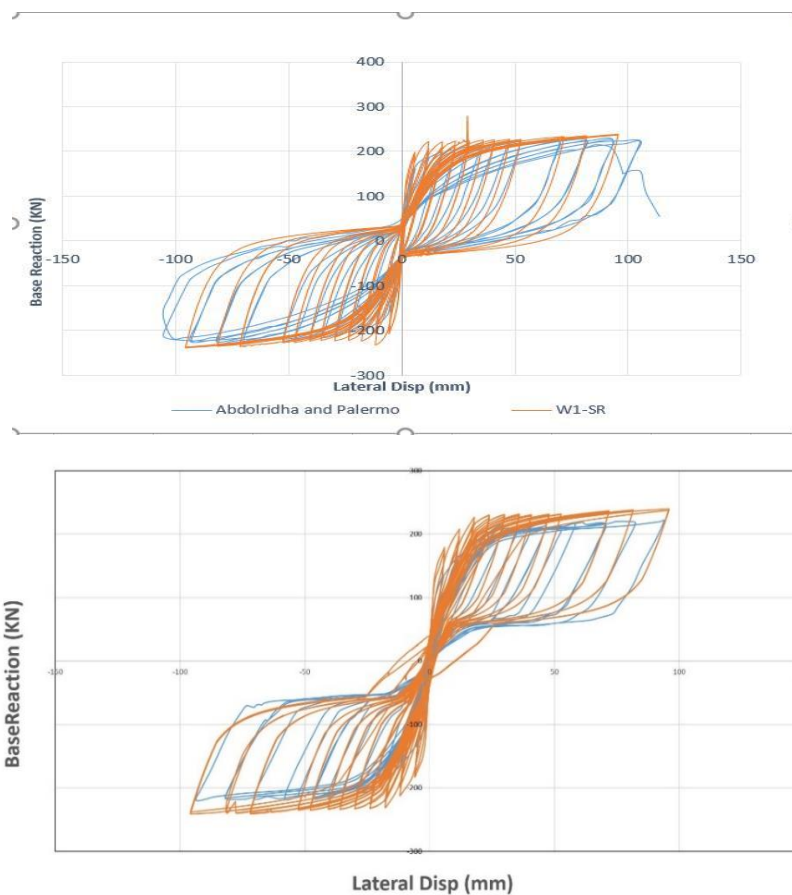
ج) خروجی انرژی جذب شده در طول تحلیل چرخه‌ای

۴-۲-۱- اعتبارسنجی دیوارهای W1-SR و W2-NR

در شکل ۴-۲ شماتیک مدل نرم افزاری دیوارهای W1-SR و W2-NR آورده شده است. تفاوت دو مدل مذکور در تعریف مشخصات مصالح و درصد آرماتور نواحی مرزی می‌باشد، به همین دلیل شکل مدل نرم‌افزاری دو دیوار یکسان است. در شکل ۴-۳ نمودار برش پایه - جابه‌جایی جانبی بالاترین تراز دیوار برشی دیوارهای W1-SR و W2-NR تحت بارگذاری چرخه‌ای طبق جدول ۳-۳ و بارثقلی به میزان $0.1AgFc$ آورده شده است.

		10			
-9001	-9002	-9003	-9004	-9005	-9006
-8001	-8002	-8003	-8004	-8005	-8006
	-7001	-7002	-7003	-7004	-7005
	-6001	-6002	-6003	-6004	-6005
		6			
	-5001	-5002	-5003	-5004	-5005
		5			
	-4001	-4002	-4003	-4004	-4005
		4			
	-3001	-3002	-3003	-3004	-3005
		3			
	-2001	-2002	-2003	-2004	-2005
		2			
-1001	-1002	-1003	-1004	-1005	
		1			

شکل ۴-۲ شماتیک مدل نرم افزاری دیوارهای W1-SR و W2-NR

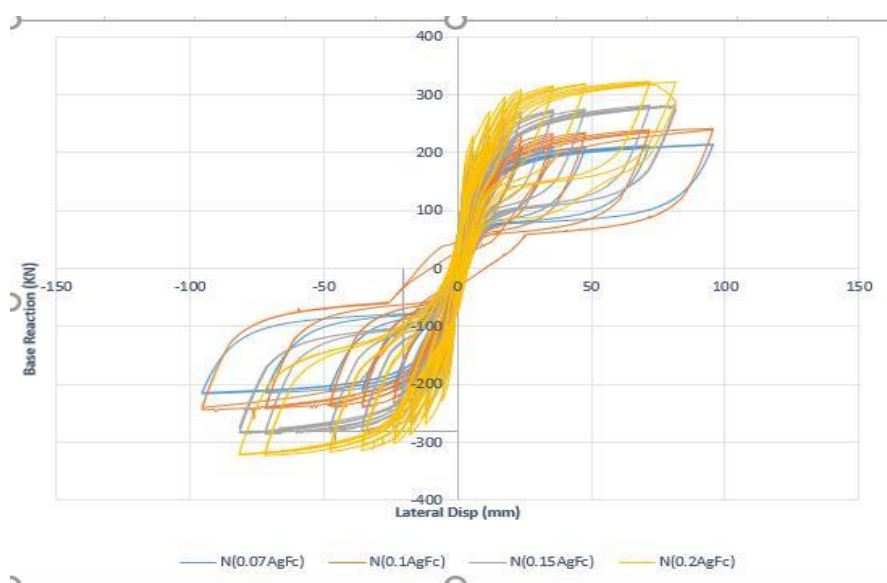


شکل ۴-۳ نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوار تحت بار ثقلی $0.1AgFc$
بالا) دیوار W1-SR پایین) دیوار W2-NR

در شکل ۴-۳ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوارهای W1-SR و W2-NR بدست آمده از مطالعات عبدالرضا و پالمو [۵] به‌عنوان مدل مرجع جهت مقایسه و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی 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 تغییرشکل‌های ماندگار و خاصیت مرکزگرایی دیوار برشی دارد.

۴-۲-۲- خروجی برش پایه-جابه‌جایی جانبی دیوار W2-NR تحت پارامتر نیروی ثقلی

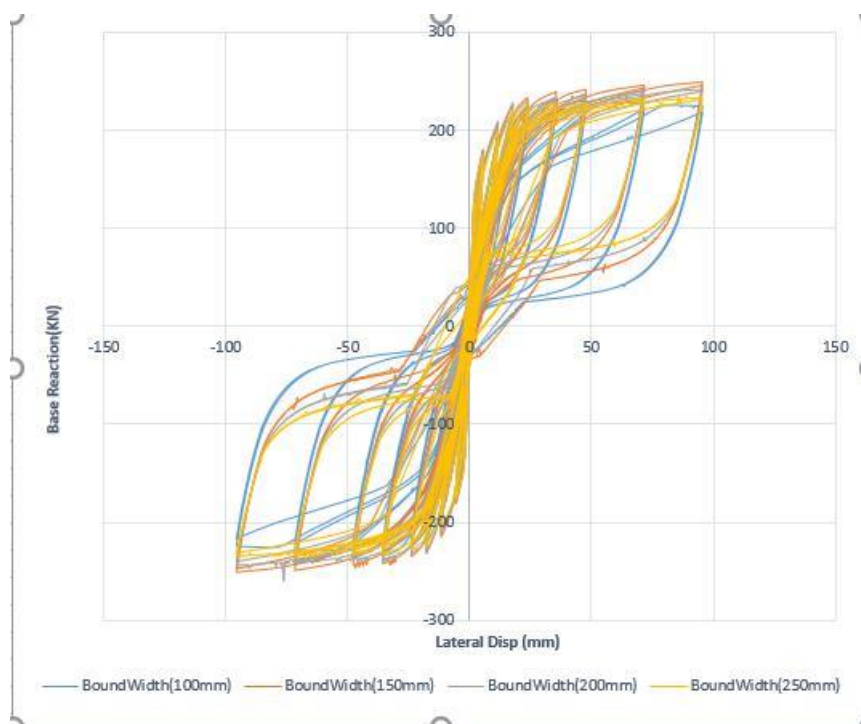
در شکل ۴-۴ نمودارهای برش پایه-جابه‌جایی جانبی مربوط به تحلیل چرخه‌ای دیوار W2-NR بدست آمده از مقادیر متفاوت نیروی ثقلی وارد بر دیوار نشان داده شده است. با توجه به نمودار پارامتریک زیر در ابتدا مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی ثقلی بر روی دیوار برشی، مقاومت و نیروی برش پایه دیوار افزایش می‌یابد ولی دو مدل با پارامتر $0.15AgFc$ و $0.2AgFc$ که تحت نیروی ثقلی بیشتری قرار گرفته اند، قبل از رسیدن به سیکل آخر تحلیل چرخه‌ای به واگرایی می‌رسند. در نتیجه شکل پذیری دیوار برشی با افزایش نیروی ثقلی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴ نمودارهای چرخه‌ای دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف نیروی ثقلی

۴-۲-۳- خروجی برش پایه - جابه‌جایی دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر عرض نواحی مرزی

در شکل ۴-۵ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی دیوار W2-NR 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 میلی متر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۵۰ میلی متر، ۵۶٪ تغییر شکل ماندگار کمتری از خود برجای می‌گذارد.

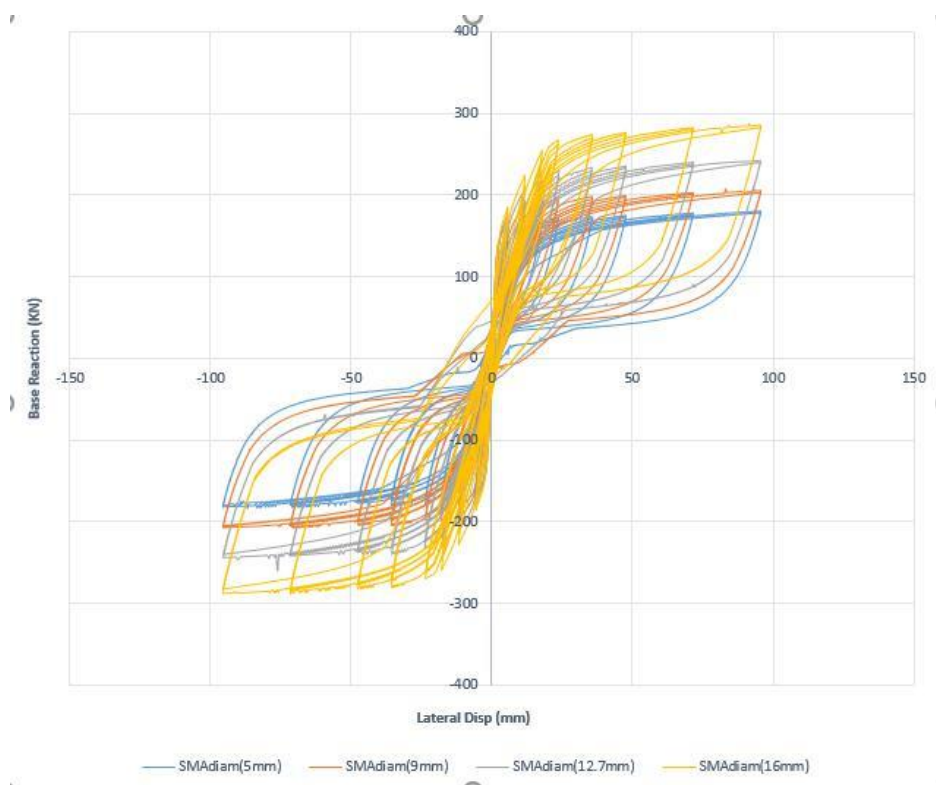


شکل ۴-۵ نمودارهای چرخه‌ای دیوار W2-NR در اثر مقادیر متفاوت عرض نواحی مرزی

۴-۲-۴- خروجی برش پایه - جابه‌جایی دیوار W2-NR تحت پارامتر قطر میلگردهای SMA

در شکل ۴-۶ نمودارهای چرخه‌ای برش پایه-جابه‌جایی بالای دیوار W2-NR 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 میلی متر ۳۶٪ مقاومت بیشتری نسبت به مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی متر دارد. همچنین مشاهده می‌شود

که با افزایش قطر میلگرد تغییر شکل ماندگار دیوار افزایش می‌یابد. به‌طوری 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 بوجود آمده 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 برجای می‌گذارد که نشان دهنده بوجود 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.

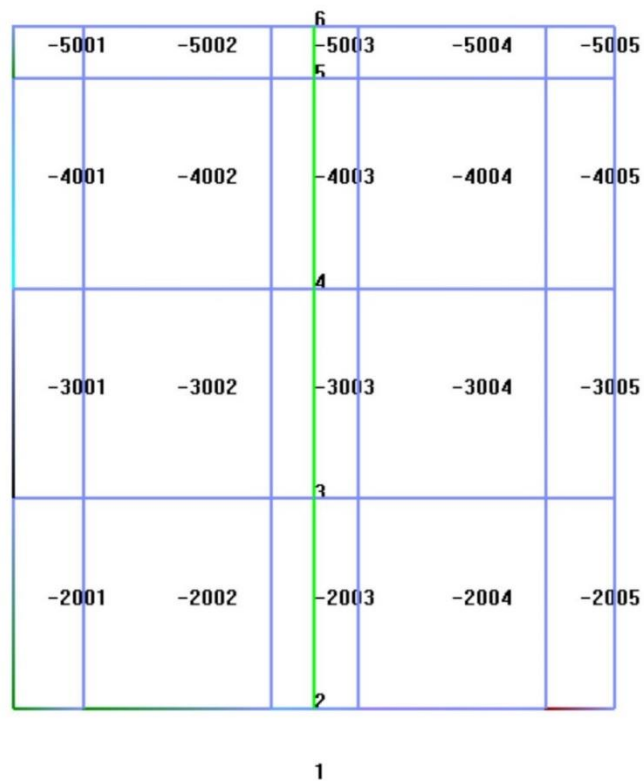


شکل ۴-۶ نمودارهای دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف قطر میلگردهای SMA

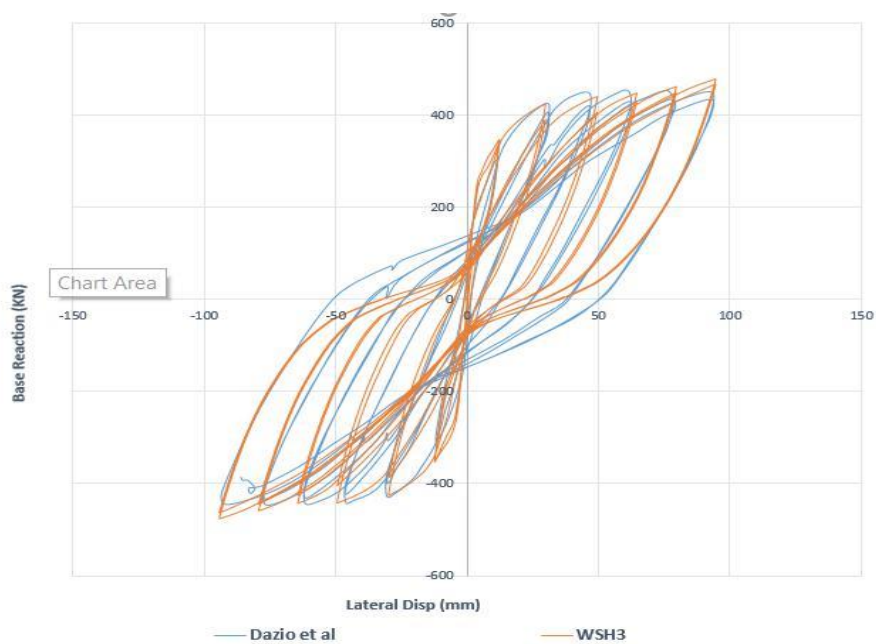
۴-۲-۵- اعتبارسنجی دیوار WSH3

در شکل ۴-۷ شماتیک مدل نرم‌افزاری دیوار WSH3 آورده شده است. در شکل ۴-۸ نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی بالای دیوار WSH3 مدل شده در نرم‌افزار طبق پروتکل بارگذاری چرخه‌ای جدول ۳-

۵ و نمودار چرخه‌ای به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی دازیو و همکاران [۵] آورده شده است.



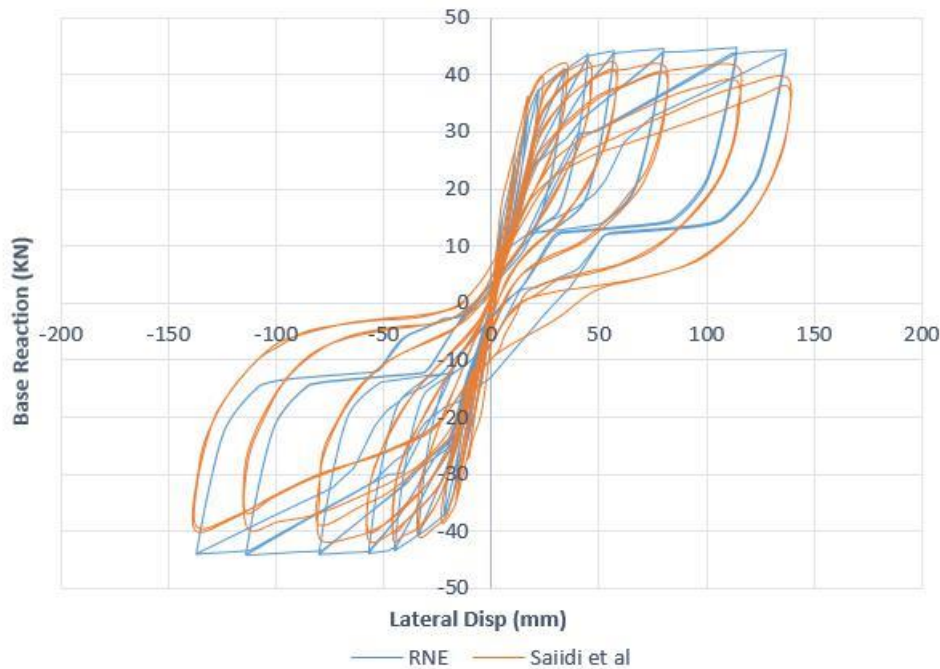
شکل ۴-۷ شماتیک مدل نرم افزاری دیوار WSH3



در شکل ۴-۸ نمودار چرخه‌ای مربوط به دیوار WSH3

۴-۲-۶- اعتبارسنجی ستونک RNE

در شکل ۴-۸ نمودار اعتبارسنجی ستون RNE شامل مصالح بتنی ECC و میلگردهای SMA آورده شده و با ستون مطالعه شده توسط سعیدی و همکاران [۷] اعتبارسنجی شده است.

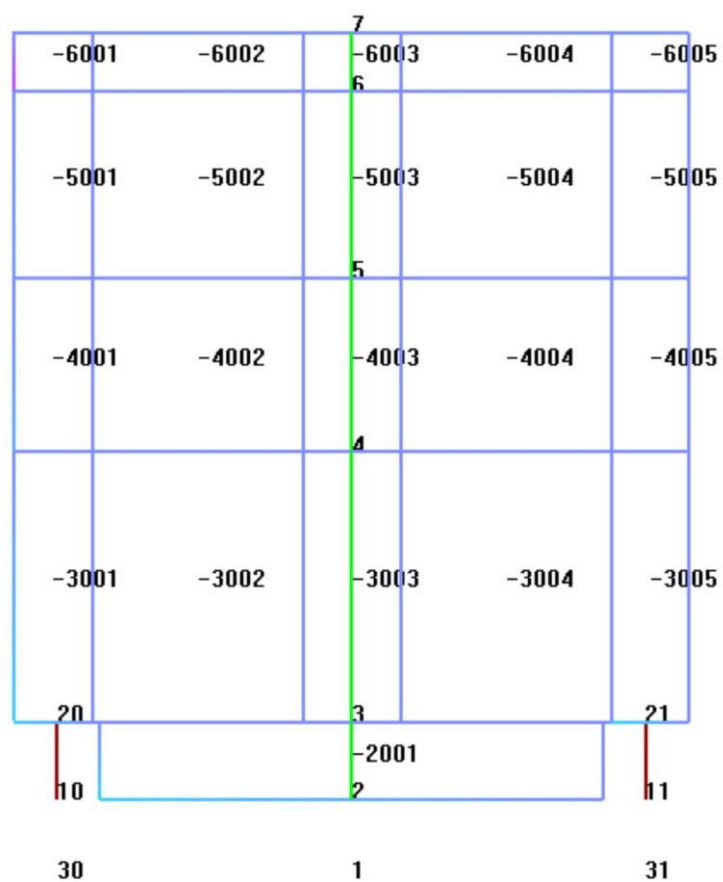


شکل ۴-۸ نمودار چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی ستون RNE

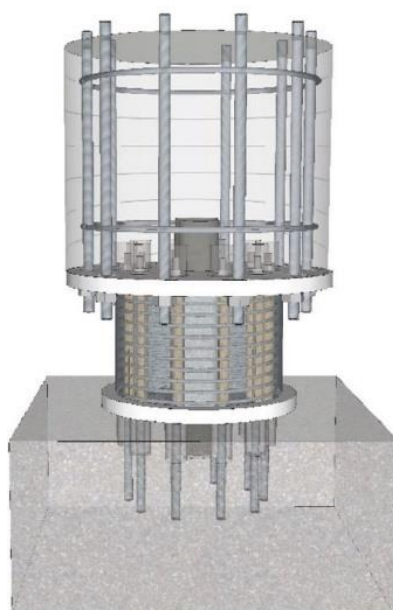
۴-۲-۷- خروجی برش پایه - جابه‌جایی جانبی مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های

RNE تحت پارامتر متغیر ارتفاع ستونک‌ها

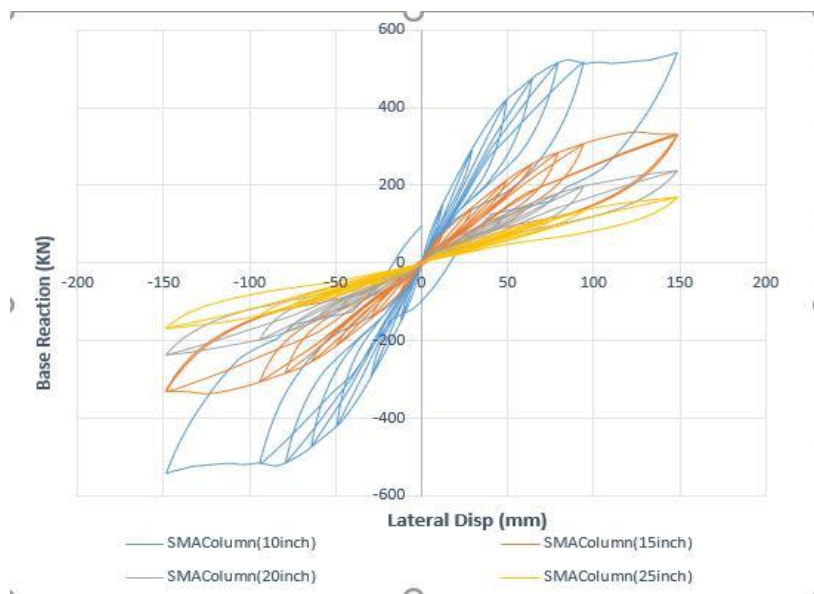
در شکل ۴-۹ شماتیک مدل نرم‌افزاری دیوار ترکیبی نوآورانه آورده شده است. المان‌های قرمز در شکل ۴-۹ نشان دهنده ستونک‌های RNE و محل قرارگیری آن‌ها می‌باشد. در شکل ۴-۱۰ ستونک RNE و نحوه اتصال آن نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۱ نمودار چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE تحت پارامترهای متغیر ارتفاع ستونک‌های پایه (متصل‌کننده دیوار به فونداسیون زیرین) آورده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود، قرارگیری ستونک RNE در نواحی بحرانی دیوار برشی، تغییرشکل‌های ماندگار را به کمترین حد کاهش می‌دهد و باعث رفتار مرکزگرایی در دیوار برشی می‌شود.



شکل ۴-۹ شماتیک مدل نرم افزاری دیوار ترکیبی نوآورانه



شکل ۴-۱۰ ستونک RNE و نحوه اتصال آن [۲۲]



شکل ۴-۱۱ نمودار چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستون‌های RNE

۴-۳- خروجی مقاومت، سختی و شکل‌پذیری

۴-۳-۱- مقاومت تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W1-SR و W2-NR

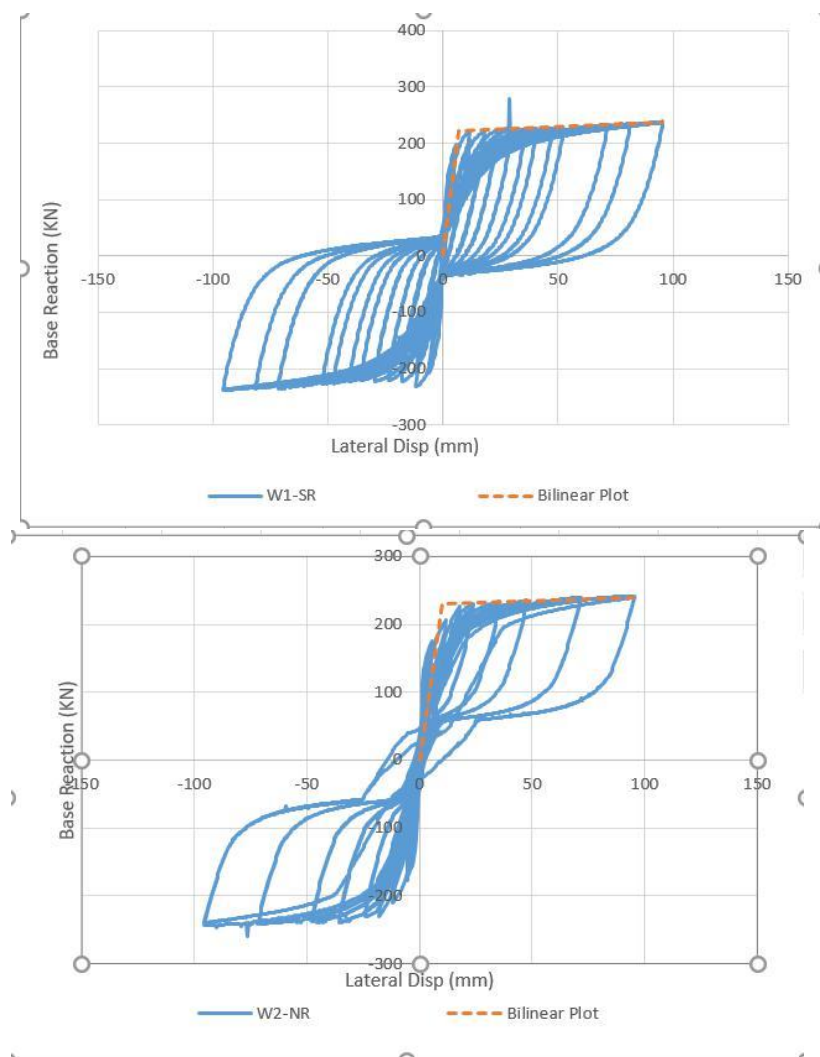
جهت محاسبه پارامترهای مقاومت، سختی و ضریب شکل‌پذیری مدل‌ها از روش دوطبقی کردن نمودارهای چرخه‌ای برش پایه - جابه‌جایی جانبی محاسبه شده در بخش‌های قبلی استفاده می‌کنیم.

جهت دوطبقی کردن نمودارهای چرخه‌ای و محاسبه پارامترهای مذکور خطی از مبدأ مختصات تا نیروی حداکثر در اولین چرخه بارگذاری رسم می‌نماییم، در مرحله دوم از نقطه انتهایی خط اول تا نیروی متناظر آخرین چرخه بارگذاری خط مستقیم دیگری رسم می‌کنیم. آخرین چرخه را می‌توان برابر با حداکثر دریافت دیوار در تحلیل چرخه‌ای فرض نمود.

شرط لازم جهت دوطبقی نمودن نمودار چرخه‌ای مساوی بودن مساحت سطح زیر نمودار چرخه‌ای و نمودار دوطبقی شده می‌باشد. در صورتی که نمودار در گام‌های آخر با کاهش مقاومت یا برش پایه همراه باشد ملاک حداکثر دریافت نیروی متناظر با آخرین چرخه‌ای می‌باشد که نمودار آن مرحله به صورت صعودی رسم شود.

پارامتر سختی اولیه از تقسیم مقاومت تسلیم به دست‌آمده از نمودار دوطبقی بر جابه‌جایی نظیرش (Δy)

محاسبه می‌شود. در شکل ۴-۱۲ نمودارهای چرخه‌ای دوطبقی شده دیوارهای W1-SR و W2-NR نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ نمودارهای چرخه‌ای دوطبقی شده دیوارهای W1-SR و W2-NR

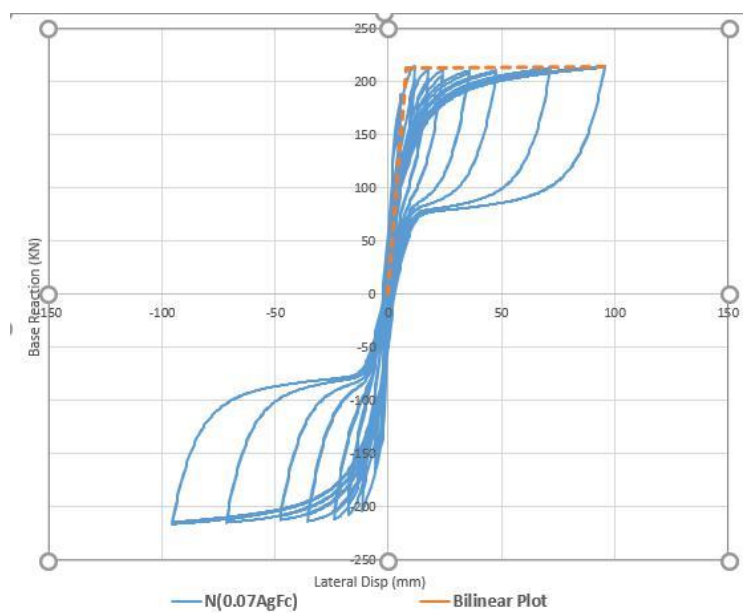
در جدول ۴-۶ پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوارهای W1-SR و W2-NR نشان داده شده است.

جدول ۴-۶ پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوارهای W1-SR و W2-NR

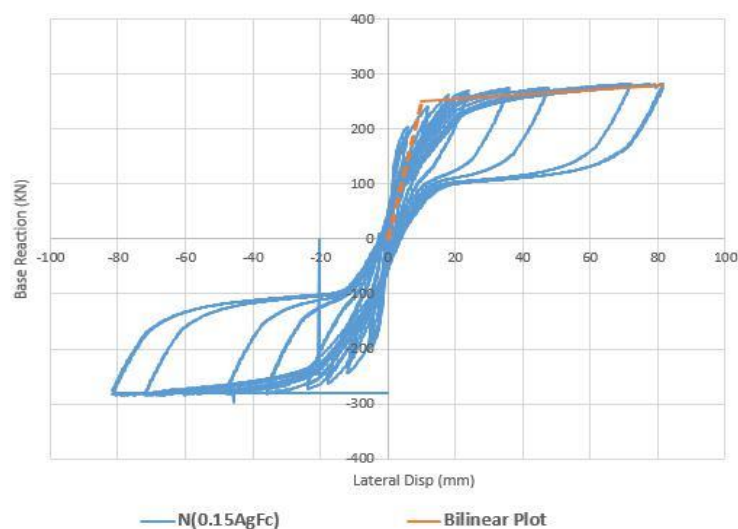
نام اختصاری دیوار	مقاومت تسلیم (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری $\Delta u/\Delta y$
W1-SR	۲۲۲	۳۱.۷	۱۳/۶۱
W2-NR	۲۳۰	۲۳	۹/۵

۴-۳-۲- مقاومت تسلیم، سختی و شکل پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقلی

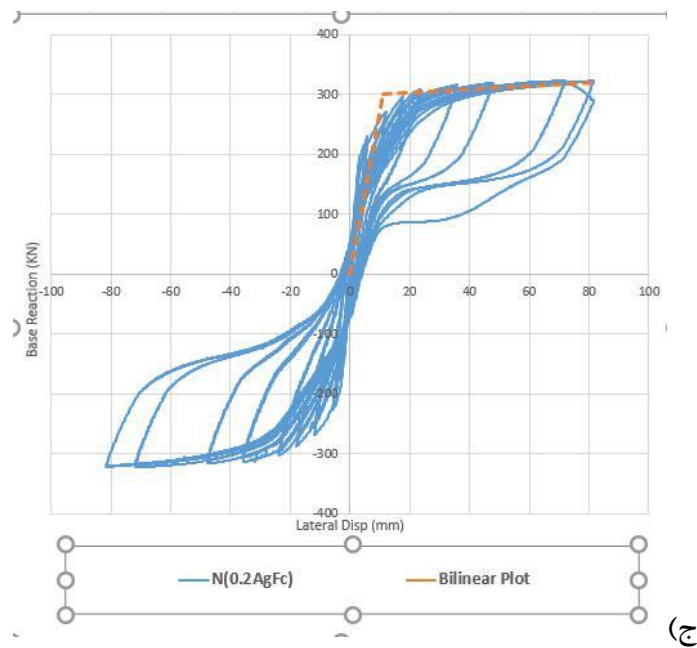
در این مرحله از طریق دوخطی نمودن نمودارهای چرخه‌ای مدل دیوار W2-NR اقدام به محاسبه پارامترهای مقاومت، سختی و شکل پذیری مدل‌ها تحت پارامتر متغیر نیروی ثقلی وارد بر دیوار می‌پردازیم. در شکل ۴-۱۳ نمودارهای چرخه‌ای دوخطی شده مدل دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقلی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



شکل ۴-۱۳ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقیل وارد بر دیوار
الف) دیوار با نیروی ثقیل $0.07AgFc$ ب) دیوار با نیروی ثقیل $0.15AgFc$ ج) دیوار با نیروی ثقیل $0.2AgFc$

در جدول ۴-۷ میزان مقاومت حد تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقیل وارد بر دیوار آورده شده است.

جدول ۴-۷ میزان مقاومت حد تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر نیروی ثقیل

نام اختصاری دیوار	مقاومت تسلیم (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری $\Delta u / \Delta y$
N(0.07AgFc)	۲۱۳	۲۶/۶۲	۱۱/۹۴
N(0.15AgFc)	۲۵۰	۲۶/۹۵	۸/۱۵
N(0.2AgFc)	۳۰۰	۲۷/۳	۷/۴۵

باتوجه به نمودارها و جدول فوق مشاهده می‌شود، افزایش نیروی ثقیل روی دیوار برشی با افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری همراه خواهد بود.

۳-۳-۴- مقاومت تسلیم، سختی و شکل پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر عرض ناحیه

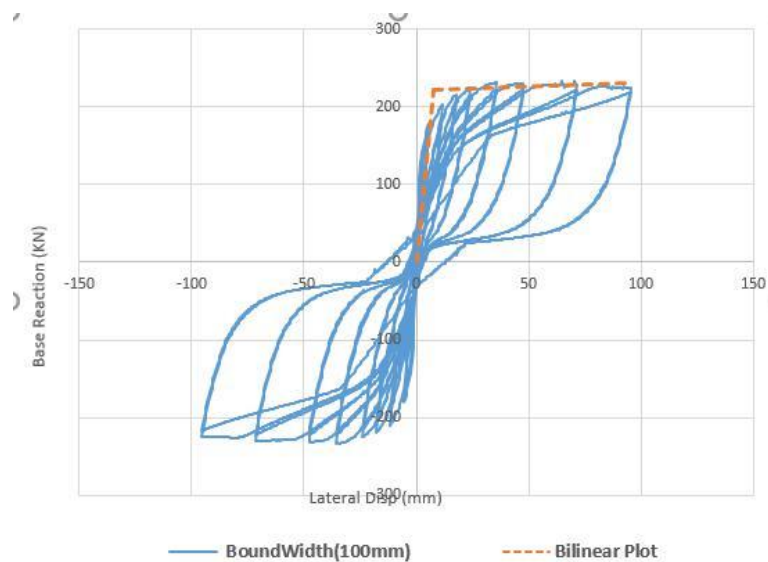
مرزی دیوار

در این مرحله از طریق دوخطی نمودن نمودارهای چرخه‌ای مدل دیوار W2-NR اقدام به محاسبه پارامترهای

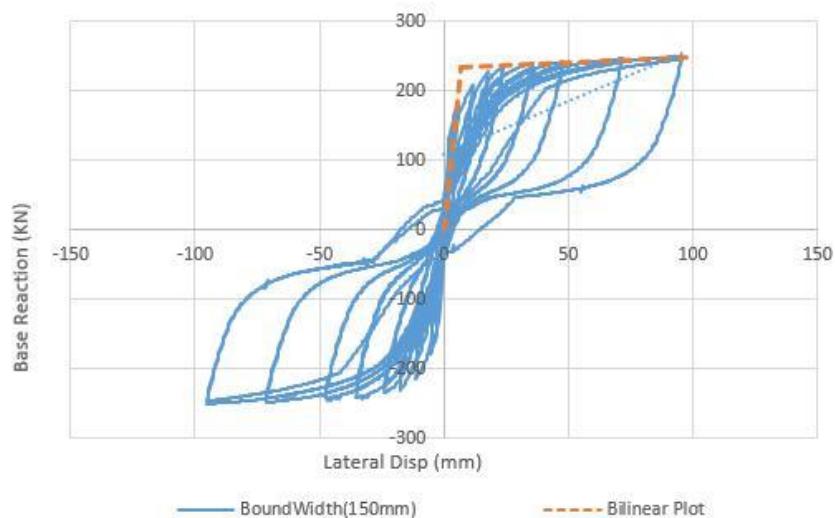
مقاومت، سختی و شکل پذیری مدل‌ها تحت پارامتر متغیر عرض ناحیه مرزی دیوار می‌پردازیم. در شکل ۴-۱۴

نمودارهای چرخه‌ای دوخطی شده مدل دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر عرض ناحیه مرزی نشان داده شده

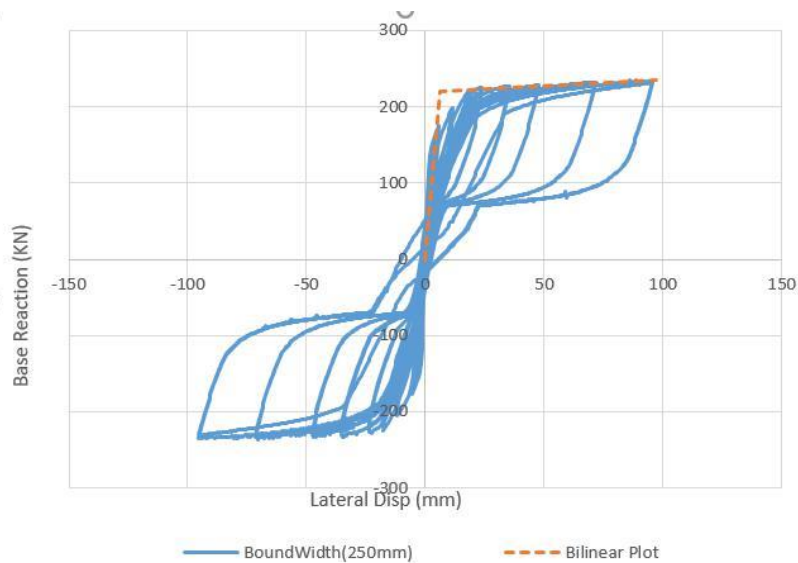
است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۱۴ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر عرض ناحیه مرزی

الف) دیوار با ناحیه مرزی به عرض ۱۰۰ میلی‌متر

ب) دیوار با ناحیه مرزی به عرض ۱۵۰ میلی‌متر

ج) دیوار با ناحیه مرزی به عرض ۲۵۰ میلی‌متر

در جدول ۴-۸ مقادیر مقاومت تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف عرض ناحیه

مرزی آورده شده است.

جدول ۴-۸ مقادیر مقاومت تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت مقادیر مختلف عرض ناحیه مرزی

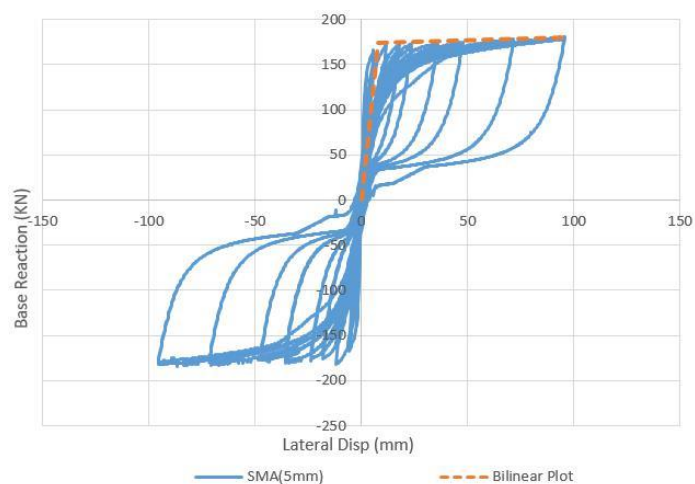
نام اختصاری دیوار	مقاومت تسلیم (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری $\Delta u / \Delta y$
BoundWidth(100mm)	۲۲۲	۲۷/۷۵	۱۱/۹۳
BoundWidth(150mm)	۲۳۰	۳۳/۴۲	۱۳/۵۶
BoundWidth(250mm)	۲۳۴	۳۶/۶۷	۱۶/۱۷

با توجه به نمودار و جدول فوق مشاهده می‌شود، افزایش عرض نواحی مرزی در دیوار با افزایش مقاومت،

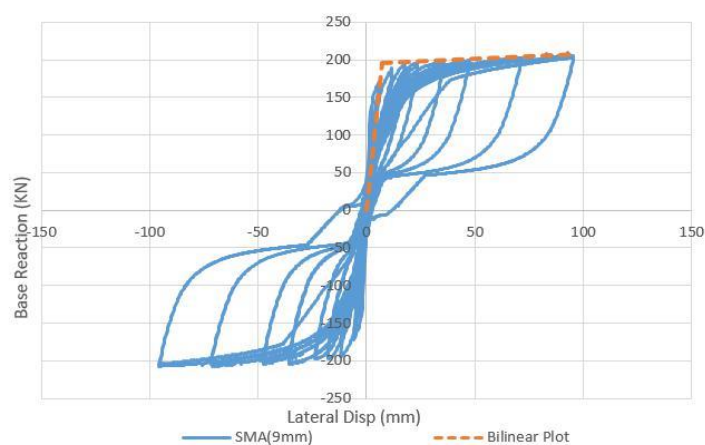
سختی و شکل‌پذیری همراه خواهد بود.

۴-۳-۴- مقاومت، سختی و شکل پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر قطر میلگردهای SMA

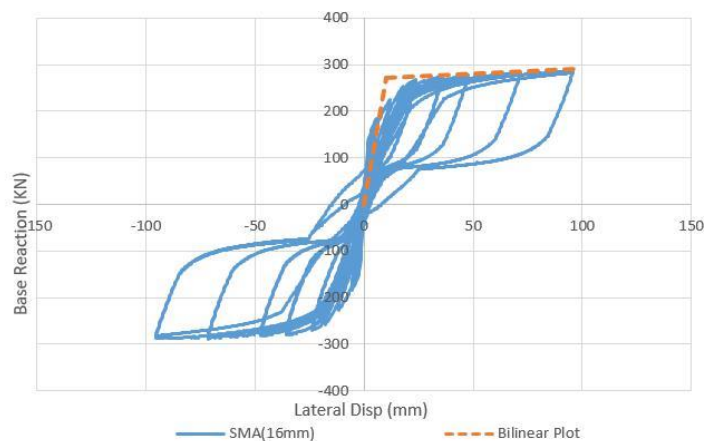
در این مرحله از طریق دوطبقی نمودن نمودارهای چرخه‌ای مدل دیوار W2-NR اقدام به محاسبه پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل‌ها تحت پارامتر متغیر قطر میلگردهای SMA یا تاثیر درصد آرماتور SMA در محدوده تشکیل مفصل پلاستیک دیوار می‌پردازیم. در شکل ۴-۱۵ نمودارهای چرخه‌ای دوطبقی شده مدل دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگردهای SMA نشان داده شده است.



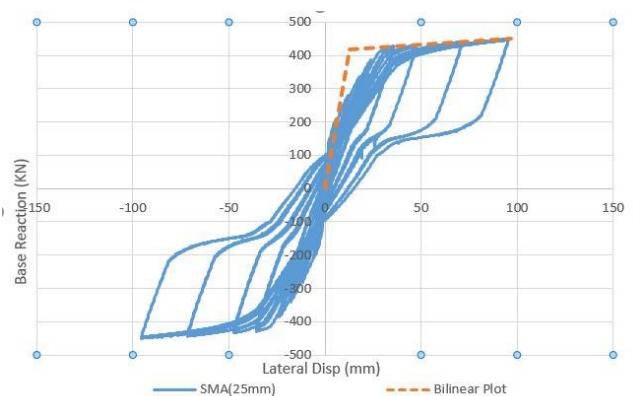
الف)



ب)



(ج)



(د)

شکل ۴-۱۵ نمودارهای چرخه‌ای دوخطی شده دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگرد SMA

الف) میلگرد SMA با قطر ۵ میلی‌متر ب) میلگرد SMA با قطر ۹ میلی‌متر

ج) میلگرد SMA با قطر ۱۶ میلی‌متر د) میلگرد SMA با قطر ۲۵ میلی‌متر

در جدول ۴-۹ مقادیر مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگردهای

SMA آورده شده است.

جدول ۴-۹ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار W2-NR تحت پارامتر متغیر قطر میلگرد SMA

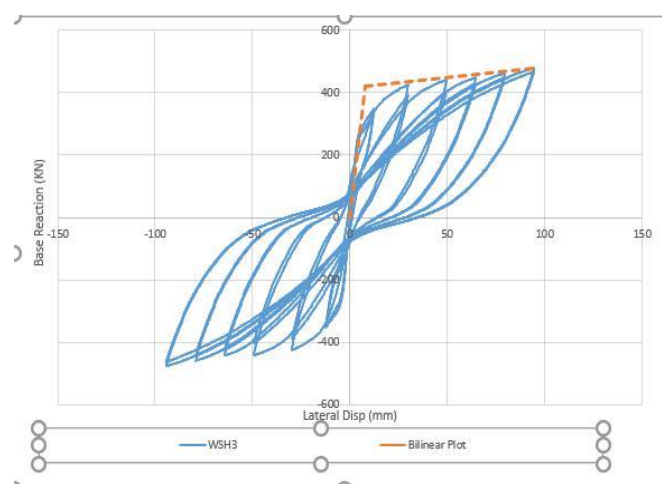
نام اختصاری دیوار	مقاومت (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری ($\Delta u / \Delta y$)
SMA(5mm)	۱۷۴	۲۱/۷۵	۱۲/۱۲۵
SMA(9mm)	۱۹۵	۲۵/۵۶	۱۱/۵۸
SMA(16mm)	۲۷۲	۲۷/۲	۹/۷
SMA(25mm)	۴۱۸	۳۲/۱۵	۷/۴۶

با توجه به نمودار و جدول فوق مشاهده می‌شود، با افزایش قطر میلگردهای SMA یا درصد آرماتور طولی

مقاومت و سختی افزایش و شکل پذیری دیوار کاهش می‌یابد.

۴-۳-۵- مقاومت، سختی و شکل پذیری دیوار WSH3

در این مرحله از طریق دوطبقی نمودن نمودارهای چرخه‌ای مدل دیوار WSH3 اقدام به محاسبه پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل می‌پردازیم. در شکل ۴-۱۶ نمودارهای چرخه‌ای دوطبقی شده مدل دیوار WSH3 نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶ نمودار چرخه‌ای دوطبقی شده دیوار WSH3

در جدول ۴-۱۰ مقادیر مقاومت تسلیم، سختی اولیه دیوار و شکل‌پذیری آورده شده است.

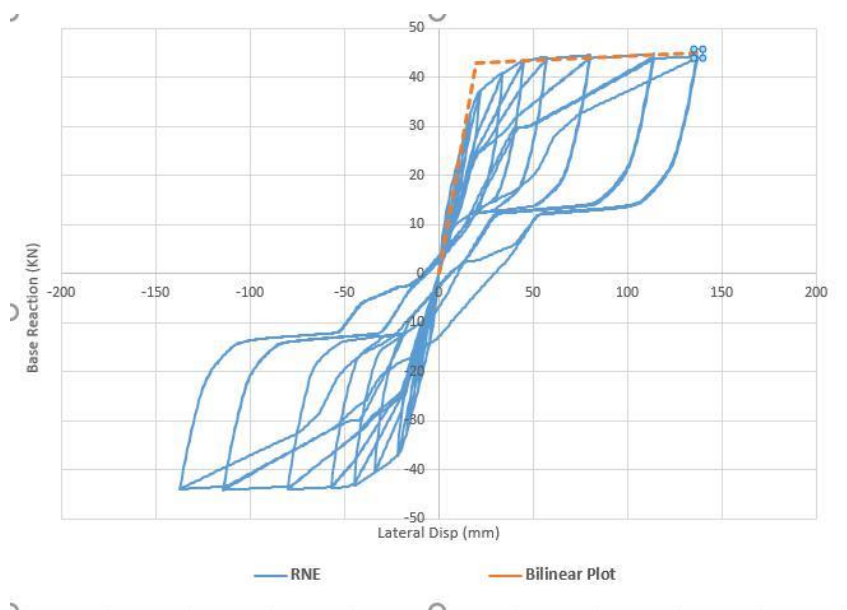
جدول ۴-۱۰ مقاومت تسلیم، سختی اولیه و مقدار شکل‌پذیری دیوار WSH3

نام اختصاری دیوار	مقاومت (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری ($\Delta u/\Delta y$)
WSH3	۴۲۰	۵۲/۵	۱۱/۷۵

۴-۳-۶- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون RNE

در مرحله بعد با استفاده از دوطبقی کردن نمودار چرخه‌ای ستون متشکل از بتن سیمانی مهندسی و میلگردهایی با حافظه شکل‌پذیر RNE اعتبارسنجی شده از مطالعات سعیدی و همکاران [۷] اقدام به استخراج مقادیر مقاومت تسلیم، سختی اولیه نمودار چرخه‌ای و شکل‌پذیری می‌نماییم. در شکل ۴-۱۷ نمودار چرخه‌ای

دوخطی شده ستون RNE نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۷ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده ستون RNE

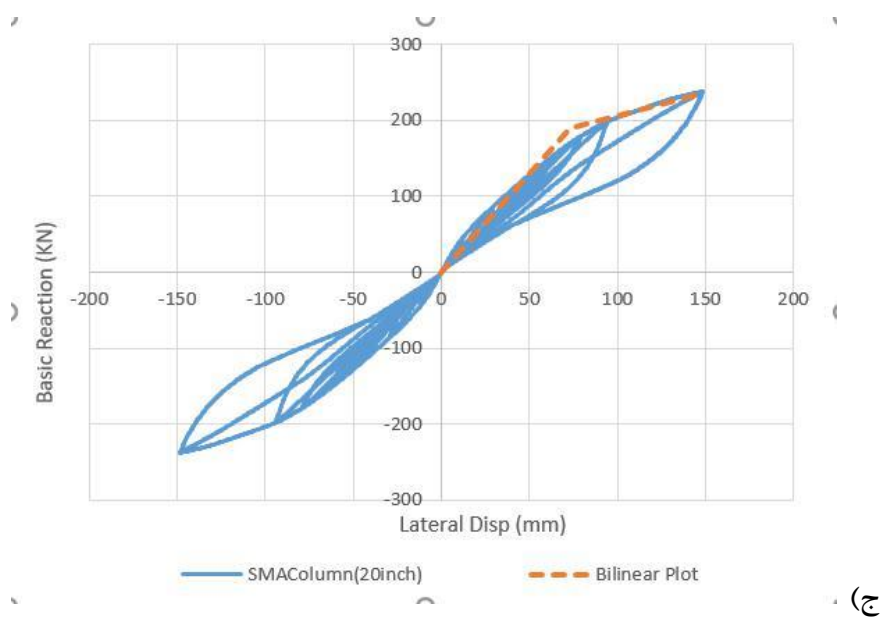
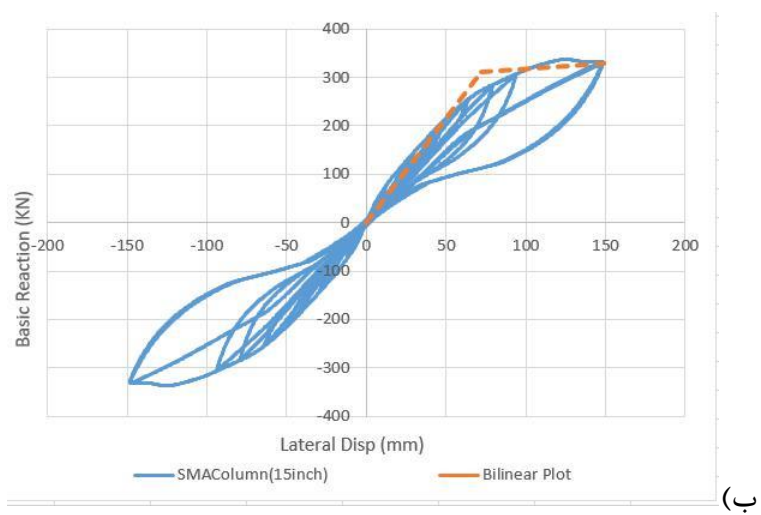
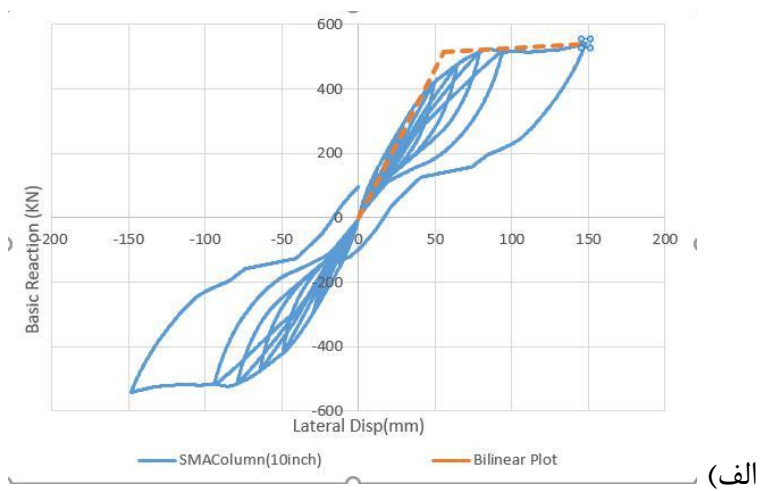
در جدول ۴-۱۱ مقادیر مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون RNE آورده شده است.

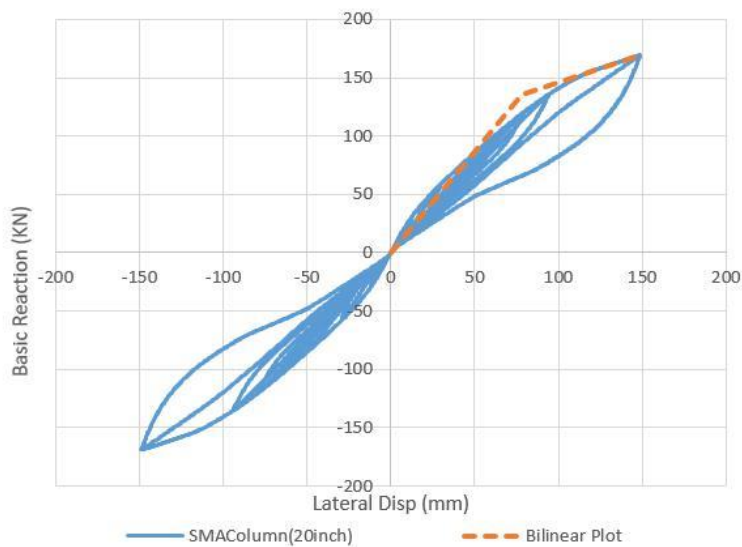
جدول ۴-۱۱ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون RNE

نام اختصاری ستون	مقاومت (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری ($\Delta u/\Delta y$)
RNE	۴۳	۲/۱۵	۶/۸۵

۴-۳-۷- مقاومت، سختی و شکل‌پذیری دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های مرزی RNE

در این مرحله از طریق دوخطی نمودن نمودارهای چرخه‌ای مدل ترکیبی دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های اتصال دهنده مرزی RNE اقدام به محاسبه پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل‌ها تحت پارامتر متغیر ارتفاع ستونک‌ها می‌پردازیم. در شکل ۴-۱۸ نمودارهای چرخه‌ای دوخطی شده مدل ترکیبی دیوار به همراه ستونک‌های مرزی نشان داده شده است.





(د)

شکل ۴-۱۸ نمودار چرخه‌ای دوخطی شده دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE

الف) ستونک RNE به ارتفاع ۱۰ اینچ ب) ستونک RNE به ارتفاع ۱۵ اینچ

ج) ستونک RNE به ارتفاع ۲۰ اینچ د) ستونک RNE به ارتفاع ۲۵ اینچ

در جدول ۴-۱۲ مقادیر مقاومت حد تسلیم، سختی و شکل‌پذیری دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE

تحت مقادیر مختلف در پارامتر ارتفاع ستونک‌ها آورده شده است.

جدول ۴-۱۲ مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مدل دیوار WSH3 به همراه ستونک‌های RNE تحت مقادیر مختلف ارتفاع ستونک‌ها

نام اختصاری دیوار به همراه ستونک	مقاومت (KN)	سختی (KN/mm)	شکل‌پذیری ($\Delta u/\Delta y$)
SMAColumn(10inch)	۵۱۵	۹/۲	۲/۶۴
SMAColumn(15inch)	۳۱۰	۴/۳	۲/۰۷
SMAColumn(20inch)	۱۹۰	۲/۶	۲/۰۲
SMAColumn(25inch)	۱۳۵	۱/۷۳	۱/۹

با توجه به نمودارها و جدول فوق مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع ستونک RNE مقاومت، سختی و شکل

پذیری دیوار کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تحلیل‌های نرم افزاری نشان می‌دهد ارتفاع کمتر از ۱۰ اینچ برای

ستونک RNE مناسب نمی‌باشد و مدل زود به واگرایی می‌رسد بنابراین به نظر می‌رسد در این مدل نوآورانه

مناسب‌ترین ارتفاع برای ستونک RNE، ۱۰ اینچ می‌باشد.

۴-۴- 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 Matlab یا Excel 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 [۴۳]. در جدول ۴-۴ و ۱۳ و ۱۴-۴ انرژی تلف شده تمامی مدل‌ها در طول تحلیل چرخه‌ای آورده شده است.

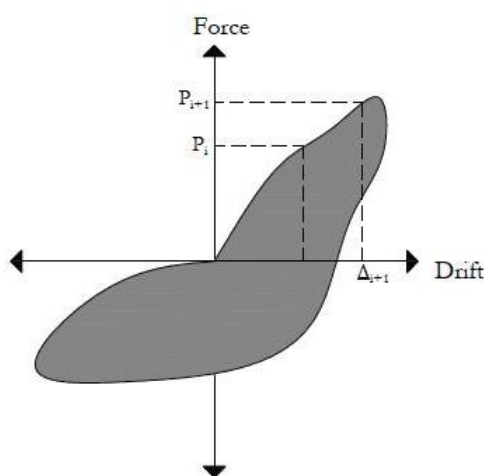


Figure D.11.1: Energy Dissipation Determination Diagram

شکل ۴-۱۹ دیاگرام محاسبه انرژی تلف شده در طی تحلیل‌های چرخه‌ای [۴۳]

$$E_{total} = \sum (P_i + P_{i+1}) (\Delta i + 1 - \Delta i) / 2 \quad (44-41)$$

رابطه ۴-۱: انرژی کل تلف شده در طول تحلیل چرخه‌ای

جدول ۴-۱۳ مقادیر انرژی تلف شده مدل‌های مختلف دیوار W1-SR و W2-NR تا دریافت ۴ درصد

نام اختصاری مدل	انرژی تلف شده در طول تحلیل چرخه‌ای (KN.mm)
W1-SR	188756.609
W2-NR	119333.3762
N(0.07AgFc)	99977.97169
N(0.15AgFc)	114108.992
N(0.2AgFc)	127534.8752
BoundWidth(100mm)	127527.5316

129356.6648	BoundWidth(150mm)
119333.3762	BoundWidth(200mm)
107319.6313	BoundWidth(250mm)
105241.9325	SMA diam(5mm)
110606.6368	SMA diam(9mm)
131961.1743	SMA diam(16mm)
290141.6576	SMA diam(25mm)

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

افزایش نیروی ثقلی باعث افزایش جذب انرژی در دیوار برشی می‌شود به‌طوری‌که مدل با نیروی ثقلی $N(0.2AgFc)$ دارای ۲۷٪ جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با نیروی ثقلی $N(0.07AgFc)$ است.

افزایش عرض نواحی مرزی دیوار برشی با کاهش جذب انرژی همراه است به‌طوری‌که مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۰۰ میلی متر دارای ۱۹٪ جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۲۵۰ میلی متر 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 میلی متر دارای ۲۵٪ جذب انرژی بیشتر نسبت به مدل با آرماتور به قطر ۵ میلی متر است. لازم به ذکر است قرار دادن میلگرد SMA با قطر بیش از ۱۶ میلی متر باعث بوجود آمده درصد آرماتور بیش از حد در نواحی مرزی و مقاومت نیرویی بالا در نواحی مرزی شامل میلگرد SMA می‌شود و دیوار تغییر شکل‌های ماندگار بزرگی را از خود برجای می‌گذارد که نشان دهنده بوجود آمدن خرابی در نواحی مرزی شامل میلگردهای فولادی (قسمت فوقانی نواحی مرزی) می‌باشد. بنابراین استفاده

از میلگرد SMA با قطر بیش از ۱۶ میلی متر برای این مدل مناسب نیست و همانطور که در نمودار دوخطی و جذب انرژی مربوط به میلگرد SMA به قطر ۲۵ میلی متر مشاهده می شود، تغییر شکل ماندگار زیاد و جذب انرژی بالا در این مدل نشان دهنده بوجود آمدن خرابی در نواحی خارج از میلگردهای SMA می باشد.

جدول ۴-۱۴ مقادیر انرژی تلف شده مدل های مختلف دیوار WSH3 به همراه ستونک های RNE تا دریافت ۲ درصد

نام اختصاری مدل	انرژی تلف شده در طول تحلیل چرخه ای (KN.mm)
WSH3	252949.131
SMAColumn(10inch)	88214.16
SMAColumn(15inch)	34797.5936
SMAColumn(20inch)	17737.7344
SMAColumn(25inch)	8529.93

باتوجه به جدول فوق مشاهده می شود استفاده از ستونک RNE در دیوار برشی جذب انرژی را ۶۵٪ کاهش می دهد که دلیل این کاهش جذب انرژی را می توان در مرکزگرایی و سختی بالای دیوار برشی نوآورانه جستجو کرد. همچنین مشاهده می شود با افزایش ارتفاع ستونک RNE جذب انرژی کاهش می یابد 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 می باشد.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق به بررسی پاسخ‌ها و رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی بتنی تحت پروتکل بارگذاری بر مبنای Atc 24 پرداخته‌ایم. به این منظور با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSEES که جهت تحلیل محیط‌های سازه و ژئوتکنیک کاربرد فراوانی دارد به مدل‌سازی دیوار برشی بتنی مبتنی به روش SFI-MVLEM یا مدل‌سازی دیوار با استفاده از المان‌های قائم چندتایی بر اساس روش مایکروفايبر پرداخته شده است. مدل‌های اصلی آنالیز شده در این مطالعه شامل ۲ دیوار بتنی با میلگردهای فولادی و 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.

پس از اعتبارسنجی مدل‌های اولیه به مطالعه پارامتریک مدل‌ها به منظور بررسی اثرات ابعاد نواحی مرزی، نوع چینش آرماتورها و میزان نیروهای ثقلی وارد بر دیوارهای برشی در مدل‌ها اقدام شد. به این منظور متغیرهای مورد مطالعه شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- اثرات تغییر در میزان بار محوری وارد بر دیوار بر روی پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار

۲- اثرات افزایش یا کاهش عرض نواحی مرزی دیوار بر میزان افزایش یا کاهش پاسخ‌های چرخه‌ای دیوار

۳- اثرات قطر و درصد میلگردهای طولی SMA موجود در نواحی تشکیل مفصل پلاستیک بر روی شکل‌پذیری دیوار بتنی.

۴- اثرات مربوط به تغییر در ارتفاع ستونک‌های مرزی دیوار بر روی افزایش یا کاهش سختی و میزان مقاومت تسلیم دیوار.

خروجی‌های مورد مطالعه شامل موارد زیر می‌باشند.

۱- نمودار چرخه‌ای بر حسب برش در پای دیوار به جابه‌جایی جانبی بالاترین گره

۲- مقاومت حد تسلیم دیوار

۳- سختی یا شیب ناحیه الاستیک در نمودار چرخه‌ای دیوار

۴ - میزان شکل پذیری دیوار بتنی

و میزان جذب و اتلاف انرژی در طی تحلیل چرخه‌ای بر روی دیوار بتنی.

۵-۲- نتیجه‌گیری

نتایج کسب شده از خروجی‌های به‌دست‌آمده در طی تحلیل‌های چرخه‌ای در این تحقیق به‌قرار زیر می‌باشند.

۱ - استفاده از میلگرد SMA در نواحی مرزی دیوار برشی تاثیر بسیار زیادی در کاهش تغییرشکل‌های ماندگار و خاصیت مرکزگرایی دیوار برشی دارد. با استفاده از میلگرد SMA در مدل W2_NR تغییر شکل‌های ماندگار بیش از ۸۰٪ نسبت به مدل W1_SR کاهش پیدا کرد.

۲- دیوار بتنی با مصالح فولادی شکل‌پذیر W1-SR دارای سختی و شکل‌پذیری بالاتر و مقاومت پایین‌تر نسبت به دیوار بتنی W2-NR شامل آرماتورهای ترکیبی فولاد و SMA می‌باشد. دلیل شکل‌پذیری بالاتر دیوار W1-SR باتوجه‌به یکسان بودن مقادیر تغییرشکل نهایی Δu نسبت به دیوار بتنی با آرماتورهای ترکیبی فولاد و SMA بیشتر بودن میزان جابه‌جایی حد تسلیم Δy مصالح SMA نسبت به فولاد شکل‌پذیر می‌باشد. باتوجه‌به رابطه شکل‌پذیری، افزایش جابه‌جایی تسلیم با فرض ثابت بودن جابه‌جایی نهایی منجر به کاهش میزان شکل‌پذیری می‌شود.

۳- مقدار جذب انرژی در مدل W2-NR، ۳۷٪ کمتر از مدل W1-SR می‌باشد. بنابراین استفاده از میلگرد SMA در دیوار برشی باعث کاهش جذب انرژی در دیوار می‌شود. دلیل این کاهش جذب انرژی از نمودار چرخه‌ای قابل مشاهده و پیش‌بینی می‌باشد. زیرا رفتار مرکزگرا در دیوار برشی W2-NR باعث کاهش سطح زیر نمودار چرخه‌ای می‌شود و سطح زیر نمودار چرخه‌ای هم نشان دهنده جذب انرژی است.

۴- بار ثقلی بیشتر باعث افزایش میزان مقاومت تسلیم در نمودار چرخه‌ای و در پی آن منجر به افزایش میزان سختی می‌گردد. دلیل افزایش سختی را می‌توان در رابطه سختی جستجو کرد. از آنجایی که سختی اولیه یا شیب الاستیک برابر با مقاومت تسلیم بر جابه‌جایی تسلیم است، مقاومت و سختی رابطه مستقیم داشته و با

افزایش یکی دیگری هم بیشتر می شود.

۵- با افزایش بار ثقلی بر روی دیوار و افزایش سختی و مقاومت، میزان شکل پذیری دیوار کاهش می یابد که علت آن را می توان رابطه معکوس بین سختی و شکل پذیری بیان نمود. افزایش سختی منجر به کاهش شکل پذیری سازه و با افزایش شکل پذیری منجر به کاهش سختی می گردد.

۶- با افزایش عرض نواحی مرزی دیوار برشی تغییر شکل های ماندگار به مراتب کاهش می یابد به طوری که مدل با عرض ناحیه مرزی ۲۵۰ میلی متر نسبت به مدل با عرض ناحیه مرزی ۱۵۰ میلی متر، ۵۶٪ تغییر شکل ماندگار کمتری از خود بر جای می گذارد.

۷- افزایش عرض ناحیه مرزی دیوار بتنی با توجه به درصد بالای آرماتورهای فولادی در این ناحیه منجر به شکل پذیری بیشتر کلی دیوار می شود. از آنجایی که در روش به کار رفته برای مدل سازی دیوارهای برشی در نرم افزار ناحیه جان دیوار را محصور نشده و نواحی مرزی را محصور شده فرض نموده ایم، افزایش میزان ابعاد بتن محصور شده در دیوار با افزایش شکل پذیری دیوار همراه است که دلیل آن را می توان در نمودارهای تنش - کرنش بتن محصور نسبت به بتن غیر محصور جستجو کرد.

۸- با افزایش قطر میلگرد SMA مقاومت دیوار و جذب برش پایه افزایش پیدا می کند به طوری که مدل با میلگرد به قطر ۱۶ میلی متر ۳۶٪ مقاومت بیشتری نسبت به مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی متر دارد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش قطر میلگرد تغییر شکل ماندگار دیوار افزایش می یابد. به طوری که تغییر شکل ماندگار در مدل با میلگرد به قطر ۱۶ میلی متر تقریباً ۵ برابر مدل با میلگرد به قطر ۵ میلی متر می باشد. دلیل افزایش مقاومت با بیشتر شدن قطر آرماتورهای SMA را می توان در افزایش سطح مقطع آرماتور و در نتیجه افزایش در نیرو یا مقاومت باربرداری و سختی آرماتورهای SMA پیدا کرد.

۹- در مورد مدل ترکیبی دیوار و ستونک های SMA، با توجه به نمودارها و جداول به دست آمده در فصل چهارم می توان بیان نمود ترکیب ستونک RNE تاثیر بسزایی در کاهش تغییر شکل های ماندگار دیوار WSH3 دارد و هرچه طول ستونک های مرزی دیوار افزایش پیدا کند، سختی و مقاومت کلی دیوار کاهش پیدا می کند.

باتوجه به اینکه ستون‌های کوتاه دارای سختی بالاتری نسبت به ستون‌های دیگر می‌باشند میزان جذب نیرو و انرژی تلف شده بالاتر در مدل‌هایی با ستون‌های کوتاه‌تر (۱۰ اینچ) اتفاق می‌افتد.

۱۰- 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 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 مناسب ترین ارتفاع برای قرار گیری در مدل دیوار برشی نوآورانه می‌باشد.

۵-۳- پیشنهادات

- به منظور مطالعات بیشتر در تحقیق‌های آتی می‌توان بررسی تأثیرات مربوط به هرکدام از موارد زیر را بر پاسخ‌های چرخه‌ای دیوارهای برشی پیشنهاد کرد.
- ۱- تأثیرات نسبت ابعادی دیوار برشی (نسبت ارتفاع بر طول دیوار) بر روی پاسخ‌های چرخه‌ای و بررسی نسبت ابعادی مختلف دیوار بر روی میزان مقاومت و شکل‌پذیری دیوارهای بتنی.
 - ۲- استفاده از روش مدل‌سازی دیوار با المان‌های لایه‌ای یا غشایی و مقایسه نمودارهای چرخه‌ای به دست آمده با سایر روش‌های مدل‌سازی دیوار در نرم‌افزار OpenSEES.
 - ۳- بررسی اثر تغییرات در میزان تنش - کرنش بتن محصور شده در نواحی مرزی و اثرات مرتبط با آن بر روی پاسخ‌های کلی دیوار بتنی.
 - ۴- بررسی نحوه چیدمان آرماتورها در ناحیه مرزی دیوار و اثرات مرتبط با آن.
 - ۵- استفاده از مصالح هوشمند شکل‌پذیر SMA به فرم‌هایی بجز آرماتور (تاندون، رشته یا سیم و...) در داخل دیوار بتنی و بررسی اثرات منتج شده در نمودار چرخه‌ای دیوار برشی

مراجع

- [1] R. DesRoches, J. McCormick, and M. Delemont³, "Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars," *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, vol. 130, no. 1, pp. 38-46, 2004.
- [2] T. Paulay and M. N. Priestley, "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings," 1992.
- [3] K. Pilakoutas and A. Elnashai, "Cyclic behavior of reinforced concrete cantilever walls, Part I: Experimental results," *ACI Structural Journal*, vol. 92, no. 3, pp. 271-281, 1995.
- [4] M. Fintel and M. Fintel, "Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years," *PCI journal*, vol. 40, no. 3, pp. 62-80, 1995.
- [5] A. Abdulridha and D. Palermo, "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall," *Engineering Structures*, vol. 147, pp. 77-89, 2017.
- [6] A. Dazio, K. Beyer, and H. Bachmann, "Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls," *Engineering Structures*, vol. 31, no. 7, pp. 1556-1571, 2009.
- [7] M. S. Saiidi, M. O'Brien, and M. Sadrossadat-Zadeh, "Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 106, no. 1, 2009.
- [8] J. Ocel *et al.*, "Steel beam-column connections using shape memory alloys," *Journal of Structural engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 732-740, 2004.
- [9] M. S. Alam, M. A. Youssef, and M. L. Nehdi, "Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: A review," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1075-1086, 2007, doi: 10.1139/107-038.
- [10] S. R. Massah and H. Dorvar, "Design and analysis of eccentrically braced steel frames with vertical links using shape memory alloys," *Smart materials and structures*, vol. 23, no. 11, p. 115015, 2014.
- [11] M. Dolce and D. Cardone, "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, no. 11, pp. 2657-2677, 2001, doi: 10.1016/S0020-7403(01)00050-9.
- [12] D. Fugazza, "Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations," *Master's Thesis, University of Pavia, Pavia, Italy*, 2003.
- [13] F. P. A. d. Santos, "Vibration control with shape-memory alloys in civil engineering structures," 2011.
- [14] W. J. Buehler and F. E. Wang, "A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering," *Ocean Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 105-120, 1968.
- [15] A. Michael and W. Hart, "SME brass-a new engineering material," *The Metallurgist and Materials Technologist*, vol. 12, no. 8, 1980.
- [16] E. Graesser and F. Cozzarelli, "Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 117, no. 11, pp. 2590-2608, 1991.
- [17] R. DesRoches and B. Smith, "Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 415-429, 2004.

- [18] S. A. Motahari and M. Ghassemieh, "Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications," *Engineering Structures*, vol. 29, no. 6, pp. 904-913, 2007.
- [19] X. Lu, Y. Mao, Y. Chen, J. Liu, and Y. Zhou, "New structural system for earthquake resilient design," *Journal of Earthquake and tsunami*, vol. 7, no. 03, p. 1350013, 2013.
- [20] A. Abdulridha, D. Palermo, S. Foo, and F. J. Vecchio, "Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams," *Engineering Structures*, vol. 49, pp. 893-904, 2013.
- [21] P. Wong, F. J. Vecchio, and H. Trommels, "VecTor2 and FormWorks user's manual," *Department of Civil Engineering, University of Toronto*, pp. 54-58, 2002.
- [22] S. Varela, "A bridge column with superelastic NiTi SMA and replaceable rubber hinge for earthquake damage mitigation," *Smart Materials and Structures*, vol. 25, no. 7, p. 075012, 2016.
- [23] W. L. Cortés-Puentes and D. Palermo, "SMA tension brace for retrofitting concrete shear walls," *Engineering Structures*, vol. 140, pp. 177-188, 2017.
- [24] L. Cortés-Puentes, M. Zaidi, D. Palermo, and E. Dragomirescu, "Cyclic loading testing of repaired SMA and steel reinforced concrete shear walls," *Engineering Structures*, vol. 168, pp. 128-141, 2018.
- [25] B. Wang and S. Zhu, "Seismic behavior of self-centering reinforced concrete wall enabled by superelastic shape memory alloy bars," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 479-502, 2018.
- [26] Y. Mo, J. Zhong, and T. T. Hsu, "Seismic simulation of RC wall-type structures," *Engineering structures*, vol. 30, no. 11, pp. 3167-3175, 2008.
- [27] X. Lu, L. Xie, H. Guan, Y. Huang, and X. Lu, "A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 98, pp. 14-25, 2015.
- [28] K. Kolozvari, T. A. Tran, K. Orakcal, and J. W. Wallace, "Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 5, p. 04014136, 2015.
- [29] F. Bartlett, "Canadian Standards Association standard A23. 3-04 resistance factor for concrete in compression," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1029-1037, 2007.
- [30] P. Code, "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 3: Assessment and retrofitting of buildings," 2005.
- [31] R. Park, "Ductility evaluation from laboratory and analytical testing," in *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988*, vol. 8, pp. 605-616.
- [32] V. C. Li, "On engineered cementitious composites (ECC)," *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, no. 3, pp. 215-230, 2003.
- [33] R. Mayes and 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.

- [34] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, and G. L. Fenves, "OpenSees command language manual," *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, vol. 264, pp. 137-158, 2006.
- [35] M. Tazarv and M. Saiid Saiidi, "Reinforcing NiTi superelastic SMA for concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 04014197, 2015.
- [36] V. C. Li and M. Lepech, "General design assumptions for engineered cementitious composites (ECC)," in *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, 2006: RILEM Publications SARL, pp. 269-277.
- [37] T.-S. Han, P. H. Feenstra, and S. L. Billington, "Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading," *Structural Journal*, vol. 100, no. 6, pp. 749-757, 2003.
- [38] K. Kesner and S. Billington, "Investigation of ductile cement based composites for seismic strengthening and retrofit," *Fracture mechanics of concrete structures*, pp. 65-72, 2001.
- [39] G. Chang and J. B. Mander, "Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: part 1—evaluation of seismic capacity," *NCEER Technical Rep. No. NCEER-94*, vol. 6, 1994.
- [40] K. Kolozvari, K. Orakcal, and J. Wallace, "Shear-flexure interaction modeling for reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading," *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, PEER Report*, no. 2015/12, 2015.
- [41] S. A. Sheikh and S. Uzumeri, "Analytical model for concrete confinement in tied columns," *Journal of the structural division*, vol. 108, no. 12, pp. 2703-2722, 1982.
- [42] J. McCormick, J. Tyber, R. DesRoches, K. Gall, and H. J. Maier, "Structural engineering with NiTi. II: mechanical behavior and scaling," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 133, no. 9, pp. 1019-1029, 2007.
- [43] E. J. Lumpkin, "Enhanced seismic performance of multi-story special concentrically brace frames using a balanced design procedure," University of Washington, 2009.

Abstract

Permanent deformation after an earthquake increases the cost of retrofit and even the implementation of the rehabilitation plan. One of the passive control methods to control the lateral forces from the earthquake is to use a shear wall with good energy dissipation capability. Permanent deformation and cracking in the border and critical areas of the wall after relatively strong earthquakes leads to a decrease in the seismic performance of the wall. In this research, the responses and cyclic behavior of concrete shear walls under the cyclic loading protocol are investigated. For this purpose, using OpenSEES finite element software, concrete shear wall modeling based on SFI-MVLEM method or wall modeling using multiple vertical elements based on macrofiber method has been studied. The main models analyzed in this study include 2 concrete walls with steel rebars and memory alloy (SMA) with different dimensions and arrangement of reinforcements and innovative concrete wall with separate border elements in the form of concrete columns made of engineered concrete (ECC) and SMA rebars. Validation of the models was based on previous studies. After validation of the initial models, the parametric study of the models was performed in order to investigate the effects of the dimensions of the boundary areas, the type and arrangement of the reinforcements and the amount of gravitational forces on the shear walls in the models. The results obtained from the outputs show that the use of SMA materials in the boundary areas of the wall has a significant effect on the selfcentering behavior of the wall and the energy dissipation of the shear wall is reduced by using SMA materials.

Keywords: Concrete shear wall, shaped memory alloy, residual displacement, selfcentering behavior, cyclic analysis.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Seismic Performance of a New Self Centering- Repairable RC Shearwall

By:

Jafar Hosseini

Supervisors:

Dr. Farnoosh Basalighe

Advisor:

Dr. Jalil Shafaei

October 2021

