

## چکیده

با توجه به اینکه در ساختمان‌های بنایی، اعضای سازه‌ای اصلی که با نیروهای جانبی مقابله می‌کنند، دیوارها هستند، به منظور ارزیابی لرزه‌ای و همچنین تقویت این دیوارها الگوریتم مناسبی برای مدل‌سازی این دیوارهای غیر مسلح<sup>۱</sup> و همچنین دیوارهای تقویت شده با بتن پاشی یک طرفه و دو طرفه در نرم‌افزارهای متداول طراحی وجود ندارد.

نیاز به نرم‌افزارهای ویژه و بسیار تخصصی باعث شده است تحلیل رفتار، طراحی یا بهسازی لرزه‌ای ساختمان دارای دیوار مصالح بنایی غیر مسلح یا تقویت شده، برای اکثر مهندسين کاربردى نباشد. تدوین رویه‌ای برای استفاده از نرم‌افزارهای متداول علاوه بر حل مشکل فوق، امکان مدل‌سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح یا تقویت شده در ساختمان‌های نیمه‌اسکلت و یا مهندسی را فراهم می‌کند. در این مطالعه با مبنا قرار دادن نتایج آزمایشگاهی ۱۲ نمونه دیوار غیر مسلح و تقویت شده تحت بار چرخه‌ای، مقادیر بهینه پارامترها برای بهترین کالیبراسیون نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود استخراج شده است. قابلیت مدل‌سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح و مسلح شده در نرم‌افزارهای متداول تحلیل و طراحی ارزیابی شده است. همچنین کارایی روش‌های بهسازی دیوارهای مصالح بنایی و قابلیت نرم‌افزار در برآورد آنها نیز بررسی شده است.

**واژگان کلیدی:** دیوار مصالح بنایی، ارزیابی لرزه‌ای، دیوار مسلح شده<sup>۲</sup> با بتن پاشی، روال مدل‌سازی، المان لایه‌ای.

# کالیبره کردن مشخصات المان لایه‌ای برای مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای دیوارهای بنایی غیر مسلح و مسلح شده با شاتکریت

الهه‌سادات هاشمی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،  
e.s.hashemi@semnan.ac.ir

عبدالرضا سروقدمقدم

دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

نادر خواجه‌احمد عطاری

استادیار پژوهشکده ساختمان و مسکن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

سید امیرحسین هاشمی

استادیار دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین

## ۱- مقدمه

مقدار استهلاک انرژی مخرب زلزله به علت میرایی در این گونه بناها بیشتر می‌باشد [۲]؛ بنابراین با طراحی و ساخت و یا استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی مناسب می‌توان از این ساختمان‌ها به‌طور مطلوبی استفاده نمود.

به دلیل پیچیده و ناشناخته بودن رفتار ساختمان‌های بنایی و نیز عدم وجود اطلاعات فنی کافی، استاندارد ۲۸۰۰ در طراحی این ساختمان‌ها برخوردی کاملاً تجویزی داشته و رفتار سازه در زمان طراحی به روشنی مشخص نیست [۱]. از طرفی به دلیل کاربری بسیار مهم این ساختمان‌ها به دلیل در دسترس بودن و همچنین ارزان بودن مصالح این نوع از ساختمان‌ها، آسیب و ویرانی آنها به هنگام وقوع زلزله می‌تواند مرگ بسیاری از انسان‌ها را به همراه داشته باشد؛ بنابراین از مهم‌ترین مسائل

بسیاری از ساختمان‌های موجود در سرتاسر جهان از جمله در ایران، ساختمان‌های بنایی می‌باشند که تعداد قابل شماری از آنها را بیمارستان‌ها، مدارس و ساختمان‌های مسکونی تشکیل می‌دهند [۱]. تجربه زلزله‌های گذشته آسیب‌پذیری شدید این نوع از ساختمان‌ها را در برابر بارهای لرزه‌ای نشان داده است که این مسئله نشانه‌ای از نیاز فوری این نوع از ساختمان‌ها به مقاوم‌سازی است [۲]. ساختمان‌های بنایی به علت در دسترس بودن مصالح مورد نیاز آن در تمامی مناطق کشور و نیز ارزان بودن در مقایسه با سایر ساختمان‌ها، مقاومت نسبتاً خوبی در برابر آتش داشته و برای آلودگی‌های صوتی و حرارت، عایق مناسبی است. ساختمان‌های بنایی در مقابل نیروهای دینامیکی، میرایی بیشتری نسبت به ساختمان‌های فولادی و بتن مسلح دارند. به عبارت دیگر

افزایش مقدار فولادهای قائم نحوه شکست برشی دیوارها را بهبود می بخشد، اما شکل پذیری دیوار را کاهش می دهد. افزایش درصد فولاد افقی مود شکست دیوار را از حالت گسیختگی برشی ترد به گسیختگی خمشی شکل پذیر تغییر می دهد، به طوری که اضافه کردن درصد مناسبی فولاد افقی از ایجاد ترک قطری ناشی از کشش شده و شکست برشی اتفاق نمی افتد. چنانچه شناخت کاملی از مصالح بنایی و فولادهای مصرفی در دیوار وجود داشته باشد، می توان مقاومت خمشی را تا حد بسیار خوبی تخمین زد. آئین نامه ها، نتایج محافظه کارانه ای برای مقاومت برشی دیوار ارائه می دهند. در حد نهایی بین نتایج آزمایش دیوار مقیاس شده و دیوار مقیاس کامل تطابق خوبی وجود دارد [۲].

در سال ۱۹۹۱ مگنز و کالوی [۶] مطالعه ای آزمایشگاهی بر روی دیوارهای بنایی انجام دادند. در این پژوهش پنج عدد دیوار بنایی در مقیاس کامل تحت بار ثقلی و جانبی رفت و برگشت مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از انتخاب نمونه بررسی اثر نسبت ارتفاع به طول بر مقاومت برشی دیوار بود. البته اهداف دیگری نیز همانند رابطه ای جهت برآورد و تخمین مقاومت دیوارهای برشی بنایی و همچنین بررسی مدل های شکست دیوار مد نظر قرار گرفته بود. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در یک بار ثقلی ثابت برای دیوارهای باریک با نسبت ارتفاع به طول برابر با ۲ مقدار مقاومت برشی مشاهده شده کمتر از مقاومت برشی دیوارهای مشابه با نسبت ارتفاع به طول ۱/۳۴ می باشد. همچنین مشاهده شد که مودهای شکست برشی دیوار بدین صورت اتفاق می افتد که ابتدا در بارهای جانبی کم، شکست هایی در وسط دیوار و در بین لایه های آجرکاری ایجاد می گردد و با افزایش مقدار بار جانبی شکست های جدید در آجرهای دیوار نمایان می شود [۲].

در سال ۱۹۹۴ جانکلوسکی و همکاران [۷] مطالعه بر روی دیوارهای بنایی غیر مسلح انجام داده و روابطی تنوری برای محاسبه حداکثر بار جانبی درون صفحه ای قابل تحمل توسط این دیوارها را ارائه کردند.

امروزی جامعه مهندسی، ارزیابی لرزه ای این نوع ساختمان ها و در صورت نیاز تقویت آنها در برابر زلزله های محتمل است [۲]. در ساختمان های بنایی، اعضای سازه ای اصلی که با نیروهای جانبی مقابله می کنند، دیوارها هستند. این دیوارها در صفحه خود سختی و مقاومت بالایی دارند و عملکرد اصلی آنها در این صفحه صورت می گیرد و به پایداری ساختمان کمک می کنند [۳]. با توجه به اهمیت این اعضا تحقیق حاضر بر روی آنها متمرکز شده است. پیشینه تحقیقات بر روی ساختمان های بنایی به اندازه سازه های بتن مسلح و فولادی قدمت ندارد و طرح و محاسبه آنها تنها در سه - چهار دهه اخیر پیشرفت قابل ملاحظه ای داشته است. آنچه در ذیل آمده است مختصری از نتایج کارهای محققان در قرن بیستم و قرن حاضر است [۲]. در سال ۱۹۸۸، شینگ و همکاران [۴] تعداد ۲۲ دیوار بنایی برشی مسلح را با هدف دستیابی به روابط تجربی یا نیمه تجربی برای محاسبه مقاومت و شکل پذیری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که برای تعیین مقاومت خمشی دیوارهای برشی ضخیم می توان از تئوری ساده خمش استفاده کرد، همچنین با افزایش تنش قائم، شکل پذیری خمشی دیوار به شدت کاهش می یابد [۲]. در سال ۱۹۹۰ لاری و هریس [۵] مطالعه بسیار جامعی بر روی دیوارهای برشی بنایی ساخته شده با بلوک انجام دادند. این پژوهشگران تعداد ۹ عدد دیوار در مقیاس ۱:۳ و با ابعاد ۶۱×۶۱ سانتی متر را مورد آزمایش قرار دادند. این دیوارها مقیاس شده دیوارهایی با ابعاد ۱۸۳×۱۸۳ سانتی متر بودند که در سال ۱۹۸۸ توسط (شینگ و همکاران [۴]) در دانشگاه کلرادو مورد مطالعه قرار گرفته بود. هدف آنها از چنین کاری مقایسه نتایج مدل مقیاس شده با نتایج آزمایش در مقیاس کامل عنوان گردید. نتایج کلی به دست آمده از این تحقیق چنین عنوان شده است:

شکست دیوارهای بنایی در دو مود خمشی یا برشی صورت می گیرد. مقادیر بار جانبی که باعث ایجاد اولین ترک قطری بزرگ در دیوار می شود، تقریباً ثابت است. مقاومت خمشی و برشی دیوارها با افزایش مقدار فولادهای قائم افزایش می یابد.

الاستیسیته بر حسب مقاومت فشاری ملات ارائه کردند. در سال ۲۰۰۶ تسنیمی [۱۴] مدل‌سازی سازه‌های بنایی و همچنین تأثیر سرعت بارگذاری بر نتایج آزمایشگاهی را بررسی نمود. در سال ۲۰۰۷ همنت و همکاران [۱۵] روابطی ساده برای به دست آوردن مدول الاستیسیته آجر، ملات و مصالح بنایی ارائه نمودند. همچنین بر اساس مطالعات آزمایشگاهی منحنی تنش- کرنش غیرخطی برای آجر، ملات و مصالح بنایی پیشنهاد دادند. در سال ۲۰۱۰ کلالی و کبیر [۳] با استفاده از مدل‌سازی ماکرو برآوردی از مشخصات خطی (سختی اولیه) و غیرخطی (مقاومت نهایی) انجام داده‌اند.

در سال ۲۰۱۱ غیائی و همکاران [۱] مشخصات ارتجاعی دیوار تقویت شده با پوشش بتن مسلح و نیز دیوار تقویت نشده که در امر ارزیابی آسیب‌پذیری با روش‌های خطی مورد استفاده می‌باشد را ارائه نمودند.

در سال ۲۰۱۲ غیائی و همکاران [۱۶] مدل ساده‌شده‌ای برای تحلیل دیوارهای برشی غیرمسلح تحت بارگذاری ترکیبی محوری، برشی و خمشی ارائه کردند. به منظور مدل‌سازی مصالح بنایی روش‌های مختلفی وجود دارد که در ادامه به معرفی این روش‌ها پرداخته شده است.

#### ۱-۱- ریز مدل‌سازی

در ریز مدل‌سازی آجرها، ملات و سطح بین آجر و ملات به صورت مجزا مدل می‌شود و بازشدگی و لغزش در سطح ملات شبیه‌سازی می‌گردد. این روش برای سازه‌های کوچک با توجه به حالات به شدت ناهمگن تنش‌ها و کرنش‌ها مناسب می‌باشد. هدف اصلی از ریز مدل‌سازی آن است که رفتار مصالح بنایی با آگاهی از خواص هر جزء و سطح، به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۱۷]. این روش اولین بار توسط پیچ [۱۸] مورد استفاده قرار گرفت و پس از آن نیز محققانی همچون لورنسو و راتس [۱۹] گام‌های بسیار مؤثری در جهت پیشرفت این نوع مدل‌سازی برداشته‌اند و روش‌های مختلفی همچون روش اجزای محدود برای آن پیشنهاد شده است.

در سال ۱۹۹۵ یوشیمورا و همکاران [۸] اثر آرماتورهای افقی و قائم را بر روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی کلاف‌بندی شده بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که فولادهای قائم و افقی نقش بسیار مهمی را در بالا بردن مقاومت جانبی و شکل‌پذیری دیوارهای بنایی به عهده دارند، از طرفی این فولادها باعث خواهند شد در بارهای جانبی شکست برشی دیوار که غالباً ترد و شکننده است، صورت نپذیرد.

در سال ۱۹۹۸ مگنز [۹] دیوارهای برشی بنایی مسلح را تحت بارهای رفت‌وبرگشتی درون‌صفحه‌ای مورد آزمایش قرار داد. هدف از این مطالعه بررسی مقاومت، شکل‌پذیری و توزیع انرژی در دیوار بنایی بود.

در سال ۱۹۹۹ امجد [۱۰] بر اساس آزمایش بر روی نمونه‌های ماسه‌ای مدول الاستیسیته ملات ماسه‌ای را تخمین زد و یک رابطه برای مدول الاستیسیته ملات ماسه‌ای بر اساس مقاومت فشاری ملات ارائه کرد.

در سال ۲۰۰۱ امیری مزلقانی [۱۱] ضوابط موجود در فصل سوم آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش که در دو شاخه آزمایشگاهی و تئوری صورت پذیرفت، دو ساختمان بنایی دو طبقه غیرمسلح و کلاف‌بندی شده در مقیاس ۱:۲ و بر مبنای توصیه‌های آیین‌نامه ساخته شد. این ساختمان‌ها تحت بار ثقلی ثابت و بار جانبی رفت‌وبرگشتی آزمایش شدند. به موازات کار آزمایشگاهی صورت گرفته، مدل‌سازی کامپیوتری این ساختمان‌ها با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شد و نهایتاً تحلیل دقیقی بر روی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل کامپیوتری صورت گرفت.

در سال ۲۰۰۳ سیدریس و همکاران [۱۲] رابطه‌ای بین مقاومت فشاری بتن و مدول الاستیسیته و همچنین رابطه‌ای بین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، با استفاده از روابط جذب آب سیمان ارائه کردند.

در سال ۲۰۰۴ خدر و الوینداوی [۱۳] بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی مشخصات سازه‌ای سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازسازی شده‌ی به کار رفته در ملات، رابطه‌ای برای مدول

## ۱-۲- درشت مدل سازی

استفاده از مدل های ریز در تحلیل لرزه ای سازه ها به دلیل هزینه و صرف وقت زیاد تنها جهت کارهای تحقیقاتی و نمونه های کوچک قابل استفاده است؛ بنابراین جهت مدل سازی و بررسی رفتار لرزه ای کلی سازه ها (در مقیاس بزرگ) نیاز به مدل هایی است که هم فاقد ریزه کاری ها و پیچیدگی های روش های ریز مدل سازی باشد و هم نمایش خوبی از رفتار کلی سازه ارائه دهد [۱۷]. در این روش المان بنایی به صورت یک المان پیوسته معادل مدل شده و تفاوتی بین آجر و ملات در آن در نظر گرفته نمی شود. المان پیوسته مورد استفاده در این روش دارای مشخصات متوسط اجزای تشکیل دهنده المان بنایی خواهد بود. درشت مدل سازی نیز به روش های گوناگون از جمله روش قاب معادل با استفاده از المان های تیر و ستون [۲۰]، روش بلوک های صلب [۲۱] و یا با استفاده از المان های پوسته ای انجام می شود.

علاوه بر طبقه بندی روش های مدل سازی سازه های بنایی به دو روش ریز مدل سازی و درشت مدل سازی، از یک دیدگاه دیگر، محققان سازه ای بنایی را به یکی از دو صورت زیر مدل سازی کرده اند:

- مدل سازی علمی و کاربردی

- مدل سازی دقیق و پیچیده

## ۱-۳- مدل سازی علمی و کاربردی

در این روش از مدل سازی برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح بنایی از مدل های گسیختگی ساده مانند موهر-کولمب، دراگر-پراگر و ... استفاده می شود که پارامترهای مورد نیاز جهت تعریف سطح گسیختگی کم بوده و برای تعیین آنها به آزمایش های اندکی نیاز است. این روش مدل سازی برای بررسی رفتار کلی دیوار یا سازه بنایی مناسب است [۳].

## ۱-۴- مدل سازی دقیق و پیچیده

تکامل تکنیک های اجزای محدود، تحلیل های دقیق تری را سبب شده است. در این روش مدل سازی، برای در نظر گرفتن

رفتار غیر خطی مصالح بنایی از مدل های تماسی دقیق یا ترکیب مفاهیم تئوری پلاستیسیته و مکانیک شکست استفاده می شود که قادرند هر دو پدیده زوال سختی و مقاومت را در نظر بگیرند. پارامترهای لازم جهت تعریف این مدل های غیرخطی زیاد بوده و به آزمایش های بیشتری نیاز است. این روش مدل سازی مشکل تر و زمان برتر بوده و استفاده از آن کاملاً تحقیقاتی است [۳].

با توجه به اینکه در ساختمان های بنایی، اعضای سازه ای اصلی که با نیروهای جانبی مقابله می کنند، دیوارها هستند، به منظور ارزیابی لرزه ای و همچنین تقویت این دیوارها الگوریتم مناسبی برای مدل سازی این دیوارهای غیر مسلح و همچنین دیوارهای تقویت شده با بتن پاشی یک طرفه و دو طرفه در نرم افزارهای متداول طراحی وجود ندارد.

نیاز به نرم افزارهای ویژه و بسیار تخصصی باعث شده است تحلیل رفتار، طراحی یا بهسازی لرزه ای ساختمان دارای دیوار مصالح بنایی غیرمسلح یا تقویت شده برای اکثر مهندسیین کاربردی نباشد. تدوین روالی برای استفاده از نرم افزارهای متداول علاوه بر حل مشکل فوق امکان مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح یا تقویت شده در ساختمان های نیمه اسکلت و یا مهندسی را فراهم می کند.

در این مطالعه با مبنا قرار دادن نتایج آزمایشگاهی ۱۲ نمونه دیوار غیرمسلح و تقویت شده تحت بار چرخه ای، مقادیر بهینه پارامترها برای بهترین کالیبراسیون نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود استخراج شده است [۲۲]. قابلیت مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح و مقاوم سازی شده در نرم افزارهای متداول تحلیل و طراحی ارزیابی شده است. کارایی روش های بهسازی دیوارهای مصالح بنایی و قابلیت نرم افزار در برآورد آنها نیز بررسی شده است.

## ۲- پارامترهای مؤثر در مدل سازی دیوارهای بنایی در نرم افزار

در این بخش پارامترهای مؤثر در مدل سازی دیوارها از جمله مشخصات دیوارها، نحوه بارگذاری، نوع تکیه گاه ها، مشخصات

مصالص مصرفی و المان لایه‌ای<sup>۳</sup> شرح داده شده است

زیر استفاده شده است [۲۳].

E: مقاومت‌سازی شده

W: دیوار

اولین عدد: (از ۱ تا ۳) شماره دیوار مرجع

دومین عدد: (از ۱ تا ۲) تعداد وجوه بتن پاشی شده

MM: مش به صورت شبکه پیش ساخته

MR: مش به صورت شبکه آرماتور

سومین عدد: (از ۱ تا ۱۲) شماره نمونه

لازم به ذکر است، از آنجا که نمونه‌ها در آزمایشگاه در

مقیاس ۱:۲ ساخته شده است در مدل‌سازی نیز از این مقیاس

استفاده شده است.

## ۲-۱- مشخصات دیوارهای مورد بررسی

در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی موجود ۱۲ نوع

دیوار که توسط دانشگاه تهران انجام گرفته است [۲۳]،

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی استفاده

شده است.

مشخصات این دیوارها در جدول (۱) آورده شده است. لازم

به ذکر است که در شماره گذاری نمونه‌ها URMW بیانگر دیوار

بتایی غیر مسلح می‌باشد [۲۳]. در شماره گذاری دیوارهای بتایی

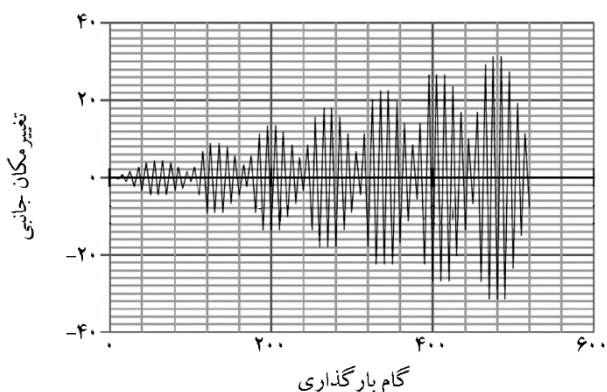
مسلح شده با بتن پاشی یک طرفه و دوطرفه از علائم اختصاری

جدول (۱): مشخصات دیوارهای آزمایش شده [۲۳].

نمونه	طول (mm)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	مقاومت برشی ملات (Mpa)	تنش محوری (Mpa)	مقاومت فشاری ملات (Mpa)	نوع مش	ابعاد چشمه (mm×mm)	قطر آرماتور (mm)	متوسط ضخامت بتن پاشی	مقاومت فشاری بتن (Mpa)
URMW-1	۲۷۰۰	۱۶۰	۱۳۵۰	۰/۲	۰/۱	۸	-	-	-	-	-
URMW-2	۱۹۰۰	۱۰۵	۱۳۶۰	۰/۲۲	۰/۱	۸/۴	-	-	-	-	-
URMW-3	۱۲۵۰	۱۶۰	۱۳۴۰	۰/۲۱	۰/۱۵	۷/۵	-	-	-	-	-
EMW11MM-4	۲۷۰۰	۱۶۰	۱۳۷۰	۰/۲۱	۰/۱	۹	شبکه فنسی	۲۵×۲۵	۱/۵	۲۷	۲۱/۶۳
EMW21MM-5	۱۹۰۰	۱۱۰	۱۳۷۰	۰/۲	۰/۱	۹/۶	شبکه فنسی	۲۵×۲۵	۱/۵	۲۹	۱۷/۵۵
EMW21MR-6	۱۹۰۵	۱۱۰	۱۳۶۰	۰/۲۲	۰/۱	۱۰	شبکه آرماتور	۷۵×۷۵	۳	۲۹	۲۶/۹۵
EMW31MR-7	۱۲۵۰	۱۶۰	۱۳۷۰	۰/۲۲	۰/۱۵	۱۱	شبکه آرماتور	۷۵×۷۵	۳	۲۸/۵	۲۳/۳۱
EMW31MR-8	۱۲۵۰	۱۶۰	۱۳۷۰	۰/۲	۰/۱۵	۹/۶	شبکه آرماتور	۷۵×۷۵	۳	۲۵	۲۴/۱۰
EMW22MM-9	۱۹۰۰	۱۱۰	۱۳۷۰	۰/۲	۰/۱	۱۱	شبکه آرماتور	۷۵×۷۵	۵/۵	۲۵	۲۰/۷۲
EMW32MM-10	۱۲۵۰	۱۱۰	۱۳۷۰	۰/۲	۰/۱۵	۹/۶	شبکه آرماتور	۷۵×۷۵	۵/۵	۲۵	۲۴/۲۷
EMW12MR-11	۲۷۰۰	۱۶۰	۱۳۶۰	۰/۲۲	۰/۱	۱۰	شبکه آرماتور	۱۵۰×۱۵۰	۵/۵	۲۵	۲۸/۶۴
EMW12MR-12	۲۷۰۰	۱۶۰	۱۳۷۰	۰/۲۱	۰/۱	۱۰	شبکه آرماتور	۳۰۰×۳۰۰	۵/۵	۲۵	۲۱/۸۵

## ۲-۲- بارگذاری نمونه‌ها

بار محوری در جهت قائم بر دیوار اعمال شده است و به شکل استاتیکی کنترل شونده توسط نیرو به نمونه‌ها وارد گردیده است. با توجه به تنش محوری ذکر شده در جدول (۱) نیروی محوری اعمال شده بر روی نمونه‌ها محاسبه و اعمال شده است. بار جانبی در جهت افقی بر دیوار اعمال شده است و به صورت بار چرخه‌ای در بالای دیوار وارد شده است. بارگذاری جانبی به شکل شبه استاتیکی<sup>۴</sup> و به شکل کنترل تغییر مکان با نسبت کم<sup>۵</sup> انجام پذیرفته است [۲۳]. در شکل (۱) تاریخچه تغییر مکان افقی وارد بر نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل (۱): تاریخچه تغییر مکان افقی وارد بر نمونه‌ها [۲۳].

## ۲-۳- قید دیافراگم<sup>۶</sup>

قید دیافراگم باعث می‌شود تا همه گره‌ها مقید شوند به‌عنوان یک دیافراگم صفحه‌ای و به صورت صلب حرکت کنند. همه گره‌ها طوری به هم متصل می‌شوند که حرکت داخل صفحه آنها صلب باشد؛ اما این حرکت صلب در خارج از صفحه وجود نخواهد داشت. در نتیجه در این مدل‌سازی دو گره بالای دیوارها مقید شده‌اند.

## ۲-۴- تکیه‌گاه‌ها

از آنجا نمونه‌های آزمایشگاهی بر روی یک پی سنگین واقع شده است و این پی نیز با مهارهای مناسب به کف قوی متصل شده‌اند، در مدل نیز از تکیه‌گاه‌های گیردار برای بیان این مفهوم استفاده شده است.

## ۲-۵- تعریف مصالح

### ۲-۵-۱- مصالح بنایی

مدول الاستیسیته مصالح بنایی با توجه به سختی قسمت خطی نمودار هیستریزس هر دیوار و در نظر گرفتن مدول برشی به میزان ۴۰ درصد مدول الاستیسیته و همچنین در نظر گرفتن سختی جانبی درون‌صفحه دیوار یکپارچه طره‌ای مقدار مدول الاستیسیته E برای هر دیوار به دست خواهد آمد.

$$K = \frac{1}{\frac{h_{eff}^3}{3E_m I_g} + \frac{h_{eff}}{A_v G_m}} \quad (1)$$

که در این رابطه:

$h_{eff}$ : ارتفاع مؤثر دیوار

$E_m$ : مدول الاستیسیته مصالح دیوار

$G_m$ : مدول برشی مصالح دیوار

$A_v$ : سطح مقطع برشی

$I_g$ : ممان اینرسی سطح ناخالص مقطع ترک نخورده.

به‌طور مثال برای URMW-1:

$$k = 31.2 \text{ KN/mm}$$

$$h_{eff} = 1400 \text{ mm}$$

$$A_v = 2700 \times 160 = 432000 \text{ mm}^2$$

$$I_g = \frac{2700^3 \times 160}{12} \text{ mm}^4$$

با توجه به مقادیر بالا و فرمول سختی مقدار  $E_m$  برابر است با:

$$E_m = 0.3615 \text{ KN/mm}^2$$

در این مطالعه رفتار مصالح بنایی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است، رفتار مصالح ایزوتروپیک مستقل از جهت بارگذاری و یا جهت مصالح است، از طرف دیگر رفتار برشی مستقل از رفتار کششی است و از تغییرات حرارت نیز تأثیر نمی‌پذیرد. با توجه به اینکه در نمونه‌های مورد آزمایش نیز بارگذاری غیرخطی فقط در یک جهت (به‌صورت جانبی) اعمال شده است، رفتار مصالح بنایی در این مدل‌سازی ایزوتروپیک فرض شده است.

برای منظور کردن رفتار غیرخطی مصالح بنایی، منحنی

$$m = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (۳)$$

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{3} \cdot k}{1 + \sqrt{3} \alpha} \quad (۴)$$

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{3} \cdot k}{1 + \sqrt{3} \alpha} \quad (۵)$$

که از آن نتیجه می‌شود:

$$\alpha = \frac{m-1}{\sqrt{3}(m+1)} \quad (۶)$$

$$K = \frac{2\sigma_c}{\sqrt{3}(m+1)} \quad (۷)$$

$\sigma_c$ : مقاومت فشاری ملات

$\sigma_t$ : مقاومت کششی ملات

اگر مقاومت کششی ملات ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن در نظر گرفته شود، با توجه به مقادیر مقاومت فشاری ملات (جدول ۱)، ضرایب دراگر-پراگر به‌طور مثال برای URMW-1 به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$m = 10$$

$$\alpha = 0.47$$

$$k = 0.83$$

#### ۲-۵-۲- مصالح بتنی

با دانستن مقادیر مقاومت فشاری بتن و رابطه (۸) مدول الاستیسیته بتن برای هر دیوار به دست می‌آید [۲۶].

$$E = 5000 * \sqrt{f_c} \quad (۸)$$

لازم به ذکر است که بهترین کالیبراسیون در این مطالعه، در نظر گرفتن ۲۵ درصد مقاومت فشاری بتن در گزارش، حاصل شده است. در همه دیوارها نیز ضریب پواسون برای مصالح بتنی ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه، رفتار مصالح بتنی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است که این رفتار مستقل از جهت بارگذاری و یا جهت مصالح است. از سوی دیگر رفتار برشی مستقل از رفتار کششی است و از تغییرات حرارت نیز تأثیر نمی‌پذیرد.

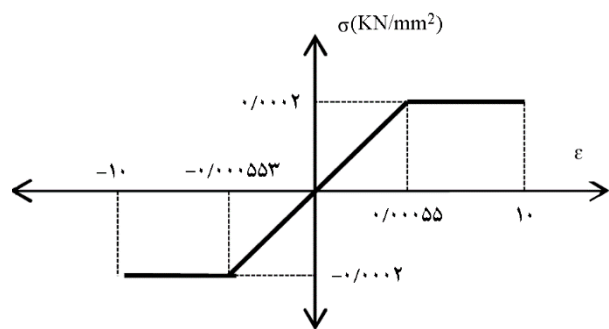
برای انواع مصالح باید منحنی رفتاری تنش- کرنش تعریف

تنش- کرنش دو خطی تعریف شده است. با دانستن  $\sigma_{12}$  و  $E$  و کرنش اولیه به دست خواهد آمد. مقدار  $\sigma_{12}$  برای هر دیوار در جدول (۱)، تحت عنوان مقاومت برشی ملات، آورده شده است. به‌طور مثال برای URMW-1 منحنی رفتار دو خطی در شکل (۲) نشان داده شده است:

$$\sigma_{12} = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$E = 0.3615$$

$$\varepsilon = 0.000553$$



شکل (۲): منحنی تنش-کرنش مصالح بتنی URMW1.

مدل تاکدا<sup>۲۱</sup> برای تمامی مصالحی که ترد و شکننده هستند مناسب است و اساساً در نرم‌افزار به‌منظور مصالح بتنی در نظر گرفته شده‌اند [۲۴]. از آنجایی که رفتار مصالح بتنی ترد است، نوع چرخه هیستریزس، برای این مصالح در همه مدل‌ها تاکدا در نظر گرفته شده است. معیار دراگر و پراگر، در واقع یک تعمیم ساده از معیار تسلیم فون میزس است که اثر فشار هیدرو استاتیکی را در تسلیم مواد در نظر گرفته است [۲۵].

این معیار یک معیار کلی است که اثر تمام مؤلفه‌های تنش را با استفاده از ثوابت تانسور تنش در نظر گرفته و رابطه آن به‌صورت زیر است:

$$F(j_{2D}, j_{3D}) = \alpha \cdot j_1 + \sqrt{j_{2D}} - k = 0 \quad (۲)$$

که در آن  $\alpha$  و  $k$  پارامترهای ثابت متعلق به خواص ماده هستند،  $J_1$  اولین ثابت تانسور تنش است و  $j_{2D}$  دومین ثابت تانسور تفاضل تنش‌های اصلی است.



«ساده<sup>۱۰</sup>» و «پارک<sup>۱۱</sup>» [۲۴]. در این مطالعه برای میلگرد از منحنی تنش - کرنش ساده استفاده شده است. چرخه هیستریزس نوع کینماتیک<sup>۱۲</sup>، بر اساس رفتار سخت شدگی کینماتیکی است که معمولاً در فلزات مشاهده می شود و برای تمامی مصالح فلزی، این مدل در نرم افزار تعریف شده است. در این مدل بخش زیادی از انرژی مستهلک می شود و برای مصالح شکل پذیر مناسب است [۲۴].

## ۲-۶- المان لایه ای<sup>۱۳</sup>

مقطع لایه ای، مجموعه ای از مشخصات مصالح و مشخصات هندسی است که یک یا چند لایه را معرفی می کند. برای این منظور باید مشخص شود که لایه چگونه در طول ضخامت خود ساخته می شود [۲۴].

موقعیت لایه نسبت به یک محور مبنا سنجیده می شود که این محور می تواند محور وسط، محور خنثی، محور بالا، محور پایین سطح مقطع و یا هر محور انتخابی دیگر باشد [۲۴].

در مقطع لایه لایه<sup>۱۴</sup> می تواند چندین لایه مصالح با رفتارهای متفاوت انتخاب شود.

- رفتار صفحه ای<sup>۱۵</sup>

- رفتار غشایی<sup>۱۶</sup>

- ترکیبی از دو رفتار صفحه ای و غشایی

همچنین مصالح هر لایه نسبت به المان می تواند زاویه داشته باشد که در این مدل سازی به وسیله پارامترسنجی زاویه مناسب برای مصالح بنایی<sup>۱۷</sup> ۴۵°، برای مصالح بتنی<sup>۱۸</sup> ۰° برای لایه میلگرد افقی<sup>۱۹</sup> ۰° و برای میلگرد قائم<sup>۲۰</sup> ۹۰° به دست آمده است [۲۴].

## ۲-۷- نتایج تحلیلی

در این بخش رفتار چرخه ای به دست آمده از نرم افزار برای دیوارهای بنایی غیر مسلح، مسلح شده با بتن پاشی یک طرفه و دوطرفه آورده شده است.

### ۲-۷-۱- دیوارهای بنایی غیر مسلح

با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در مدل سازی دیوار بنایی

شود. این منحنی بر اساس یک سری نقاط تنش - کرنش  $(f, \epsilon)$  تشکیل شده است که یکی از نقاط آن باید  $(0, 0)$  باشد. در این مطالعه از منحنی رفتاری بتن ساده<sup>۸</sup> برای مصالح بتنی استفاده شده است [۲۴].

پارامترهای منحنی تنش - کرنش بتن ساده در قسمت فشاری شامل یک سهمی و یک بخش خطی می باشد. پارامترهای زیر در این منحنی تعریف شده اند (شکل ۳) [۲۴].

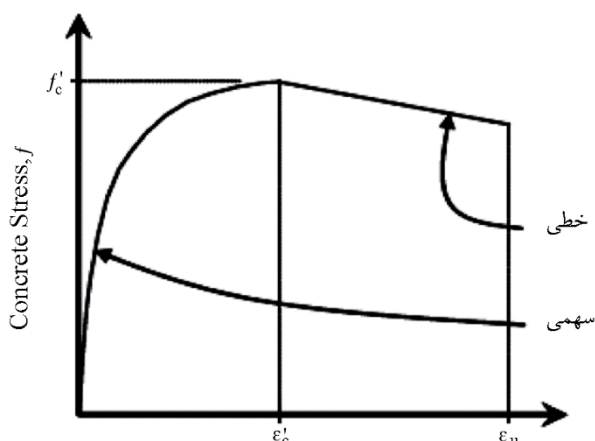
$\epsilon_c$ : کرنش بتن

$f_c$ : تنش بتن

$f_c'$ : مقاومت فشاری بتن

$\epsilon_c'$ : کرنش بتن در مقاومت فشاری بتن

$\epsilon_u$ : کرنش نهایی بتن



شکل (۳): قسمت فشاری منحنی رفتاری بتن ساده.

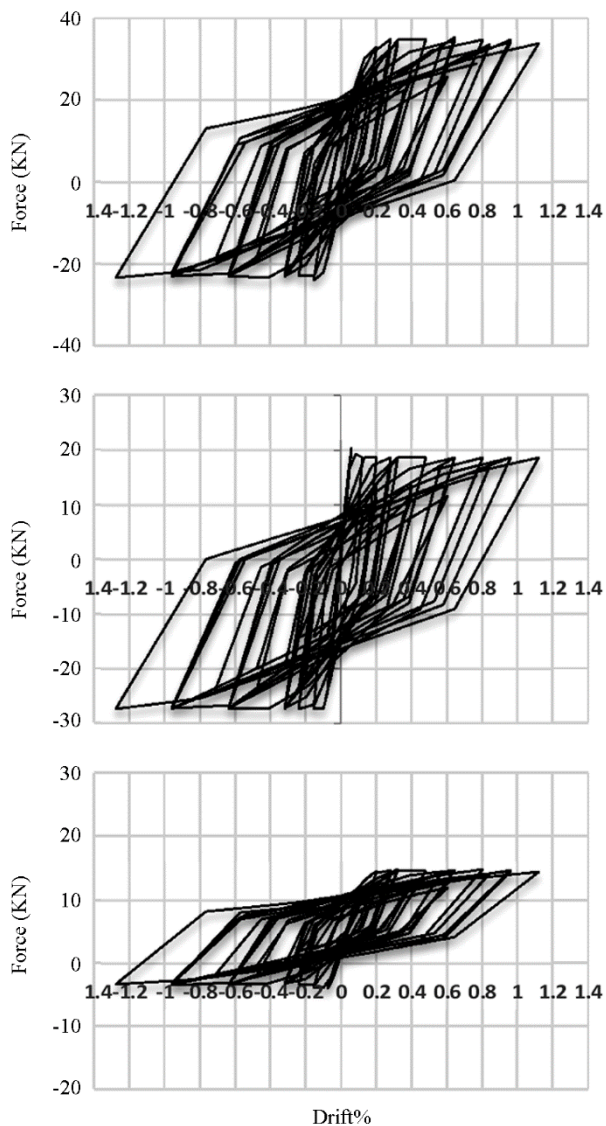
برای مصالح بتنی نیز همانند مصالح بنایی از چرخه هیستریزس تا کدا استفاده می شود. ضرایب دراگر-پراگر برای مصالح بتنی مطابق روابط (۲) تا (۶) محاسبه می شود.

### ۲-۵-۳- میلگرد

مصالح تک محوری<sup>۹</sup> برای مدل کردن رفتار میلگردها، کابل ها و تاندون ها استفاده می شود. اساساً این رفتار بر اساس کشش محوری است و یک جهت عمل می کند [۲۴].

برای میلگرد دو منحنی تنش - کرنش معرفی شده است:



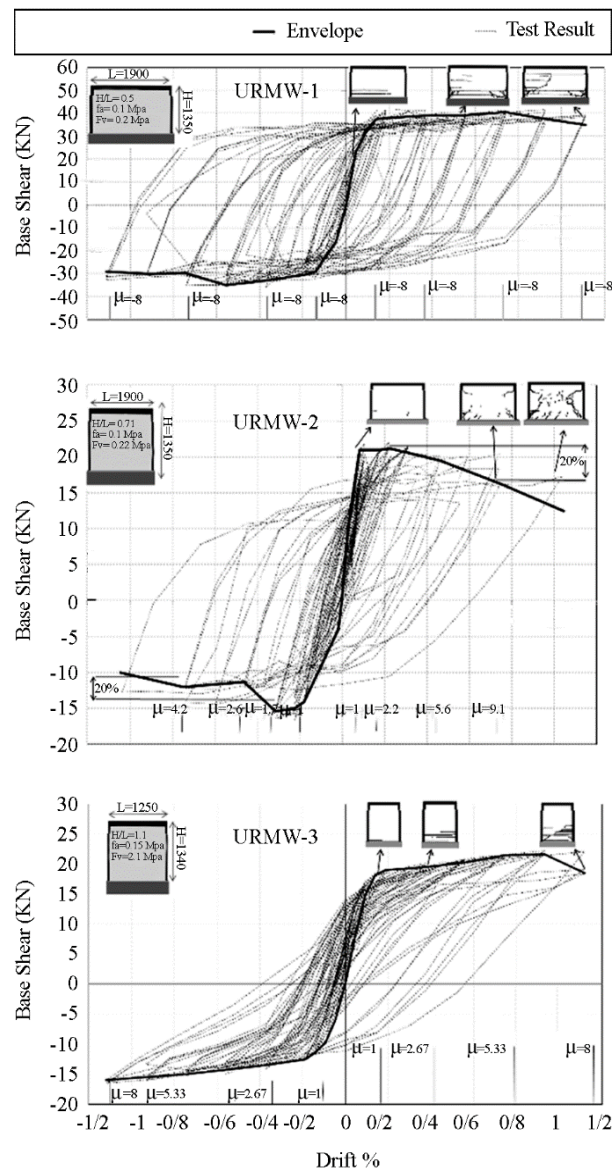


شکل (۵): نتایج تحلیلی رفتار چرخه‌ای.

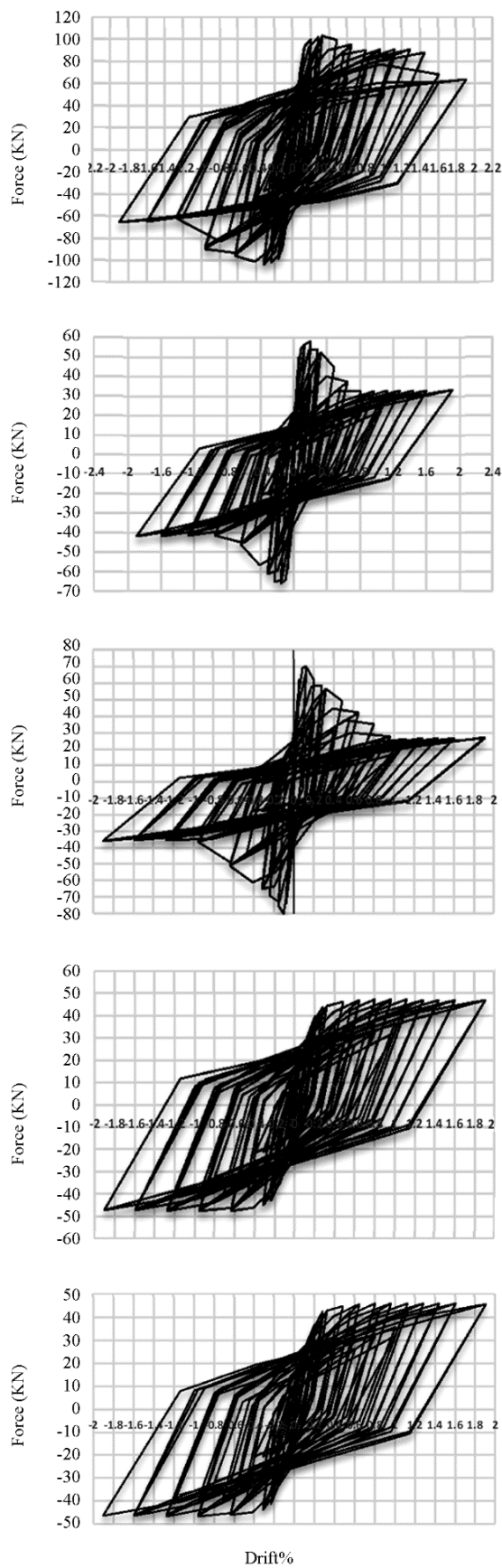
برای مقایسه بیشتر نتایج تحلیلی و نتایج مربوط به گزارش آزمایشگاهی، مقادیر مقاومت در هر دیوار در سه سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی در جدول (۲) ارائه شده است، همچنین مقادیر هر یک از مقاومت‌های مذکور نسبت به نتایج آزمایشگاهی، برای هر یک از دیوارهای بنایی غیر مسلح در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۳) در مورد دیوارهای بنایی غیر مسلح، محاسبه میانه‌ی میانگین خطاهای پارامترهای مقاومت و تغییر مکان تسلیم، مقاومت حداکثر و تغییر مکان نظیر آن و مقاومت و تغییر مکان نهایی با توجه به مقادیر جدول (۳) در مورد دیوارهای بنایی

غیر مسلح، بهترین تطبیق منحنی‌های چرخه‌ای حاصل از آزمایش‌ها (شکل‌های ۴ تا ۶) با نتایج تحلیلی (شکل‌های ۷ تا ۹) زمانی حاصل می‌گردد که در مدل کامپیوتری مشخصه‌های زیر اعمال شود.

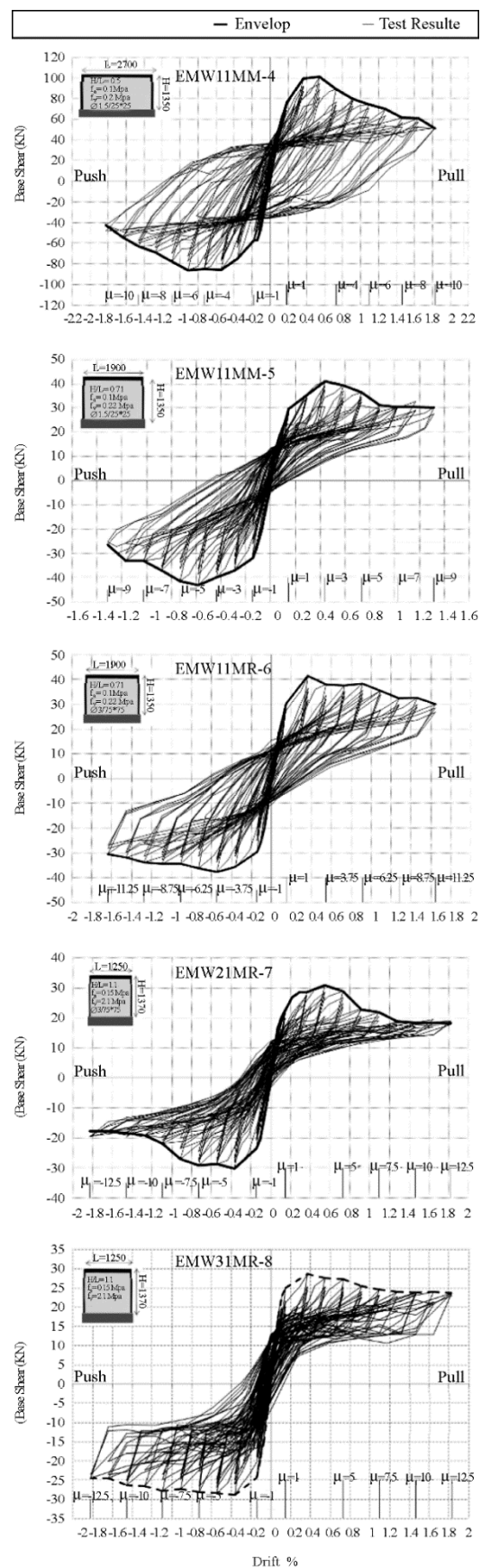
- رفتار مصالح بنایی: ایزوتروپیک
- چرخه هیستریزس انتخابی: تا کدا
- نوع مقطع: لایه‌ای
- زاویه مصالح بنایی با المان:  $45^\circ$
- اعمال بار مرده بر دیوار
- اعمال ضرایب دراگر- پراگر



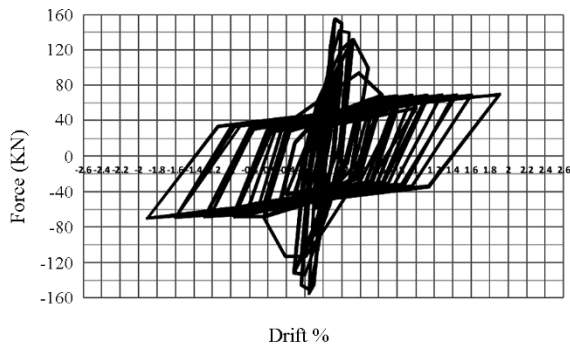
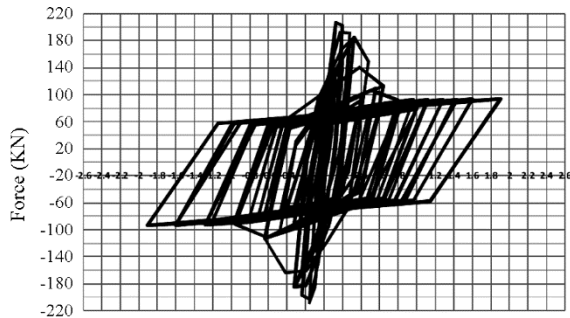
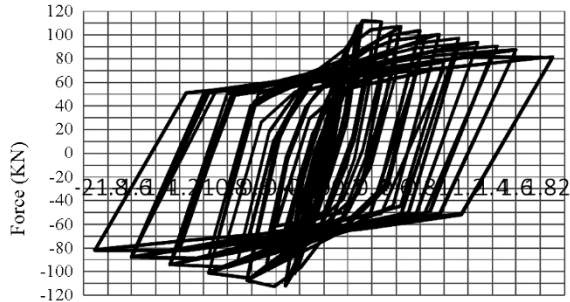
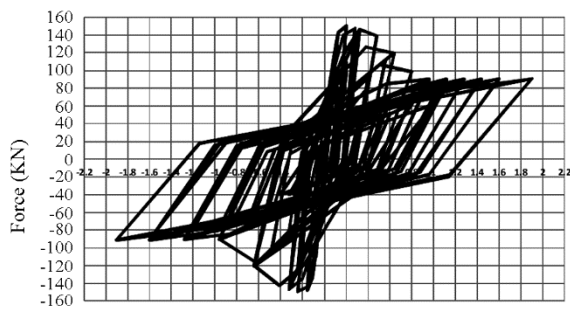
شکل (۴): رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی [۲۳].



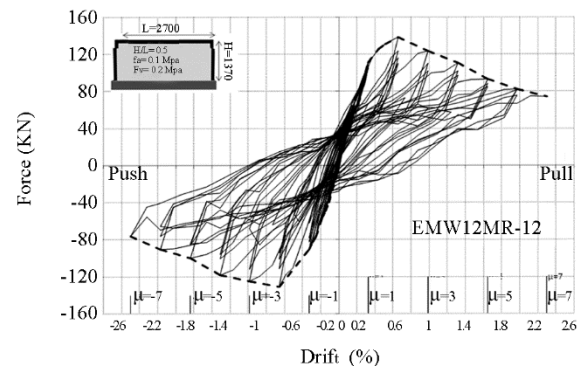
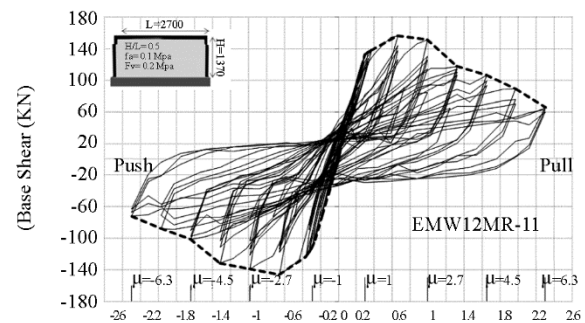
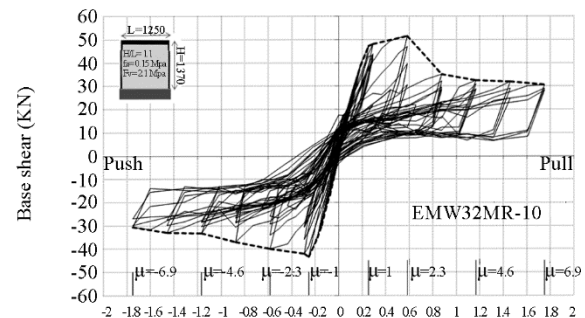
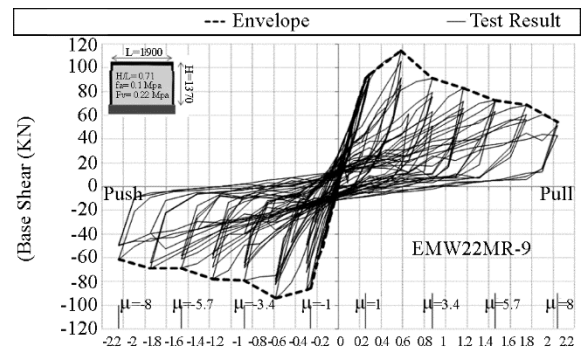
شکل (۷): نتایج تحلیلی رفتار چرخه‌ای.



شکل (۸): رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی [۲۳].



Drift %



Drift (%)

شکل (۹): نتایج تحلیلی رفتار چرخه‌ای.

شکل (۸): رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی [۲۳].

جدول (۲): مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی مقاومت در سه سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان تناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی.

مشخصه دیوار	مقاومت تسلیم (KN)		تغییر مکان نسبی تسلیم		مقاومت ماکزیمم (KN)		تغییر مکان نسبی ماکزیمم		مقاومت نهایی (KN)		تغییر مکان نسبی مقاومت نهایی	
	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی
URMW1	۳۰/۲۱	۳۷/۴	۰/۱۲۸	۰/۱۳	۴۰/۵	۳۵/۵۱	۰/۶۴	۰/۷۱	۳۴/۰۲	۴۱/۷	۱/۱	۱/۱۲
URMW2	۱۶/۵۸	۲۱/۴	۰/۰۴	۰/۰۷	۲۱	۲۰/۵۵	۰/۰۵۶	۰/۰۷	۱۸/۸۲	۲۲/۱	۰/۷	۱/۱۲
URMW3	۱۳/۲	۱۸/۵	۰/۱۲۸	۰/۱۳	۲۱/۹	۱۴/۹۴	۰/۳۲	۰/۹۳	۱۴/۵۵	۲۲/۲	۱/۱	۱/۱۲



جدول (۳): نسبت نتایج تحلیلی به مقادیر آزمایشگاهی.

دیوار نسبت	URMW-1	URMW-2	URMW-3
تغییر مکان نسبی تسلیم	۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۹۸
تغییر مکان نسبی متناظر با مقاومت حداکثر	۰/۹	۰/۸	۰/۳۴
تغییر مکان نسبی نهایی	۱/۰۱	۱/۶	۱/۰۱
مقاومت تسلیم	۰/۸	۰/۷۷	۰/۷۱
مقاومت تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر	۰/۸۷	۰/۹۷	۰/۶۸
مقاومت نهایی	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۶۵

صفحه‌ای انجام شده است. در نهایت نتایج برای همه لایه‌ها بر اساس رفتار لایه‌ای و وجود دو لایه میلگرد افقی و قائم ارائه شده است. در شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی و شکل (۷) نتایج تحلیلی مربوط به این دیوارها نشان داده شده است.

برای مقایسه بیشتر نتایج تحلیلی و نتایج مربوط به گزارش آزمایشگاهی، مقادیر مقاومت در هر دیوار در سه سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی در جدول (۴) ارائه شده است

۲-۲-۳- دیوارهای بنایی مسلح شده با بتن پاشی دوطرفه

برای رسیدن به مناسب‌ترین کالیبراسیون نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی پارامترهای مدل‌سازی همانند بخش ۲-۷-۲ انتخاب شده است. در شکل (۸) نتایج آزمایشگاهی و شکل (۹) نتایج تحلیلی مربوط به این دیوارها نشان داده شده است.

به منظور مقایسه بیشتر نتایج تحلیلی و نتایج مربوط به گزارش آزمایشگاهی، مقادیر مقاومت در هر دیوار در سه سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی در جدول (۵) ارائه شده است.

غیرمسلح این مقدار خطا کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد که بیشترین خطا مربوط به تغییر مکان نسبی متناظر با مقاومت حداکثر و کمترین خطا مربوط به تغییر مکان نسبی نهایی است.

۲-۲-۴- دیوارهای بنایی مسلح شده با بتن پاشی یک‌طرفه

برای رسیدن به بهترین نتایج در رفتار هیستریزیس بار-تغییر مکان دیوارهای مدل‌سازی شده ابتدا تمام مدل‌سازی‌ها بر اساس وجود یک لایه افقی میلگرد با رفتار خمشی و دو لایه بتن هر یک با ضخامت‌های یکسان ولی رفتارهای متفاوت خمشی و

جدول (۴): مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی مقاومت در سه سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی.

مشخصه دیوار	مقاومت تسلیم (KN)		تغییر مکان نسبی تسلیم %		مقاومت ماکزیمم (KN)		تغییر مکان نسبی مقاومت ماکزیمم %		مقاومت نهایی (KN)		تغییر مکان نسبی متناظر با مقاومت نهایی %		سختی نسبی اولیه (KN/mm)	
	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی		
EMW11MM-4	۷۸	۹۲/۰۱	۰/۱۶	۰/۱۲	۱۰۱	۱۰۳/۶۸۲	۰/۵۷	۰/۳۲	۵۰	۶۴/۱۴۹	۱/۸۱	۱/۹	۳۴/۸۲	۵۴/۷۶
EMW21MM-5	۳۰	۵۰/۵۶	۰/۱۲۵	۰/۰۵۶	۴۲/۰۵	۵۸/۴۹	۰/۴۴	۰/۲	۳۰	۳۳/۴۳	۱/۳	۱/۹	۱۷/۱۴	۶۴/۴
EMW21MR-6	۳۰	۶۲/۳۷	۰/۱۲۵	۰/۰۵۶	۴۲	۷۰/۷۷	۰/۳۸	۰/۱۲	۳۰	۲۷/۰۴	۱/۶۵	۱/۹	۱۷/۱۴	۷۹/۵
EMW31MR-7	۱۶	۳۹/۸۵	۰/۱	۰/۲	۳۱	۴۷/۴	۰/۵۷	۰/۶۴	۱۸	۴۴/۷۳	۱/۸۱	۱/۹	۱۱/۴۲	۱۴/۲۳
EMW31MR-8	۲۵	۳۷/۳۵	۰/۱۵	۰/۲	۲۸/۸	۴۶/۳	۰/۳۸	۰/۹۷	۲۴	۴۴/۱۸	۱/۸۱	۱/۹	۱۱/۹	۱۳/۳۲

جدول (۵): مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی مقاومت در سه سطح تغییر مکان سطح تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و تغییر مکان نهایی.

مشخصه دیوار	مقاومت تسلیم (KN)		تغییر مکان نسبی تسلیم %		مقاومت ماکزیمم (KN)		تغییر مکان نسبی متناظر با مقاومت ماکزیمم %		مقاومت نهایی (KN)		تغییر مکان نسبی متناظر با مقاومت نهایی %	
	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی
EMW22MR-9	۹۰	۱۴۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۱۲	۱۱۰	۱۵۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۲	۵۸	۹۰/۶۲	۲/۱	۱/۹
EMW32MR-10	۴۸	۸۹/۴	۰/۲۶	۰/۲	۵۱	۱۱۲/۱۴	۰/۵۹	۰/۳۲	۳۰	۸۱/۱۸	۱/۷۵	۱/۹
EMW12MR-11	۱۳۸	۲۰۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۱۲	۱۵۷	۲۰۶/۹۶	۰/۶۳	۰/۱۲۸	۶۵	۹۳/۴۴	۲/۳	۱/۹
EMW12MR-12	۱۱۰	۱۲۲/۵۹	۰/۳۳	۰/۰۸	۱۳۸	۱۵۴/۹۸	۰/۶۳	۰/۱۲۸	۷۸	۶۹/۳۶	۲/۳۵	۱/۹

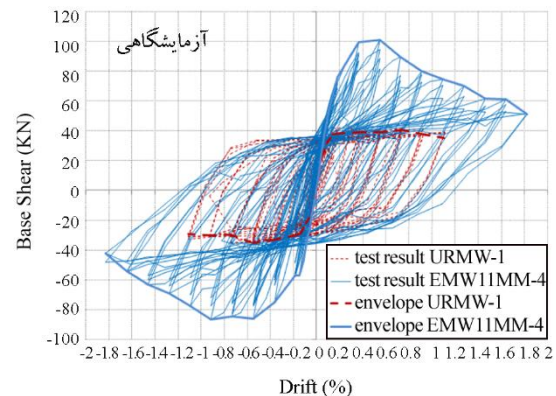
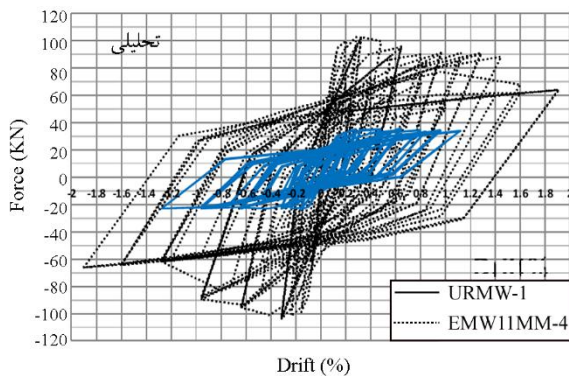
### ۳- بررسی کارایی روش‌های بهسازی دیوارهای مصالح بنایی و مطالعه قابلیت نرم‌افزار در برآورد آن

برای انتخاب مناسب شیوه‌های بهسازی، داشتن دیدی از تأثیر محتمل هر روش بر مشخصات شش‌گانه رفتاری می‌تواند کمک بزرگی به طراح باشد؛ بنابراین طراح می‌تواند، برای دیوار با ضعف در یکی از مشخصات رفتاری، گزینه مناسب برای بهبود آن را انتخاب نماید. در این بخش به مقایسه عملکرد اثر تقویت

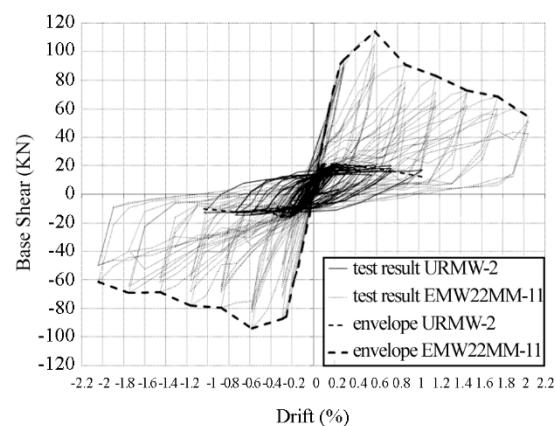
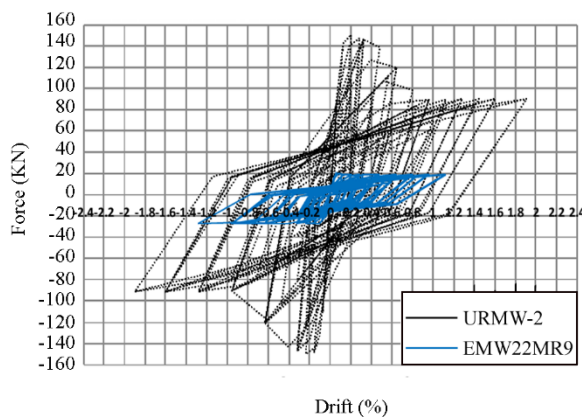
انجام گرفته و همچنین مقایسه این اثر در نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- نتایج تحلیلی

به عنوان نمونه مقایسه بین نمونه‌های (URMW1 و EMW11MM-4) در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): منحنی هیستریزس بار- تغییر مکان نسبی نمونه‌های URMW-1 و EMW11MM-4.



شکل (۱۱): منحنی هیستریزس بار- تغییر مکان نسبی نمونه‌های URMW2 و EMW22MR9.

در شکل های فوق، حداکثر مقاومت نمونه تقویت شده افزایش چشمگیری داشته است که اساساً به دلیل افزایش یکپارچگی در دیوار و اثر تقویت فولادهای مسلح کننده می باشد، لیکن افت مقاومت در دیوار تقویت شده با روند افزایش دامنه تغییر شکل به سوی مقاومت دیوار مرجع میل می کند که این موضوع در نمونه های آزمایشگاهی نسبت به نمونه های مدل سازی شده مشهودتر است. این در حالی است که تغییر مکان نسبی متناظر با حالت حدی مذکور حدود دو برابر دریافت مرجع است.

#### ۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر به مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح و تقویت شده پرداخته است. با توجه به اینکه بیشتر نرم افزارهای متداول طراحی که توسط مهندسان ساختمان به کار می رود، فاقد المان های مناسبی هستند که بتواند به سادگی، نظیر المان های بتنی و فولادی، المان های مصالح بنایی را نیز مدل نمایند، لذا امکان تحلیل مستقیم ساختمان هایی که در آنها اعضای دیوار مصالح بنایی موجود است، امکان پذیر نیست. راه حل هایی که به طور متداول به کار می رود یا استفاده از نرم افزارهای پیچیده مدل سازی می باشد که مناسب برای استفاده در کاربردهای روزمره دفاتر مهندسی نمی باشند و یا اینکه رفتار دیوارها در نرم افزارهای جداگانه ای برآورد شده و اثر آنها در نرم افزار تحلیلی متداول وارد گردد که قطعاً باعث کاهش در دقت نتایج به دلیل عدم امکان در نظر گرفتن اندرکنش ها می شود. هدف اصلی این مقاله برآورد قابلیت نرم افزارهای متداول مهندسی در مدل سازی مناسب رفتار غیرخطی چرخه ای این گونه اعضا بوده است. اهم نتایج این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- استخراج مقادیر بهینه پارامترها برای بهترین کالیبراسیون نتایج مدل سازی نرم افزاری با نتایج آزمایشگاهی
- ۲- ارزیابی قابلیت مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح و تقویت شده با بتن پاشی یک طرفه و دو طرفه در نرم افزارهای تحلیل و طراحی متداول مهندسی.

پارامترهای اصلی که رفتار چرخه ای دیوار مصالح بنایی را در نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی کنترل می نماید به شرح زیر است:

۱- بهترین تطبیق با منحنی های چرخه ای حاصل از آزمایش های دیوارهای بنایی غیر مسلح وقتی حاصل می شود که در مدل کامپیوتری رفتار مصالح بنایی «ایزوتروپیک»، نوع چرخه هیستریزس مصالح بنایی از نوع «تاکدا»، نوع مقطع «شل»، زاویه المان مصالح بنایی  $45^\circ$ ، با لحاظ اثر بار مرده و اعمال ضرایب دراگر- پراگر حاصل می گردد.

۲- بهترین تطبیق منحنی های چرخه ای حاصل از نتایج تحلیلی با نتایج حاصل از آزمایش های دیوارهای بنایی تقویت شده با بتن پاشی یک طرفه وقتی حاصل می شود که رفتار مصالح بنایی و بتنی «ایزوتروپیک»، رفتار میلگرد «تک محوری»، نوع چرخه هیستریزس مصالح بنایی و بتنی از نوع «تاکدا» و در مورد میلگردها از نوع «کینماتیک» در نظر گرفته شود. باید نوع مقطع برای هر سه نوع مصالح شل با زاویه  $45^\circ$  برای مصالح بنایی، زاویه  $0^\circ$  برای مصالح بتنی و زاویه های  $0^\circ$  و  $90^\circ$  برای لایه های میلگرد افقی و قائم باشد. علاوه بر اینها منحنی رفتار تنش- کرنش بتن «متقارن» و مقاومت مؤثر آن ۲۵ درصد مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته می شود. اثر بار مرده و تأثیر ضرایب دراگر- پراگر برای مصالح بنایی و بتنی نیز منظور می شود.

۳- بهترین تطبیق منحنی های چرخه ای حاصل از نتایج تحلیلی با آزمایش های تقویت شده با بتن پاشی دو طرفه نیز در مشخصات مصالح مطابق بند (۲) فوق حاصل می شود. طبعاً در این حالت مشخصات برای دو لایه بتن، دو لایه آرماتور افقی و دو لایه آرماتور قائم استفاده می گردد.

در بخش دوم نتایج، به ارزیابی قابلیت مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح و مسلح شده در نرم افزارهای تحلیلی و طراحی متداول مهندسی پرداخته شده است.

با توجه به اینکه شش پارامتر مقاومت و تغییر مکان تسلیم، مقاومت حداکثر و تغییر مکان نظیر آن و مقاومت و تغییر مکان

3. Kalali, A. and Kabir, M.Z. (2011) Out-of-Plane Performance Based on Homogenization & Micromechanics Approach. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**(2), 203-217 (in Persian).
4. Shing, P.B., Schullar, M., and Hoskere, V.S. (1990) Strength and Ductility of Reinforced Masonry Shear Walls. *Fifth North American Masonry Conference*.
5. Larbi, A., and Harris, H.G. (1990) Seismic Performance of Low Aspect Ratio Reinforced Block Masonry Shear Walls. *Proceeding of Fourth U.S. National Conference in Earthquake Engineering*, Vol. 2.
6. Magense, G., and Calvi, G.M. (1992) Cyclic Behavior of Brick Masonry Wall. *Proceeding of the 10<sup>th</sup> WCEE*, Madrid-Spain, 3517-3522.
7. Jankulosvki, E., and Parsanejad, S. (1995) Earthquake Resistance of Unreinforced Clay Brick Masonry Wall. *Proceedings of the Second International Conference of Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.
8. Yoshimura, K., Kikuchi, K., Okamoto, T, and Sanchez, T. (1996) Effect of Vertical and Horizontal Wall Reinforcements of Seismic Behavior of Confined Masonry Walls. *Proceeding of the 11<sup>th</sup> WCEE*, Mexico, Paper No. 191.
9. Magenes, G. (1996) In-Plane Cycle Testing on Reinforced Masonry Shear Wall. *Proceeding of the 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam.
10. Amjad, M.A. (1996) Elasticity and Shrinkage of Cement Sand Mortar Produced in Riyadh. *JKAU: Eng. Sci.*, Vol. 11, 91-105.
11. Amirimezghali, A. (2001) *Dynamic Analysis of a Two-Storey Brick Buildings Affected by the Earthquake*. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University (in Persian).
12. Sideris, K.K., Manita, P., Sideris, K. (2004) Estimation of ultimate modulus of elasticity and poisson ratio of normal of concrete. *Cement & Concrete Composites*, 623-631.
13. Kheder, G.F., and Al-Windawi, S.A. (2005) Variation in mechanical properties of natural and

نهایی شاخص‌های اصلی در منحنی رفتار اعضا می‌باشند، در این بند نتایج مقایسه برآوردهای تحلیلی با آزمایشگاهی در مورد این پارامترهای شش‌گانه آورده شده است.

در بخش آخر این تحقیق نیز به ارزیابی کارایی روش‌های بهسازی دیوارهای مصالح بتایی پرداخته شده است. برای انتخاب مناسب شیوه‌های بهسازی، داشتن دیدی از تأثیر محتمل هر روش بر مشخصات شش‌گانه رفتاری می‌تواند کمک بزرگی به طراح باشد؛ بنابراین طراح می‌تواند، برای دیوار با ضعف در یکی از مشخصات رفتاری گزینه مناسب برای بهبود آن را انتخاب نماید. در این قسمت نسبت هر پارامتر در دیوار تقویت شده به مقدار آن پارامتر در دیوار مرجع نظیر خود جمع‌بندی شده است.

۱- روش تقویت با بتن پاشی یک‌طرفه مقاومت را  $1/5$  تا  $3$  برابر نمونه‌های مرجع افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که تخمین تحلیلی این مقدار حدود  $1/5$  تا  $3/5$  برابر مقادیر آزمایشگاهی است.

۲- روش تقویت با بتن پاشی یک‌طرفه تغییر مکان را  $1/5$  تا  $3$  برابر نمونه‌های مرجع افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که در تخمین تحلیلی نسبت این مقدار  $50$  درصد کاهش تا  $50$  درصد افزایش داشته است.

۳- روش تقویت با بتن پاشی دوطرفه مقاومت را  $3$  تا  $7$  برابر نمونه‌های مرجع افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که تخمین تحلیلی این مقدار  $2$  تا  $3$  برابر مقادیر آزمایشگاهی است.

روش تقویت با بتن پاشی دوطرفه تغییر مکان را  $0/6$  تا  $1/7$  برابر نمونه‌های مرجع افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که در تخمین تحلیلی نسبت این مقدار حدود  $30$  درصد کاهش داشته است.

## مراجع

1. Ghiassi, B., Soltani Mohamadi, M. and Tasnimi, A.A. (2011) Linear Homogenization and Mechanical Characterization of Strengthened Masonry Elements with Concrete Overlay. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**(4), 455-466 (in Persian).
2. Improvement Network brick walls with steel and concrete lining. (2011) Tehran: (Poly Copy) (in Persian).



*Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE.* Berkeley, California.

25. Chen, W.F. and Balady, G.Y. (1985) *Soil Plasticity Theory and Implementation.* Amsterdam, Elsevier.

26. Strengthening the Strategic Council (2013) *Instruction Seismic Evaluation and Retrofit for Semi-Frame Building Available.* Road, Housing and Urban Development Research Center, Ministry of Road and Urban Development, Tehran, Iran (in Persian).

### واژه نامه

Unreinforced	۱- غیر مسلح
Reinforced	۲- مسلح شده
Shell Element	۳- المان لایه ای
Quasistatic	۴- شبه استاتیکی
Low Rate	۵- نسبت کم
Diaphragm Constraint	۶- قید دیافراگم
Takeda	۷- تاکدا
Simple Concrete	۸- بتن ساده
Uniaxial Material	۹- مصالح تک محوری
Simple	۱۰- ساده
Park	۱۱- پارک
Kinematic	۱۲- کینماتیک
Shell	۱۳- لایه ای
Shell Layered Section	۱۴- مقطع لایه لایه
Plate	۱۵- صفحه ای
Membrane	۱۶- غشایی

recycled aggregate concrete as related to the strength of their building mortar. *Materials and Structures*, 701-709.

14. Tasnimi, A.A. (2006) *Behaviour of Confined and Non-Confined Masonry Brick Buildings.* Institute of Natural Disasters, Tehran, Iran (in Persian).

15. Hemant, B., Durgesh C.R. and Sudhir K.J. (2007) Stress-Strain Characteristic of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, **19**(9), 728-739.

16. Ghiassi, B., Soltani, M.M., Tasnimi, A.A. (2012) A Simplified Model for Analysis of Unreinforced Masonry Shear Walls under Axial, Shear and Flexural Loading. *Engineering Structure*, Science Direct, **42**, 396-409.

17. Iranian resources and engineering management, IREMCO (2010) Experiences and lessons learned on seismic rehabilitation. Elm-o Adab Press, Tehran, Iran (in Persian).

18. Page A.W. (1978) Finite element model for masonry. *Journal of Structural Division*, **104**(8), 1267-1285.

19. Lourenco, P.B. and Rots, G. (1997) Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics*, **123**(7), 660-668.

20. Kappose, A.J., Penelis, G.G., Drakopoulos, C.G. (2002) Evaluation of simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, **128**(7), 890-897.

21. Asolo, S. (2004) Modeling in plane micro-structure of masonry walls by rigid elements. *International Journal of Solids and Structures*, **41**(13), 3625-3641.

22. Hashemi, E.S. (2013) *Numerical Investigation of the Behaviour of Masonry Walls Reinforced with Shotcrete.* M.Sc. Thesis in earthquake engineering. Road, Housing & Urban Development Research Center, Institute of Building and Housing.

23. Final reports 20 samples brick wall (2008) Industry Relationship Project with Organization for the Prevention and Management of the Crisis, Tehran (in Persian).

24. Computers and Structures, Inc. (1995) *CSI Analysis*

## Calibration of Shell Element Specifications for Cyclic Behavior Modeling of Unreinforced Masonry Walls Reinforced with Shotcrete

Elahesadat Hashemi<sup>1\*</sup>, Abdolreza Sarvghad Moghadam<sup>2</sup>, Nader Khajeh Ahmad Attari<sup>3</sup> and Seyed Amirhossein Hashemi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran,

\*Corresponding Author, email: e.s.hashemi@semnan.ac.ir

2. Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Building & Housing Research Center, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Qazvin Branch Islamic Azad University, Qazvin, Iran

In masonry buildings, walls are the main structural members that deal with lateral forces. For seismic evaluation and reinforcement of these walls, there is no appropriate algorithm for the modelling of these unreinforced walls as well as single and double sided shotcrete reinforced walls.

The necessity of a highly specialized software has made the behavior analysis, seismic optimization or design of buildings having reinforced or unreinforced masonry walls to be impractical for most engineers. Development of a process for the use of common software will solve the problem and also make it possible to model reinforced and unreinforced masonry walls in semi-frame building or engineering. In this study, by considering the laboratory results of 12 reinforced and unreinforced walls subjected to cyclic load, the optimal parameter values for the best calibration of the modeling results with the existing laboratory results have been extracted.

The present research has modelled unreinforced and reinforced masonry walls. Given that most common designing software used by construction engineers lack proper elements that enables them to easily model masonry elements just like concrete and steel elements; thus, it is not possible to directly analyze the building in which there are masonry wall members. The solutions that are commonly used are either the use of complex modelling software which are not suitable for use in daily engineering offices applications. The behavior of walls are estimated in individual software and their effect is included in common analytical software that will surely cause a decrease in the accuracy of the results due to the lack of a possibility for considering the interactions. Results of the research are briefly as follows:

1. Extraction of parameters optimal values for the best calibration of software modelling results with laboratorial results.
2. Evaluation of the modelling capability of unreinforced and shotcrete single and double sided reinforced walls in common engineering analysis and design software

The main parameters that control the cyclic behavior of masonry walls in software with laboratorial results are as follows:

1. The best match with cyclic curves obtained from unreinforced brick walls experiments is obtained when in the computer model, isotropic masonry behavior, Takeda masonry hysteresis cycle type, shell section and 45 degree masonry element angle are obtained by considering the effect of dead load and applying Drager-Prager coefficients.
2. The best match of cyclic curves obtained from analytical results with the results obtained from single sided reinforced brick walls experiments, is obtained when the behavior of masonry and concrete materials is considered as isotropic, the behavior of rebar is considered "uniaxial", type of masonry and concrete materials hysteresis cycle is considered as Takeda and rebar are considered as kinematic. The section type for each of the three types of shell

materials must be 45 degree for masonry materials, 0 degree for concrete materials and 0 and 90 degrees for horizontal and vertical rebar layers. The effect of dead load and the effect of Drager-Prager coefficients for masonry and concrete materials are also considered.

3. The best match for cyclic curves obtained from analytical results with double sided reinforced experiments is achieved in the characteristics of the materials, according to line 2. Naturally, in this state, characteristics for two concrete layers, two horizontal rebar layers and two vertical rebar layers are used.

In the second section of the results, we have evaluated the modelling capability of unreinforced and reinforced walls in common analytical and design engineering software.

Given that the six main parameters of strength and yield drift, maximum strength and its corresponding drift and the ultimate strength and drift are the main indicators in the curve of the members' behavior, in this paragraph, the results of the comparison of analytical estimation with laboratorial estimations about these six fold parameters are given.

In the final section of this research, the efficiency of the masonry walls optimization methods has been evaluated.

For proper selection of optimization methods, having a view of the probable effect of each method on the six fold behavioral characteristics can be a big help for a designer. Therefore, the designer can select a suitable option to improve a behavioral weakness in a wall. In this section, the ratio of each parameter in the reinforced wall to that parameter's value in its corresponding reference wall has been briefly given.

1. Single sided shotcrete reinforcement, increases the strength by 1.5 to 3 times the reference samples. While the analytical estimation of this value is about 1.5 to 3.5 times the laboratorial values.
2. Single sided shotcrete reinforcement increases the drift by 1.5 to 3 times the reference samples. While in the analytical estimation, this ratio has been decreased or increased by almost 50%.
3. Double sided shotcrete reinforcement increases the strength by 3 to 7 times the reference samples. While the analytical estimation of this value is about 2 to 3 times the laboratorial values.
4. Double sided shotcrete reinforcement increases the drift by 0.6 to 1.7 times the reference samples. While in the analytical estimation, this ratio has been decreased by about 30%.

**Keywords:** Masonry wall, Seismic evaluation, Shotcrete reinforced wall, Modeling process, Shell element.