

## تأثیر پیوستگی المان مرزی فولادی با بتن بر رفتار دیوارهای برشی بتن آرمه

احسان دهقانی<sup>\*</sup>، سید مهدی علامه نجفی، سید علی علامه نجفی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۱ شهریور ۱۳۹۴  
بازنگری: ۵ آذر ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۸ آذر ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۶ دی ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

دیوار برشی بتن آرمه  
ستون مرزی فولادی  
پیوستگی المان مرزی  
مدل پلاستیسیته آسیب  
آنالیز اجزای محدود

**چکیده:** دیوارهای سازه‌ای به صورت گسترده در ساختمان‌ها به عنوان عضو سازه‌ای مهم استفاده می‌شوند تا مقاومت جانبی قابل توجه، سختی و ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک مورد نیاز در برابر زلزله را تامین کنند. در سال‌های اخیر دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی فولادی، در مناطق با لرزه خیزی بالا مورد استفاده قرار گرفته است. ضوابط طراحی این دیوارها در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا شامل تعدادی راهنمای آیین‌نامه طراحی و الزامات می‌باشد. با این وجود مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد مطالعات بر روی رفتار این دیوارها در اکثر موارد به حالتی محدود می‌شود که انتهای ستون‌های مرزی دیوار کاملاً در فونداسیون مدفون شده و المان‌های مرزی دیوار پیوسته است. در این مقاله رفتار دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی پیوسته با حالتی که المان‌های مرزی دیوار غیر پیوسته می‌باشد و ستون‌های مرزی فولادی از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل شده‌اند، مقایسه می‌گردد تا برخی مفروضات طراحان سازه در طراحی این دیوارها ارزیابی گردد. ابتدا مدلسازی نمونه‌های معیار به روش اجزاء محدود انجام شده و درستی نتایج آن با نمونه‌های آزمایشگاهی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در این تحقیق از روش آنالیز اجزای محدود غیرخطی بتن آرمه و مدل رفتاری پلاستیسیته آسیب برای مدلسازی رفتار بتن استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد پیوستگی المان‌های مرزی دیوار باعث بهبود رفتار دیوار برشی مرکب می‌گردد. ضمن آن که این تأثیر با افزایش تعداد طبقات دیوار بیشتر می‌شود.

### ۱- مقدمه

دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی (SRC)، دیوارهای بتن مسلح با اعضای فولادی (که معمولاً در دو انتهای دیوار تعبیه شده) می‌باشند. این دیوارها به عنوان اعضای سازه‌ای شناخته می‌شوند که قادرند در مقابل نیروی جانبی درون صفحه‌های بالا و در سطوح کم تغییر مکان ایستادگی کنند. به همین دلیل جهت مقاوم کردن سازه در برابر زلزله مناسب می‌باشند. اصول طراحی این دیوارهای برشی مرکب بر مبنای آیین‌نامه‌های طراحی ویژه سازه‌های مرکب فولادی-بتنی و راهنمای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌باشد. آیین‌نامه‌های طراحی محدودیت نسبت نیروی محوری و الزامات آرماتورهای عرضی در المان‌های مرزی محصور شده را مشخص می‌کند که در نتیجه آن خاموت‌ها ضخیم و متراکم می‌شوند، خصوصاً در طبقات پایین‌تر ساختمان‌های بلند که پیچیدگی بیشتر در ساخت را سبب می‌شود [۱].

در سازه‌های مرکب، از مزایای هر دو نوع سازه فولادی و بتنی به همراه هم استفاده می‌شود؛ یعنی سازه‌های محصور شده با بتن، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به سازه‌های بتنی دارند، در عین حال سخت‌ترند و در نتیجه استعداد کمتری برای کمانش نسبت به سازه‌های فولادی دارند. همچنین مقاومت اعضای مرکب در برابر آتش‌سوزی نسبت به اعضای فولادی به

مربط بیشتر و وزن و ابعاد آن‌ها از اعضای بتن آرمه کمتر می‌باشد.

دیوار برشی‌های مرکبی که هم‌اکنون در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند عموماً شامل دیوار برشی فولادی مرکب و دیوار برشی بتن‌آرمه با المان مرزی فولادی می‌باشند. اگر چه این دیواربرشی‌ها در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا به واسطه عملکرد ترکیبی مناسب فولاد و بتن مورد توجه قرار گرفته است [۲-۴]، اما در آیین‌نامه‌های ایران برای این دیوارها هنوز ضوابط مشخصی وجود ندارد.

دیوارهای برشی مرکب با ستون‌های مرزی فولادی متداول در دنیا، در ناحیه المان مرزی پیوسته می‌باشند و ستون‌های فولادی در فونداسیون مدفون می‌باشند حال آن‌که المان‌های مرزی در دیوارهای برشی مرکب اجرا شده در ایران معمولاً ناپیوسته می‌باشد و ستون‌های مرزی از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل می‌شوند. با این وجود مهندسان طراح در ایران معمولاً این ناپیوستگی را در نظر نمی‌گیرند و فرض می‌کنند المان‌های مرزی پیوسته می‌باشند.

رفتار سختی و مقاومت این دیوارها و مقایسه آنها با تحلیل‌های مرسوم در دفاتر طراحی موضوعی است که تاکنون در هیچ یک از تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته است. ضمن آنکه ضوابط مشخصی برای طراحی دیوارها برشی مرکب با المان مرزی فولادی غیر پیوسته در آیین‌نامه‌های طراحی ایران وجود ندارد و آیین‌نامه‌های معتبر دنیا ضوابط دیوارهای برشی

<sup>\*</sup>نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Dehghani@qom.ac.ir

مسلح می‌باشد. در این آزمایش بر هم کنش مرکب با استفاده از برشگیرهای گل میخ در طول فصل مشترک قاب فولادی و پرکننده بتن مسلح ایجاد گردیده است. به طوری که هر دو جزء اصلی سیستم در برابر برش جانبی و لنگر واژگونی مقاومت می‌کنند [۱۳].

در تحقیق انجام شده توسط مستوفی نژاد تاثیر محصور شدن المان‌های مرزی دیوارهای برشی لاغر با کامپوزیت‌های FRP<sup>۶</sup> بر دیوار تحت بارگذاری یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. بر مبنای تحقیقات پیشین [۱۵]، برای ارتقاء ظرفیت باربری جانبی دیوارهای برشی بلند مرتبه بتن آرمه، تاثیر میلگردهای مقاومت بالا برای آرماتورهای طولی و عرضی در المان‌های مرزی دیوار برشی مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. در مطالعه تجربی انجام شده توسط آلتین<sup>۷</sup> و همکاران [۱۶]، دیوارهای برشی بتن آرمه که ضعف برشی داشتند به وسیله نوارهای فولادی چسبیده به شکل‌های گوناگون مقاوم سازی شد و رفتار هیستریسیس آن‌ها مورد تحقیق قرار گرفت. ضمن آن که تحقیق بر روی اثر نوارهای فولادی بر ارتقاء مقاومت جانبی و افزایش شکل‌پذیری دیوارهای برشی بتن آرمه با جزئیات غیر لرزه‌ای متمرکز شده بود. مطالعاتی توسط آدبار<sup>۸</sup> و همکاران برای توسعه یک مدل خمشی غیرخطی که می‌تواند در تعیین سختی خمشی موثر دیوارهای برشی بتن بلند مرتبه قابل استفاده باشد، انجام شد [۱۷].

### ۳- مدل‌سازی و معرفی مدل‌ها

دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی که به طور عمده در ایران اجرا می‌شود در قسمت المان مرزی غیر پیوسته می‌باشد و ستون‌های فولادی از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل شده است. علاوه بر آن صفحه ستون‌ها در قسمتی قرار دارند که امکان ایجاد بیشترین نیروی کششی در مقایسه با پانل دیوار برشی در آن وجود دارد. از طرف دیگر دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی متداول در دنیا به صورت پیوسته می‌باشد و ستون‌های فولادی در فونداسیون مدفون می‌گردد. بررسی مقاله‌های فنی در مورد این دیوارها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی رفتار دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی غیر پیوسته با فونداسیون انجام نشده است. لذا با توجه به عدم دسترسی به نتایج آزمایشگاهی معتبر در زمینه دیوارهای برشی با المان مرزی غیر پیوسته با فونداسیون، بر مبنای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب متداول در دنیا، با استفاده از روش المان محدود، رفتار دو نوع دیوار برشی مرکب مقایسه می‌گردند.

بر این اساس جهت مقایسه نتایج این دیوارها سه نوع دیوار مدلسازی می‌گردد؛ دیوار برشی بتن آرمه بدون ستون مرزی فولادی (که به اختصار RC نامیده و بعنوان دیوار مینا شناخته می‌شود)، دیوار برشی بتن آرمه مرکب با المان مرزی غیر پیوسته (که به اختصار SRC-BP نامیده می‌شود) و

مرکب با المان مرزی پیوسته با فونداسیون را مورد اشاره قرار داده‌اند [۲]. لذا این پژوهش بر روی نحوه عملکرد و رفتار دیوارهای برشی با المان مرزی غیر پیوسته با فونداسیون، مقایسه آن با نوع متداول اجرای این دیوارها در دنیا و همچنین ارائه پیشنهاد برای طراحی منطقی دیوارهای با المان مرزی غیر پیوسته متمرکز می‌باشد. علاوه بر آن صحت فرضیات موجود برای طراحی این دیوارها در ایران بررسی گردد.

### ۲- بررسی مطالعات روش‌های بهبود رفتار دیوارهای برشی با استفاده از اعضای مرکب

تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی مختلفی بر روی روش‌های بهبود رفتار دیوار برشی بتن آرمه با استفاده از عضو مرکب وجود دارد که در این جا تنها به چند مورد از مطالعات به اختصار اشاره می‌گردد. سیستم‌های دیوار برشی مرکب جهت بهبود شکل‌پذیری دیوارهای برشی متداول مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر این تحقیقات توسط محققین مختلفی صورت پذیرفته است [۸-۵]. در پژوهشی که توسط دان<sup>۱</sup> و همکاران در دانشگاه تیمیسورا<sup>۲</sup> انجام شد، رفتار پنج نوع مختلف دیوار برشی بتنی با پروفیل فولادی به همراه یک دیوار برشی بتنی متداول به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در تحقیقاتی که توسط کیان و همکاران در دانشگاه تیسینگو<sup>۳</sup> انجام شد، یک دیوار برشی نوین (دیوار برشی بتن‌آرمه با تیوب‌های فولادی مدفون شده) پیشنهاد شد و تاثیر المان مرزی بر رفتار دیوار برشی مورد آزمایش قرار گرفت. متغیرهای این آزمایش‌ها شامل نسبت مساحت تیوب فولادی، نسبت نیروی محوری و شکل سطح مقطع دیوار می‌باشد [۹]. یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی که در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان سازه قرار گرفته است، استفاده ترکیبی از ستون‌های پر شده با بتن (CFST<sup>۳</sup>) و دیوارهای برشی بتن آرمه می‌باشد. در ترکیب این ستون‌ها با بتن و دیوار برشی بتن‌آرمه، ستون‌ها و تیرهای مرکب به عنوان اعضای مرزی در مقابل لنگر واژگونی و توسعه ترک خوردگی دیوار بتنی مقاومت می‌کنند، در حالی که دیوار بتنی به عنوان عضو مقاوم در برابر برش عمل می‌کند [۱۰]. در سال‌های اخیر چندین ساختمان بلند مرتبه با این سیستم ساخته شده است، ضمن آن که تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است [۱۱]. در تحقیق انجام شده توسط ایساک<sup>۴</sup>، اثر سرعت بارگذاری بر الگوی ترک خوردگی، مد گسیختگی، پاسخ هیستریسیس بار جانبی-تغییر مکان و ظرفیت باربری جانبی دیوارهای برشی قاب‌بندی شده با ستون‌های لبه‌ای H شکل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. تحقیق ارائه شده توسط تانگ<sup>۵</sup> و همکارانش شامل مطالعه تجربی رفتار چرخه‌ای سیستم سازه‌ای مرکب متشکل از قاب فولادی نیمه صلب با پرکننده بتن

1 Dan

2 Timișoara

3 Concrete-Filled Steel Tubular

4 Esaki

5 Tong

6 Fiber Reinforced Concrete

7 Altin

8 Adeber

**جدول ۱: مشخصات فولاد مورد استفاده در مدل‌ها**

Table 1. Material properties of steel

IPE۱۶۰	۲۴۰	۰/۰۰۱۲	۰/۱۱
آر ماتور و بولت	۴۰۰	۰/۰۰۲	۰/۱۸

در پروفیل I شکل و آر ماتورها مطابق جدول ۱ می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته فولاد  $Gpa200$  و مقاومت فشاری بتن همه‌ی نمونه‌های دیوار برشی ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد.

در مدل المان محدود حاضر، مدل پلاستیسیته آسیب که در ABAQUS وجود دارد برای مدل‌سازی بتن استفاده شده است [۱۹]. در این مدل فرض می‌شود تابع جریان پتانسیل غیر وابسته می‌باشد. همچنین سطح تسلیم پیشنهادی توسط لوبلینر<sup>۳</sup> [۲۰] و فنوس<sup>۴</sup> [۲۱] را برای ارزیابی مختلف مقاومت بتن تحت فشار و کشش می‌پذیرد. توصیف رفتار پلاستیک بر مبنای رفتار تنش-کرنش معادل بتن می‌باشد. مدول الاستیسیته بتن ( $E_c$ ) ( $\sqrt{f_c} \cdot 473$ ) مطابق با ACI318 می‌باشد [۲۲]. که در این رابطه  $f_c$  مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن (بر حسب مگا پاسکال) می‌باشد. نسبت پواسون ( $\nu_c$ ) برابر با ۰/۲ فرض شده است. برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک بتن تحت فشار یک مدل تنش-کرنش معادل که توسط اتارد<sup>۵</sup> پذیرفته شده بود، پیشنهاد گردید. مدل‌سازی تحلیلی نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب ليو [۲۳] با استفاده از مدل تنش-کرنش پیشنهادی اتارد نشان داد که این نمودار می‌تواند به شکلی مناسب در شبیه‌سازی رفتار بتن (تحت فشار) مورد استفاده قرار گیرد. در این مدل، رابطه تنش-کرنش به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۴]:

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $Y = \frac{\sigma_c}{f_c}$ ،  $X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}}$ ؛  $\sigma_c$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب تنش و کرنش بتن می‌باشد.  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ، و  $D$  پارامترهایی هستند که توسط اتارد و ستانگ<sup>۶</sup> پیشنهاد می‌گردند [۲۴].

به دلیل افت قابل توجه مقاومت کششی پس از ترک‌خوردگی، رسیدن به همگرایی برای بتن‌های معمولی در تحلیل المان محدود مشکل می‌باشد. به همین دلیل یک مدل انرژی شکست<sup>۷</sup> پیشنهادی توسط هیلبرگ<sup>۸</sup> استفاده شد تا رفتار نرم شدگی کششی بتن شبیه‌سازی شود. در این مدل فرض گردیده انرژی شکست برای بتن با مقاومت ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۱۲ (کیلونوتن بر میلی‌متر) می‌باشد [۲۵].

- 3 Lubliner
- 4 Fenves
- 5 Attard
- 6 Setunge
- 7 Fracture energy
- 8 Hillerborg

دیوار برشی مرکب با المان مرزی پیوسته (که به اختصار SRC-FP نامیده می‌شود).

**۳-۱- نوع المان‌های المان محدود**

با توجه به مطالعات قبلی انجام شده که در بخش بررسی مطالعات اشاره گردید مدلسازی دیوار برشی بایستی به نحوی صورت پذیرد که اثرات زیر قابل بررسی باشد؛ ۱- تسلیم آر ماتورها ۲- خرد شدگی و ترک خوردگی بتن (رفتار غیر خطی بتن). نرم افزار اجزا محدود ABAQUS بدین منظور انتخاب گردیده است. المان‌های مورد استفاده در مدلسازی با توجه به فیزیک مسئله مورد تحلیل، انتخاب گردید؛ برای میلگردها با توجه به اینکه تنها درجه آزادی محوری آن‌ها مهم می‌باشد المان میله‌ای (خرپایی) دو گر-ای با سه درجه آزادی انتقالی در هر گر-ه مورد استفاده قرار گرفت. فولاد I شکل با استفاده از المان پوسته‌ای چهار گر-ه‌ای مدلسازی گردید. در این المان‌ها علاوه بر خیز، شیب نیز خواهیم داشت. چنانچه هندسه دارا شرایط پوسته باشد (همانند فولاد I شکل مورد استفاده در مدل‌سازی)، می‌توان از المان‌های پوسته استفاده کرد.

با توجه به مدل‌سازی کامل فولاد و بتن، مصالح بتن با المان‌های آجری هشت گر-ه‌ای شبیه‌سازی گردیدند. برای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی بتن دو حالت اصلی پلاستیسیته آسیب<sup>۱</sup> و ترک گسترش یافته<sup>۲</sup> در نرم افزار وجود دارد. روش دوم برای بررسی دقیق محل ترک خوردگی مناسب‌تر است ولیکن در تحلیل‌های ماکرو و دینامیکی قابل استفاده نیست. در مدل پلاستیسیته آسیب به دلیل عدم وجود ضوابط گسیختگی، امکان حذف المان‌ها در طول تحلیل یا ایجاد ترک وجود ندارد؛ اما توانایی پیشگویی محل و جهت تشکیل ترک‌ها را دارا می‌باشد [۱۸]. همچنین یک مطالعه همگرایی برای شناسایی چگالی شبکه مناسب برای رسیدن به نتایج قابل قبول با در نظر گرفتن زمان تحلیل انجام گردید. مدلسازی خطی دیوار بتن آرمه نیز به منظور کنترل نتایج و برآورد سختی انجام شده است. در این مدل‌ها دیوار با المان پوسته‌ای چهار گر-ه‌ای مدل‌سازی گردیده است.

**۳-۲- مدلسازی مصالح**

رفتار مصالح فولادی جهت مدل‌سازی معمولاً به دو صورت بیان می‌شود، در حالت اول رفتار مصالح به صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک و در حالت دوم این رفتار همراه با سخت شوندگی در ناحیه پلاستیک فرض می‌شود. هنگامی که کرنش در زمان رسیدن به سخت شوندگی تا حد زیادی بزرگ‌تر از کرنش شروع ناحیه پلاستیک باشد، فرض اول جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهد. لذا در این پژوهش با توجه به مشخصات فولاد مورد استفاده، منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت دو خطی و با فرض الاستیک-کاملاً پلاستیک مدل‌سازی گردید. مشخصات فولاد مورد استفاده

- 1 Concrete Damage Plasticity Model
- 2 Smeared crack

### ۳-۳- سطوح تماس

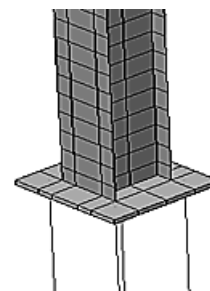
در این پژوهش فرض می‌گردد چسبندگی کامل بین پروفیل I شکل و آرماتورها با بتن محصور کننده وجود دارد و لغزش بین فولاد و بتن اتفاق نمی‌افتد.

در دیوارهای برشی با المان مرزی غیر پیوسته فرض بر این است که هنگام جدا شدگی صفحه ستون المان مرزی کششی از روی فونداسیون، بولت‌های داخل فونداسیون دچار لغزش نمی‌شوند و جدا شدگی به دلیل ازدیاد طول بولت‌ها خواهد بود. همچنین سطوح تماس بتن دیوار و فونداسیون با صفحه ستون بصورت Hard Contact در نظر گرفته شده است، بدین معنی که در کشش دو سطح می‌توانند از هم جدا شوند.

### ۳-۴- شرایط مرزی مدل‌ها

برای مدل‌سازی دیوار برشی بتن آرمه، انتهای دیوار کاملاً مقید شده است به گونه‌ای که مدفون شدن کل آرماتورهای طولی دیوار در فونداسیون در نظر گرفته شود. ضمن آن که در همه‌ی مدل‌های ساخته شده درجات آزادی در جهت عمود بر صفحه مقید شده بود.

در دیوار برشی SRC-BP، المان‌های مرزی فولادی مدفون شده در بتن از طریق صفحه ستون (به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر) و بولت به فونداسیون متصل می‌شوند (شکل ۱). لذا در المان مرزی فشاری درجات آزادی دورانی فعال می‌باشد و در المان مرزی کششی با توجه به آن که اتصال از طریق بولت‌ها انجام می‌شود امکان جداشدگی صفحه ستون وجود دارد. همچنین در قسمت خارج از المان‌های مرزی، همه‌ی درجات آزادی مقید می‌باشد. در مدل‌سازی دیوار برشی SRC-FP، درجه آزادی انتهای دیوار در همه‌ی جهات مقید می‌باشد و انتهای ستون‌های مرزی فولادی کاملاً در فونداسیون مدفون گردیده است.



شکل ۱: اتصال ستون و بولت‌ها به صفحه ستون

Fig. 1. Column base connection in case of steel boundary element

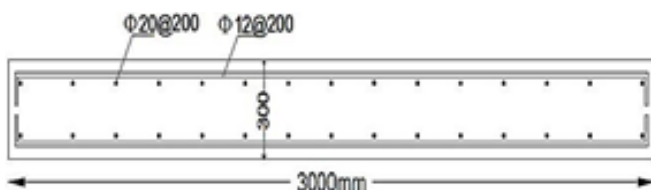
### ۳-۵- انجام تحلیل و نوع بارگذاری

در مرحله نخست بارهای ثقلی به صورت نیروی گسترده در تراز طبقات بر مدل‌ها وارد و سپس بار جانبی با توزیع یکنواخت در تراز طبقات اعمال گردید. بر اساس تغییر مکان‌های بدست آمده از نیروی اعمال شده، تغییر مکان جانبی استخراج و در تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) مورد استفاده قرار گرفت. اعمال تغییر مکان جانبی به گونه‌ای انجام گردید که

مدل‌ها حداقل کاهش مقاومت تا ۰/۸۵ مقاومت نهایی را تجربه کند. یکی از مهمترین نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی نمودار برش پایه در مقابل تغییر مکان جانبی (به طور معمول تغییر مکان بالاترین تراز) یا منحنی ظرفیت می‌باشد که اطلاعات مهمی از قبیل سختی الاستیک اولیه، زوال سختی و مقاومت نهایی ارائه می‌دهد. در این تحقیق بر اساس نمودار نیروی برشی تکیه‌گاه دیوار در مقابل تغییر مکان بالاترین تراز دیوار، سختی اولیه و مقاومت حداکثر دیوارهای یک تا چهار طبقه مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳-۶- مدل‌های مورد مطالعه

دیوارهای برشی با نسبت ارتفاع به طول بزرگتر یا مساوی ۳ دیوارهای برشی لاغر و با نسبت کوچکتر از ۳ دیوارهای برشی چاق می‌باشند. جهت آن که رفتار هر دو نوع دیوار برشی بررسی گردد دیوارهای برشی ۱ تا ۴ طبقه با ارتفاع هر طبقه برابر ۳۰۰۰ میلیمتر جهت مدل‌سازی انتخاب گردید. در مرحله اول دیوارهای برشی بتن آرمه یک تا چهار طبقه که جزئیات آن مطابق شکل ۲ می‌باشد به صورت خطی و غیرخطی تحلیل می‌شود و مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

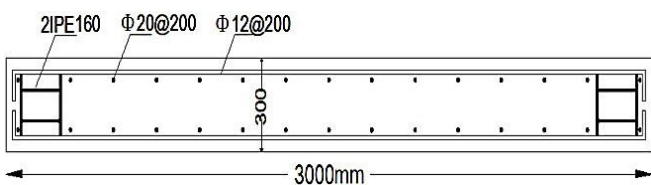


شکل ۲: آرماتورگذاری دیوار برشی بتن آرمه

Fig. 2. Reinforcement detail of concrete shear walls (unit:mm)

در مرحله دوم نتایج مقاومت دیوار بتن آرمه با دیوارهای SRC-BP (با جزئیات مطابق شکل ۳) و دیوار SRC-FP مقایسه می‌گردد تا تاثیر ستون‌های فولادی و پیوستگی المان‌های مرزی بر رفتار این دیوارها مشخص گردد.

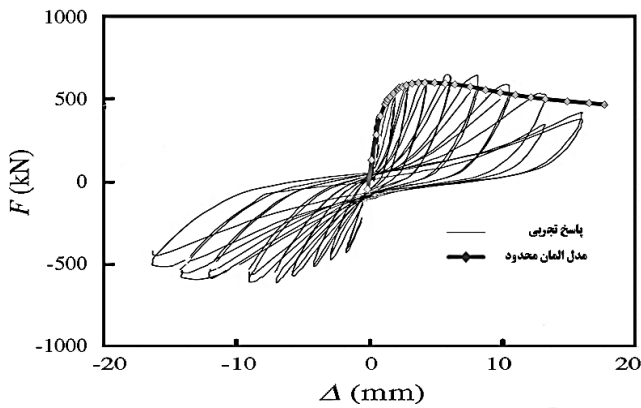
با توجه به آن که صفحه ستون‌های المان مرزی به دلیل مسائل اجرایی معمولاً کوچک می‌باشد، امکان افزایش بولت‌های صفحه ستون وجود ندارد. در عوض به صورت معمول قطر بولت‌ها را افزایش می‌دهند. لذا در دیوار SRC-BP موجود، ستون‌های مرزی فولادی مدفون در دیوار با ۴ بولت اندازه ۳۲ میلیمتر به فونداسیون متصل شده است (SRC-BP-bolt۳۲).



شکل ۳: آرماتورگذاری دیوار برشی مرکب

Fig. 3. Reinforcement detail of SRC shear walls (unit:mm)

در شکل ۶ نیروی برشی پایه در مقابل تغییر مکان افقی بالای دیوار بر حسب کیلونیوتن-میلیمتر ترسیم شده است. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی و نمودار هیسترسیس حاصل از آزمایش انجام شده توسط لیو [۲۳] نشان می‌دهد که درصد تفاوت و خطای نتایج تحلیلی تا رسیدن به مقاومت حداکثر دیوار، به میزان ۳ درصد می‌باشد. ضمن آن که بیشترین خطای نتایج تحلیل مربوط به شاخه نزولی مقاومت دیوار به میزان تقریبی ۷ درصد مشاهده گردید.



شکل ۶: مقایسه نتایج مدل المان محدود با آزمایش

Fig. 6. Comparisons between predicted and experimental results

#### ۵- انجام تحلیل و مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌ها

روش تحلیل سازه مرسوم به منظور طراحی سازه بر مبنای روش‌های خطی می‌باشد. در این تحلیل‌ها از یک ضریب کاهش سختی برای در نظر گرفتن اثرات ترک خوردگی استفاده می‌شود. در شکل ۷ مقایسه بین شاخه اول تحلیل غیرخطی استاتیکی انجام شده روی مدل اجزاء محدود کامل و تحلیل خطی انجام شده با المان‌های پوسته‌ای به همراه ضریب اصلاح سختی انجام شده است. در مدلسازی دیوار به روش خطی کل دیوار بتن آرمه با المان پوسته‌ای غشایی خمشی بتنی در نظر گرفته می‌شود. ضمن آن که در انجام تحلیل استاتیکی خطی از ضوابط ترک خوردگی آئین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده گردید [۲۶]. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل غیرخطی (پوش آور) دیوار برشی مینا، تطابق نسبی سختی اولیه بین دو تحلیل را نشان می‌دهد. به طوری که بیشترین درصد اختلاف به میزان حدود ۱۰ درصد برای دیوار چهار طبقه می‌باشد. این درصد اختلاف با توجه به افزایش تعداد طبقه، افزایش ترک خوردگی و تغییر رفتار دیوار از حالت برشی به خمشی قابل پیش بینی می‌باشد. همچنین مقایسه منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل غیرخطی برای دیوارهای بتن آرمه یک تا چهار طبقه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات از یک به چهار طبقه و تغییر رفتار دیوار از حالت برشی به خمشی مقاومت تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد در حالی که تغییر مکان نهایی تا ۴ برابر افزایش می‌یابد.

دیوار برشی SRC-FP از نظر جزئیات مشابه شکل ۳ می‌باشد با این تفاوت که ستون‌های فولادی مرزی دیوار کاملاً در فونداسیون مدفون می‌گردد.

#### ۴- اعتبارسنجی مدلسازی دیوار برشی

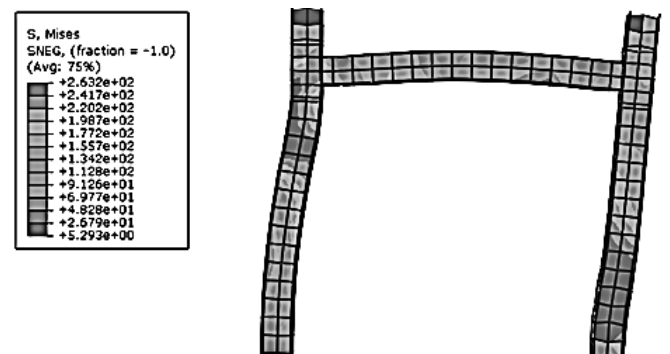
به منظور اعتبارسنجی و نشان دادن تطابق نتایج نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی، مدل المان محدود از نمونه آزمایشگاهی ایجاد می‌گردد و سپس به کمک نرم افزار تحلیل می‌شود. مدل مذکور مربوط به آزمایش نمونه دیوار برشی مرکب (SRC) می‌باشد که به وسیله لیو و همکاران در سال ۲۰۱۲ آزمایش شده است (شکل ۴) [۲۳].



شکل ۴: نمایش آسیب دیدگی مدل آزمایشگاهی [۲۳]

Fig.4. Failure mode of tested specimen

در این نمونه یک طبقه، بار محوری ثابت به دیوار وارد و در مرحله دوم، بارگذاری جانبی در تراز طبقه اعمال می‌گردد. شکل ۵ توزیع تنش قاب صلب فولادی مدفون در دیوار برشی مرکب که از تحلیل المان محدود مدل اعتبارسنجی بدست آمده را نشان می‌دهد. ایجاد پایه فشاری<sup>۱</sup> که به صورت قطری می‌باشد سبب می‌گردد قسمت بالای سمت چپ و قسمت پایین سمت راست قاب فولادی تسلیم گردد.

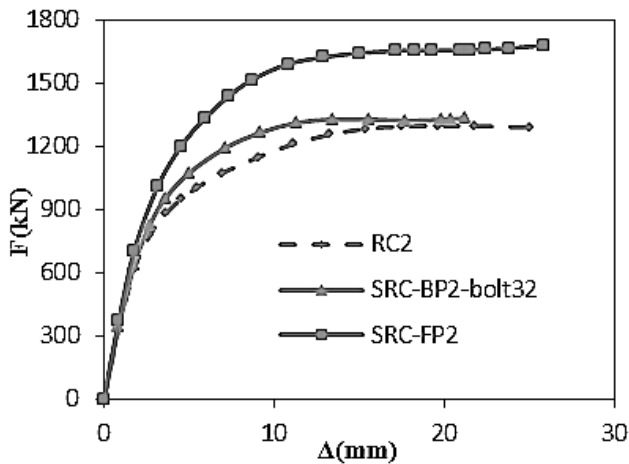


شکل ۵: توزیع تنش قاب فولادی دیوار برشی مرکب

Fig. 5. Stress distribution of I-shaped steel

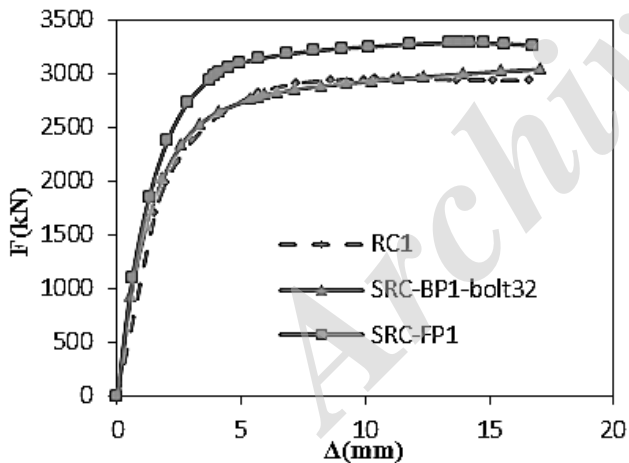
1 Compressive Strut

به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۶ برابر مقاومت دیوار بتن آرمه می‌باشد. از آنجایی که جزئیات مربوط به صفحه ستون و بولت‌ها برای دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی غیر پیوسته و نسبت ارتفاع به طول ۱ تا ۴ یکسان می‌باشد؛ نتایج بررسی مقاومت دیوارها، اهمیت مقید بودن انتهای المان‌های مرزی دیوار را نشان می‌دهد.



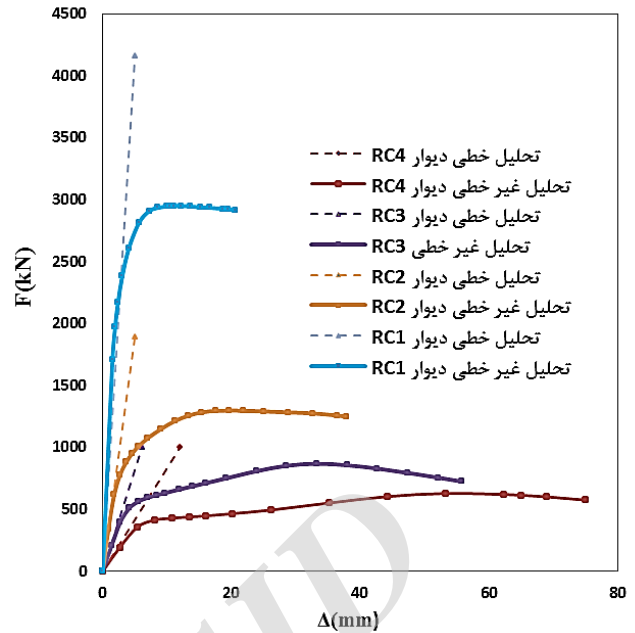
شکل ۸: مقایسه مقاومت دیوارهای برشی چهار طبقه

Fig. 8. comparison of strength of shear walls (4-story)



شکل ۹: مقایسه مقاومت دیوارهای برشی سه طبقه

Fig. 9. comparison of strength of shear walls (3-story)

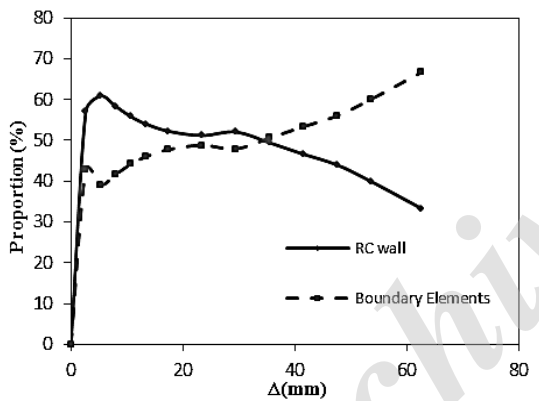


شکل ۷: مقایسه منحنی ظرفیت دیوار بتن آرمه

Fig. 7. Lateral load (F) versus lateral deflection ( $\Delta$ ) analysis curves of Reinforced concrete shear walls

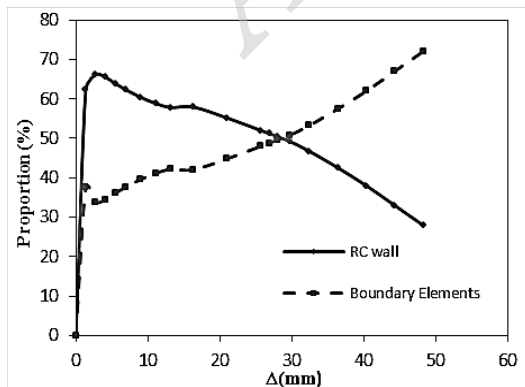
شکل‌های ۸ تا ۱۱، رفتار دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی پیوسته و غیر پیوسته را با دیوارهای برشی بتن آرمه مقایسه می‌کند. این مقایسه برای دیوارهای یک تا چهار طبقه و بر حسب کیلو نیوتن-میلیمتر انجام شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد وجود ستون‌های فولادی مرزی، سختی دیوار را افزایش می‌دهد؛ به طوری که درصد افزایش سختی دیوار با المان مرزی فولادی پیوسته نسبت به دیوار بتن آرمه برای دیوارهای یک تا چهار طبقه به ترتیب ۹٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۲۰٪ می‌باشد. افزایش سختی دیوارهای مرکب با المان مرزی ناپیوسته نسبت به دیوار بتن آرمه با افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار روند نزولی می‌یابد به طوری که برای دیوار یک و دو طبقه به ترتیب ۲۰٪ و ۳/۵٪ و برای دیوارهای ۳ و ۴ طبقه ناچیز و نزدیک به صفر می‌باشد. این روند نزولی را می‌توان با تغییر رفتار دیوار از حالت برشی به خمشی مرتبط دانست، رفتار خمشی سبب ایجاد نیروی محوری در لبه‌های دیوار، تسریع در تغییر طول و تسلیم شدن بولت‌ها می‌گردد. ضمن آن که ترک خوردگی در قسمت بیشتری از ناحیه کششی پای دیوار گسترش می‌یابد. مقایسه مقاومت دیوارهای مرکب با دیوار بتن آرمه نشان می‌دهد که پیوستگی المان‌های مرزی دیوار، مقاومت حداکثر دیوار را به میزان قابل توجهی نسبت به دیوار بتن آرمه افزایش می‌دهد به طوری که برای دیوارهای چهار، سه، دو و یک طبقه مقاومت حداکثر به ترتیب ۳۲٪، ۲۸٪، ۲۷/۵٪ و ۱۳٪ نسبت به دیوار بتن آرمه بیشتر می‌باشد. اما در حالتی که المان‌های مرزی دیوار غیر پیوسته با فونداسیون می‌باشد برای دیوارهای یک و دو طبقه مقاومت حداکثر به ترتیب ۳/۵٪ و ۳/۳٪ بیشتر از مقاومت حداکثر دیوار بتن آرمه می‌باشد در حالی که برای دیوار سه و چهار طبقه مقاومت

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، درصد سهم نیروی برشی قابل تحمل توسط المان‌های مرزی دیوار برشی مرکب با المان مرزی پیوسته (یک تا چهار طبقه)، نسبت به کل برش ایجاد شده (که بر حسب درصد بیان می‌شود) در مقابل تغییر مکان جانبی بالاترین تراز دیوار (میلیمتر) را نشان می‌دهد. در نمودارهای مذکور Boundary Elements درصد سهم برش قابل تحمل توسط المان‌های مرزی دیوار و Wall RC درصد برش قابل تحمل توسط قسمت میانی دیوار (خارج از محدوده المان مرزی) نسبت به کل برش پایه دیوار را نشان می‌دهد. همچنان که مشخص می‌باشد با افزایش ارتفاع دیوار، سهم برش قابل تحمل توسط المان‌های مرزی دیوار برشی افزایش می‌یابد. در لحظه شروع ترک خوردگی سهم برش قابل تحمل توسط المان مرزی دیوار برای دیوارهای چهار، سه، دو و یک طبقه به ترتیب ۴۳٪، ۳۸٪، ۳۲٪ و ۲۲٪ از کل برش پایه می‌باشد که با گسترش ترک خوردگی دیوار این سهم افزایش می‌یابد. لذا با افزایش ارتفاع و تعداد طبقات دیوار سهم برش قابل تحمل توسط المان‌های مرزی دیوار افزایش می‌یابد. پس از شروع ترک خوردگی بتن دیوار، سختی برشی دیوار بتن آرمه کاهش می‌یابد و با توسعه ترک‌های قطری قسمتی از بار برشی که توسط دیوار بتن آرمه تحمل می‌شد به المان‌های مرکب منتقل می‌شود.



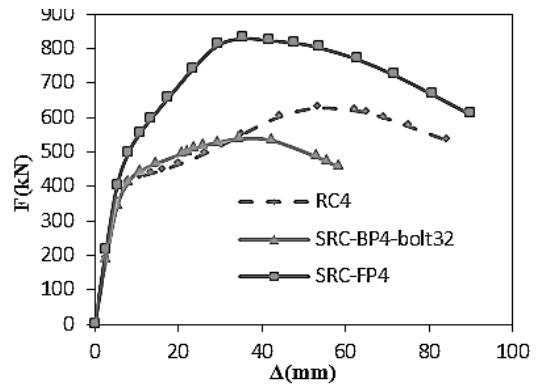
شکل ۱۲: توزیع نیروی برشی در تراز پایه دیوار (۴ طبقه)

Fig. 12. Distribution of internal force (4-story)



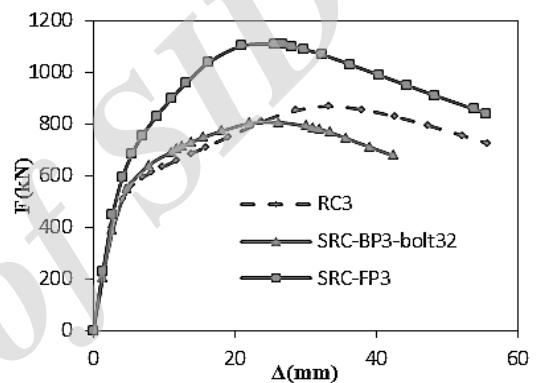
شکل ۱۳: توزیع نیروی برشی در تراز پایه دیوار (۳ طبقه)

Fig. 13. Distribution of internal force (3-story)



شکل ۱۰: مقایسه مقاومت دیوارهای برشی دو طبقه

Fig.10. comparison of strength of shear walls (2-story)



شکل ۱۱: مقایسه مقاومت دیوارهای برشی یک طبقه

Fig. 11. comparison of strength of shear walls (1-story)

میزان اختلاف مقاومت حداکثر بین دیوارهای SRC-BP و SRC-FP بسیار قابل توجه می‌باشد؛ به طوری که مقاومت حداکثر دیوار SRC-FP چهار، سه، دو و یک طبقه به ترتیب ۵۴٪، ۳۸٪، ۲۷٪ و ۱۲٪ نسبت به دیوار SRC-BP بیشتر می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات دیوار، اختلاف مقاومت بین دو دیوار مرکب بیشتر می‌شود.

در دیوار SRC-BP، ۴ بولت اندازه ۳۲ میلیمتر سطح مقطع معادل ۳۲۱۵ میلیمتر مربع دارد در حالی که دابل پروفیل I شکل اندازه ۱۶۰، سطح مقطعی معادل ۴۴۶۰ میلیمتر مربع دارد. لذا مساحت اتصال به فونداسیون حدود ۷۰٪ سطح مقطع المان مرزی فولادی می‌باشد. این که چه میزان سطح مقطع بولت می‌تواند رفتار دیوارهای مرکب با المان مرزی غیر پیوسته را به حالت ایده آل (SRC-FP) نزدیک کند نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی آتی دارد. هر چند توجه به این نکته ضروری است که به دلیل محدود بودن ابعاد صفحه ستون نمی‌توان به هر میزان سطح مقطع بولت‌ها را افزایش داد.

طبقه به ترتیب ۲/۲ و ۲/۶۷ برابر دیوار یک طبقه بود.

۳. نتایج بررسی نشان داد با میزان سطح مقطع بولت موجود و برای دیوارهای با نسبت ارتفاع به طول بزرگتر یا مساوی ۳ مقاومت دیوارهای برشی با المان مرزی غیر پیوسته با فونداسیون بیشتر از دیوار بتن آرمه نیست به طوری که برای دیوارهای سه و چهار طبقه مقاومت حداکثر به ترتیب حدود ۷٪ و ۱۳٪ کاهش یافت.

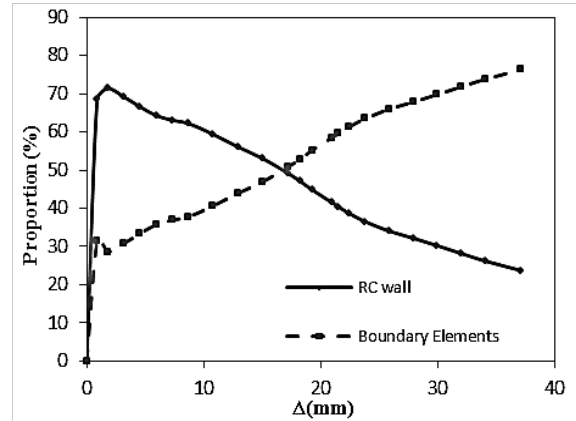
۴. مدفون کردن پای ستون‌های فولادی مرزی در فونداسیون سهم آن‌ها را در تاثیر گذاری مقاومت حداکثر دیوار افزایش داد. به طوری که مقاومت حداکثر دیوار با المان مرزی پیوسته برای دیوارهای یک تا چهار طبقه به ترتیب ۱۶٪، ۳۴٪، ۳۷٪ و ۵۴٪ بیشتر از حالتی بود که المان‌های مرزی دیوار از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل می‌گردد. لذا معادل قرار دادن رفتار این دو دیوار توسط برخی طراحان سازه نمی‌تواند در جهت اطمینان باشد مگر آن که با انجام آزمایش و وارد کردن برخی پارامترها در ضوابط طراحی بتوان مقاومت و سختی این دو نوع دیوار را به هم مرتبط ساخت.

۵. با افزایش ارتفاع و تعداد طبقات دیوار، درصد سهم برش قابل تحمل توسط المان مرزی دیوار نسبت به برش پایه کل دیوار افزایش یافت، به طوری که نسبت درصد سهم برش المان مرزی دیوار چهار طبقه تقریباً دو برابر دیوار یک طبقه بود. این افزایش تاثیر پس از ترک خوردگی دیوار و نزدیک شدن به مرحله گسیختگی، بیشتر می‌شود.

۶. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده و نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود در صورتیکه ستون فولادی بصورت ناپیوسته (از طریق صفحه‌ستون) به‌عنوان المان مرزی دیوار برشی اجرا می‌گردد، در هنگام طرح سازه در جهت اطمینان از اثر آنها در مقاومت و سختی دیوار صرف‌نظر شود. همچنین پیشنهاد می‌شود برای افزایش مقاومت و سختی دیوارها المان مرزی فولادی را در فونداسیون مدفون کرده و توسط برشگیرهای تعبیه شده در بدنه ستون مهار کافی برای آن ایجاد شود. در حالت اخیر می‌توان از اثرات مثبت المان مرزی فولادی در افزایش سختی و مقاومت در مرحله طراحی سازه نیز استفاده نمود.

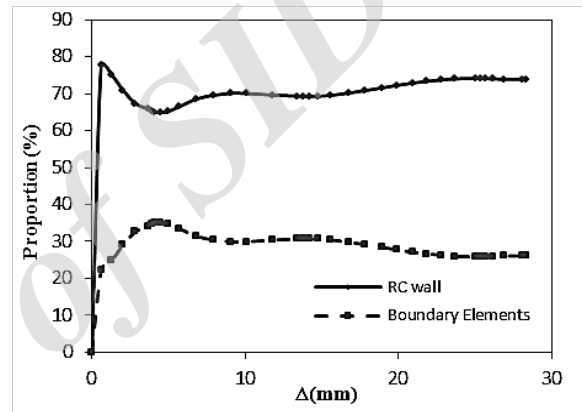
### مراجع

- [1] D. Dan, A. Fabian, V. Stoian, Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles, Journal of Constructional Steel Research, 67(5) (2011) 800-813.
- [2] A. AISC, AISC 341-10, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, (2010).
- [3] C. EuroCode, 8: Design Provisions for Earthquake



شکل ۱۴: توزیع نیروی برشی در تراز پایه دیوار (۲ طبقه)

Fig. 14. Distribution of internal force (2-story)



شکل ۱۵: توزیع نیروی برشی در تراز پایه دیوار (۱ طبقه)

Fig. 15. Distribution of internal force (1-story)

### ۶- نتیجه گیری

با توجه به نبود ضوابط مشخص برای طراحی دیوارهای برشی با المان مرزی فولادی در کشور، در این پژوهش دیوارهای برشی با المان مرزی فولادی در دو حالت با المان مرزی پیوسته و المان مرزی غیر پیوسته بصورت تحلیلی بر مبنای اعتبارسنجی آزمایشگاهی مدلسازی گردید تا تاثیر پیوستگی المان‌های مرزی بر مقاومت و سختی دیوار مشخص گردد. به طور خلاصه نتایجی که در محدوده این پژوهش و در بخش‌های مختلف این پژوهش بدست آمده است را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

۱. اعتبارسنجی مدل آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب و میزان خطای پایین تحلیل نشان داد مدل پلاستیسیته آسیب قادر به شبیه‌سازی رفتار این دیوارها تحت بار مونوتونیک می‌باشد.
۲. زمانی که ستون‌های مرزی فولادی در فونداسیون مدفون گردید سختی و مقاومت دیوار نسبت به دیوار برشی بتن آرمه افزایش یافت. این افزایش متناسب با افزایش تعداد طبقات دیوار رشد داشت به طوری که نسبت افزایش سختی و مقاومت دیوار چهار



- boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups, *Engineering Structures*, 41 (2012) 1-13.
- [15] H. Ma, H. Zhang, Y. Zhai, Experimental Study on Seismic Performance of RC Shear Wall with High-Strength Rebars, in: *International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*, 2014, pp. 505-512.
- [16] S. Altin, Y. Koprman, M. Baran, Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips, *Engineering Structures*, 49 (2013) 686-695.
- [17] P. Adebar, A.M. Ibrahim, M. Bryson, Test of high-rise core wall: effective stiffness for seismic analysis, *ACI Structural Journal*, 104(5) (2007) 549.
- [18] H. Hibbitt, B. Karlsson, P. Sorensen, Abaqus analysis user's manual version 6.10, Dassault Systèmes Simulia Corp.: Providence, RI, USA, (2011).
- [19] V. Abaqus, 6.5. 1, User Manual, 4 (2005).
- [20] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Onate, A plastic-damage model for concrete, *International Journal of solids and structures*, 25(3) (1989) 299-326.
- [21] J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of engineering mechanics*, 124(8) (1998) 892-900.
- [22] A. Committee, A.C. Institute, I.O.f. Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [23] F.-Y. Liao, L.-H. Han, Z. Tao, Performance of reinforced concrete shear walls with steel reinforced concrete boundary columns, *Engineering structures*, 44 (2012) 186-209.
- [24] M. Attard, S. Setunge, Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete, *Materials Journal*, 93(5) (1996) 432-442.
- [25] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and concrete research*, 6(6) (1976) 773-781.
- [26] I.S. Code, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard, (2005).
- Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Brussels: European Committee for Standardization, (2004).
- [4] 高层, 土结, 构技, 术规程, JGJ 3—2010, in, 北, 2010.
- [5] X. Ji, J. Qian, Z. Jiang, Seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls, in: *Steel & Composite Structures*. In: *Proceedings of the 4-th international conference*, 2010, pp. 185-190.
- [6] K.A. Hossain, H. Wright, Experimental and theoretical behaviour of composite walling under in-plane shear, *Journal of Constructional Steel Research*, 60(1) (2004) 59-83.
- [7] X. Ji, Y. Sun, J. Qian, X. Lu, Seismic behavior and modeling of steel reinforced concrete (SRC) walls, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(6) (2015) 955-972.
- [8] X. Lu, J. Yang, Seismic behavior of T-shaped steel reinforced concrete shear walls in tall buildings under cyclic loading, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(2) (2015) 141-157.
- [9] J. Qian, Z. Jiang, X. Ji, Behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading, *Engineering Structures*, 36 (2012) 173-184.
- [10] L. Han, Z. Tao, W. Wang, Advanced composite and mixed structures-testing, theory and design approach, China Science Press, (2009).
- [11] H. Xia, J. Liu, Application and structural analysis of shear wall connected with rectangular concrete-filled steel tube columns, *Building Structure*, 35(1) (2005) 16-18.
- [12] F. Esaki, M. Ono, Effect of loading rate on mechanical behavior of SRC shearwalls, *Steel and composite structures*, 1(2) (2001) 201-212.
- [13] X. Tong, J.F. Hajjar, A.E. Schultz, C.K. Shield, Cyclic behavior of steel frame structures with composite reinforced concrete infill walls and partially-restrained connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 61(4) (2005) 531-552.
- [14] D. Mostofinejad, M.M. Anaei, Effect of confining of

Please cite this article using:

E. Dehghani, S.M. Allameh Najafi, S.A. Allameh Najafi, Effects of Continuity Between Steel Boundary Element and Concrete on Behavior of Shear Wall. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 697-706.

DOI: 10.22060/ceej.2016.10903.4948

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Archive of SID