

# بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی متداول در ایران

احسان دهقانی<sup>۱\*</sup>، سید مهدی علامه نجفی<sup>۲</sup>، سید علی علامه نجفی<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم
- ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

\* Dehghani@qom.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۵/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت ۹۴/۱۱/۰۶

## چکیده

دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی فولادی به عنوان اعضای سازه‌ای شناخته می‌شوند که قادرند در مقابل نیروی جانبی درون صفحه‌ای بالا و در سطح کم تغییر مکان ایستادگی کنند. دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی که در ایران اجرا می‌شود در قسمت المان مرزی معمولاً از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل می‌شوند. بیشتر آیین‌نامه‌های معتبر دنیا در مورد رفتار این نوع از دیوارهای برشی سکوت کرده‌اند و تاکنون روی رفتار این نوع از دیوارهای برشی مطالعه آزمایشگاهی یا تحلیلی صورت نپذیرفته است. در این مقاله اثر سطح مقطع بولت‌های متصل کننده صفحه ستون به فونداسیون و مدفون شدگی آرماتورهای طولی ناحیه المان مرزی دیوار در فونداسیون و تاثیر آن بر رفتار این نوع از دیوارهای برشی مطالعه شده است. ابتدا مدلسازی نمونه‌های معیار به روش اجزاء محدود انجام شده و درستی نتایج آن با نمونه‌های آزمایشگاهی مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است. در این پژوهش از روش آنالیز اجزای محدود غیر خطی بتن آرمه و مدل آسیب دیدگی خمیری بتن برای مدلسازی رفتار بتن استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد افزایش سطح مقطع بولت و همچنین مدفون شدن آرماتورهای طولی المان مرزی در فونداسیون باعث بهبود باربری این دیوارها می‌شود. مقاومت این دیوارها تحت بارهای محوری معمول کمتر از دیوار برشی بتن آرمه است.

**واژگان کلیدی:** دیوار برشی بتن آرمه، المان مرزی فولادی، آسیب دیدگی خمیری بتن، تحلیل المان محدود.

## ۱- مقدمه

موضعی) در مدت چرخه‌های رفت و برگشتی است. در این حالت ترک و گسیختگی ناشی از خردشدگی می‌تواند جدانشدگی و تکه شدن دیوار به همراه زوال سختی و کاهش مقاومت را در پی داشته باشد. در سال‌های اخیر سیستم‌های باربر جانبی مرکب بسیار مورد توجه طراحان قرار گرفته است. این سیستم‌ها معمولاً شامل ستون‌های فولادی پر شده از بتن،

برای مقاوم کردن سازه‌ها در برابر بارهای جانبی مانند زلزله، سیستم‌های مقاوم مختلفی استفاده می‌شود. یکی از سیستم‌های متداول مقاوم در برابر زلزله، دیوارهای برشی بتن آرمه است. ضعف عمده دیوارهای برشی بتن آرمه، توسعه ترک در نواحی کششی و خرد شدگی در نواحی فشاری (به صورت

ستون‌های فولادی مدفون شده در بتن، بادبندهای مرکب و سیستم‌های متنوعی از دیوارهای برشی مرکب است. 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 کمناش نسبت به سازه‌های فولادی دارند. همچنین مقاومت اعضای مرکب در برابر آتش‌سوزی نسبت به اعضای فولادی به مراتب بیشتر و وزن و ابعاد آن‌ها از اعضای بتن آرمه کمتر است.

دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی SRC<sup>1</sup>، دیوارهای بتن مسلح با اعضای فولادی (که معمولاً در دو انتهای دیوار تعبیه شده) است. این دیوارها به عنوان اعضای سازه‌ای شناخته می‌شوند که قادرند در مقابل نیروی جانبی درون صفحه‌ای بالا و در سطوح کم تغییر مکان ایستادگی کنند. به همین دلیل برای مقاوم کردن سازه در برابر زلزله مناسب است. اصول طراحی این دیوارهای برشی مرکب بر مبنای آیین‌نامه‌های طراحی، ویژه سازه‌های مرکب فولادی-بتنی و راهنمای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله است. آیین‌نامه‌های طراحی محدودیت نسبت نیروی محوری و الزام آرماتورهای عرضی در المان‌های مرزی محصور شده را مشخص می‌کند. که در نتیجه آن خاموت‌ها ضخیم و متراکم می‌شوند، به ویژه در طبقات پایین‌تر ساختمان‌های بلند که پیچیدگی بیشتر در ساخت را سبب می‌شود [1].

دیوار برشی‌های مرکبی که هم اکنون در دنیا استفاده می‌شود، عموماً شامل دیوار برشی فولادی مرکب و دیوار برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی است. اگر چه این دیواربرشی‌ها در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا به واسطه عملکرد ترکیبی مناسب فولاد و بتن توجه شده است [2-4]، اما در آیین‌نامه‌های ایران برای این دیوارها هنوز ضوابط مشخصی وجود ندارد.

این مقاله بر آن است رفتار دیوارهای برشی مرکب با المان مرزی فولادی که از طریق صفحه ستون و بولت در ناحیه المان مرزی به فونداسیون متصل می‌شوند (و به اختصار SRC-BP نامیده می‌شوند) را با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی

مورد بررسی قرار دهد.

با توجه به آن که در یکی از روش‌های طراحی مرسوم در ایران از اثر ستون‌های مرزی فولادی چشم‌پوشی می‌شود، دیوارهای بتن آرمه که در ناحیه المان مرزی با صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل می‌شوند با دیوار برشی بتن آرمه<sup>2</sup> بدون المان مرزی فولادی (که دیوار استاندارد نامیده خواهد شد) مقایسه می‌شود تا تاثیر ستون‌های مرزی در این دیوارها ارزیابی شود.

با مشاهده دیوارهای برشی مرکب SRC-BP مشخص می‌شود که در بیشتر موارد به دلیل کوچک بودن صفحه ستون‌های مرزی، آرماتورهای دیوار در ناحیه المان مرزی قطع می‌شود و در داخل فونداسیون مدفون نمی‌شود. پس تاثیر مدفون شدن آرماتورهای طولی در ناحیه المان مرزی بررسی می‌شود.

## ۲- مروری بر پژوهش‌ها

انواع مختلف سیستم‌های دیوار برشی مرکب برای بهبود شکل‌پذیری دیوارهای برشی متداول مطالعه شد. در سال‌های اخیر این پژوهش‌ها توسط پژوهشگران مختلفی انجام گرفته است [5-6]. در پژوهشی که توسط دان و همکارانش در دانشگاه تیمیسورا انجام شد، رفتار پنج نوع مختلف دیوار برشی بتنی با پروفیل فولادی به همراه یک دیوار برشی بتنی متداول به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شد [1]. در پژوهشی که توسط کیان و همکارانش در دانشگاه تیسینگوا انجام شد، یک دیوار برشی نوین (دیوار برشی بتن آرمه با تیوب‌های فولادی مدفون شده) پیشنهاد شد و تاثیر المان مرزی بر رفتار دیوار برشی آزمایش شد. متغیرهای این آزمایش‌ها شامل نسبت مساحت تیوب فولادی، نسبت نیروی محوری و شکل سطح مقطع دیوار است [7]. یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر جانبی که در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان سازه قرار گرفته، استفاده ترکیبی از ستون‌های پر شده با بتن<sup>3</sup> (CFST) و دیوارهای برشی بتن آرمه است. در ترکیب این ستون‌ها با بتن و دیوار برشی

2 Reinforced Concrete shear wall

3 Concrete-Filled Steel Tubular

1 RC walls with SRC boundary columns

لرزه‌ای متمرکز شده بود. مطالعاتی توسط آدبار<sup>۲</sup> و همکاران برای توسعه یک مدل خمشی غیر خطی که می‌تواند در تعیین سختی خمشی موثر دیوارهای برشی بتنی بلند مرتبه قابل استفاده باشد، انجام شد [15].

با مرور تحقیقات انجام شده روی دیوارهای برشی می‌توان نتیجه گرفت که با وجود آن‌که تعدادی مطالعه در مورد دیوارهای برشی بتن آرمه با انواع المان‌های مرزی انجام شده است، اما پژوهش‌ها در مورد عملکرد دیوارهای برشی بتن آرمه با ستون‌های مرزی تحت بار محوری ثابت و بارگذاری جانبی هنوز کافی نیست. پژوهش ارائه شده توسط لیو و همکارانش در مورد عملکرد دیوار برشی مرکب بتن آرمه با ستون مرزی است. دیوار مورد آزمایش شامل قاب خمشی فولادی با پای گیردار است که کاملاً در بتن دیوار مدفون شده است [16].

### ۳- مدل سازی و معرفی مدل‌ها

دیوارهای برشی بتن آرمه با المان مرزی فولادی که به طور عمده در ایران اجرا می‌شود در قسمت المان مرزی از طریق صفحه ستون و بولت به فونداسیون متصل شده است. از طرفی این صفحه ستون‌ها در قسمتی قرار دارند که امکان ایجاد بیشترین نیروی کششی در مقایسه با پانل دیوار برشی در آن وجود دارد. همچنین توصیه می‌شود برای بتن‌ریزی بهتر دیوار، تیر تراز طبقه اجرا نشود که این امر در برخی پروژه‌ها عملی شده است. با توجه به عدم دسترسی به نتایج آزمایشگاهی معتبر در زمینه دیوارهای برشی اشاره شده، بر مبنای درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب متداول در دنیا (که ستون‌های مرزی فولادی کاملاً در ستون مدفون است)، با استفاده از روش المان محدود، رفتار این نوع دیوار برشی ارزیابی می‌شود.

نرم‌افزارهای تحلیلی که هم اکنون در ایران استفاده می‌شود، عبارتند از: ABAQUS، ANSYS، SAP، ETABS. دو نرم افزار اخیر به دلیل زمان‌بر بودن عملیات تحلیل در آن‌ها و مشکلات عملیات مدل‌سازی استفاده آن‌ها به کارهای پژوهشی و موارد

بتن آرمه، 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 [8]. در سال‌های اخیر چندین ساختمان بلند مرتبه با این سیستم ساخته شده است، ضمن آن که پژوهش‌های گوناگونی در این زمینه انجام شده است [9]. در پژوهش انجام شده توسط ایساک، 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 بررسی شده است [10]. پژوهش ارائه شده توسط تانگ و همکارانش شامل مطالعه تجربی رفتار چرخه‌ای سیستم سازه‌ای مرکب متشکل از قاب فولادی نیمه صلب با پر کننده بتن مسلح است. در این آزمایش بر هم کنش مرکب با استفاده از برشگیرهای گل میخ در طول فصل مشترک قاب فولادی و پر کننده بتن مسلح ایجاد شده است. به طوری که هر دو جزء اصلی سیستم در برابر برش جانبی و لنگر واژگونی مقاومت می‌کنند [11].

در پژوهش انجام شده توسط مستوفی نژاد تاثیر محصور شدن المان‌های مرزی دیوارهای برشی لاغر با کامپوزیت‌های FRP<sup>۱</sup> بر دیوار با در نظر گرفتن تغییر شکل پذیری، تحت بارگذاری یکنواخت بررسی شده است [12]. بر مبنای پژوهش‌های پیشین [13]، 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 بررسی شد [13]. در مطالعه تجربی انجام شده توسط آلتین و همکاران [14]، 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 آن‌که پژوهش روی اثر نوارهای فولادی بر ارتقاء مقاومت جانبی و افزایش شکل پذیری دیوارهای برشی بتن آرمه با جزئیات غیر

استفاده شده در پروفیل I شکل و آرماتورها مطابق جدول (۱) است. همچنین مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۰Gpa فرض شده است.

جدول ۱: مشخصات فولاد استفاده شده در مدل‌ها

Type	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$
I-shaped steel	240	0.0012	0.11
Steel bar and bolt	400	0.002	0.18

Table 1. Material properties of steel.

در مدل المان محدود حاضر، مدل آسیب دیدگی خمیری<sup>۱</sup> که در آباکوس وجود دارد برای مدل‌سازی بتن استفاده شده است [17]. در این مدل فرض می‌شود تابع جریان پتانسیل غیر وابسته است. همچنین سطح تسلیم پیشنهادی توسط لوبلینر [18] و فنوس [19] را برای ارزیابی مختلف مقاومت بتن تحت فشار و کشش می‌پذیرد. توصیف رفتار پلاستیک بر مبنای رفتار تنش-کرنش معادل بتن است. مدول الاستیسیته بتن ( $E_c$ )  $\sqrt{f'_c}$  ۴۷۳۰ مطابق با ACI318 است [20]. که در این رابطه  $f'_c$  مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن (برحسب نیوتن بر میلی‌متر مربع) است. 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 پذیرفته شده بود، پیشنهاد شد. این مدل تنش-کرنش به صورت رابطه زیر است:

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

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 است.  $\epsilon_{c0}$ ،  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و پارامترهایی هستند که توسط اتارد و ستانگ پیشنهاد می‌شود [21].

به دلیل افت قابل توجه مقاومت کششی پس از ترک خوردگی، رسیدن به همگرایی برای بتن‌های معمولی در تحلیل المان محدود مشکل است. به همین دلیل یک مدل انرژی

خاص محدود شده است. در حال حاضر به صورت معمول از نرم‌افزارهای SAP و ETABS برای دیوارهای برشی بتنی با المان مرزی فولادی استفاده می‌شود. با توجه به قابلیت‌های این دو نرم‌افزار، طراحی‌های متداول این نوع از دیوارهای برشی مرکب در ایران معمولاً به دو روش انجام می‌شود؛ در روش اول، آرماتورهای طولی موجود در مقطع دیوار برشی توسط روش آرماتورگذاری یکنواخت در برنامه تعریف می‌شود و برنامه مقطع دیوار را کنترل می‌نماید. همچنین از اثر ستون‌های فولادی چشم‌پوشی شده و آرماتورهای دیوار قوی‌تر می‌شود، در نتیجه طراحی به این روش غیر اقتصادی می‌شود. در روش دوم اثر ستون‌های فولادی در نظر گرفته می‌شود. اما همچنان ابهام در طراحی به این روش وجود دارد؛ زمانی که ستون فولادی به صورت مقطع مختلط داخل دیوار برشی در نظر گرفته می‌شود، در مقطع پای دیوار برشی ستون به صورت کامل در بتن فونداسیون مهار نشده حال آن‌که در طراحی از ظرفیت کامل آن استفاده شده است.

با توجه به آنچه اشاره شد و نبود ضوابط آیین‌نامه‌ای مشخص برای دیوارهای SRC-BP، بررسی رفتار این نوع از دیوارهای برشی مرکب ضروری به نظر می‌رسد.

### ۳-۱- نوع المان‌های المان محدود

برای تحلیل غیرخطی استاتیکی نرم افزار آباکوس استفاده شد. فولاد I شکل و بتن به ترتیب با استفاده از المان پوسته‌ای چهار گره‌ای و المان آجری هشت گره‌ای شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی آرماتورها با استفاده از المان خرپایی دو گره‌ای با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره انجام شد. همچنین یک مطالعه همگرایی برای شناسایی چگالی مش مناسب برای رسیدن به نتایج قابل قبول با در نظر گرفتن زمان تحلیل انجام شد. مدل‌سازی خطی نیز با نرم‌افزار SAP به منظور کنترل نتایج و برآورد سختی انجام شده است. در این مدل‌ها دیوار با المان پوسته‌ای چهار گره‌ای مدل‌سازی شده است.

### ۳-۲- مدل سازی مصالح

منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت دو خطی و با فرض الاستیک - کاملاً پلاستیک مدل سازی شد. مشخصات فولاد

در مدل سازی 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.

### ۳-۴- 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 الگوی یکنواخت به سازه اعمال شد. بر اساس تغییر مکان‌های بدست آمده از نیروی اعمال شده، تغییر مکان جانبی استخراج و در تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) استفاده شد. اعمال تغییر مکان جانبی به گونه‌ای انجام شد که مدل‌ها کمترین 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 است که اطلاعات مهمی از قبیل سختی الاستیک اولیه، زوال سختی و مقاومت نهایی ارائه می‌دهد.

### ۳-۵- مدل‌های مطالعه شده

دیوارهای برشی با نسبت ارتفاع به طول بزرگتر یا مساوی ۳ دیوارهای برشی لاغر و با نسبت کوچکتر از ۳ دیوارهای برشی چاق است. برای آن که رفتار هر دو نوع دیوار برشی بررسی شود دیوارهای برشی ۱ تا ۴ طبقه با ارتفاع هر طبقه برابر ۳ متر برای مدل سازی انتخاب شد.

در مرحله اول دیوارهای برشی بتن آرمه بدون المان مرزی فولادی (استاندارد) یک تا چهار طبقه بتن آرمه که جزئیات آن مطابق (شکل ۲-الف) است به صورت خطی و غیر خطی تحلیل و مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در مرحله دوم نتایج مقاومت دیوارهای SRC-BP (با جزئیات مطابق (شکل ۲-ب) که با ۴ بولت به فونداسیون متصل شده است با دیوار استاندارد مقایسه شده تا تاثیر ستون-های مرزی در این دیوارها ارزیابی شود.

یکی از موارد مبهم در این نوع از دیوارهای برشی مرکب امکان جداشدگی صفحه ستون ناحیه المان مرزی کششی از

شکست<sup>۱</sup> پیشنهادی توسط هیلبرگ استفاده شد تا رفتار نرم شدگی کششی بتن شبیه سازی شود. در این مدل فرض شده انرژی شکست برای بتن با مقاومت ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۱۲ (کیلو نیوتن بر میلی‌متر) است [22].

### ۳-۳- سطوح تماس

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

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

در این پژوهش دیوار برشی بتن آرمه (استاندارد) با دیوار برشی SRC-BP مقایسه خواهند شد. در مدل سازی دیوار برشی مرکب، المان‌های مرزی فولادی مدفون شده در بتن از طریق صفحه ستون (به ابعاد ۳۰\*۳۰ سانتی‌متر) و بولت به فونداسیون متصل می‌شوند (شکل ۱). پس در المان مرزی فشاری درجات آزادی دورانی فعال است و در المان مرزی کششی با توجه به آنکه اتصال از طریق بولت‌ها انجام می‌شود امکان جداشدگی صفحه ستون وجود دارد. همچنین در قسمت خارج از المان-های مرزی همه‌ی درجات آزادی مقید است.

شکل ۱. اتصال ستون و بولت‌ها به صفحه ستون

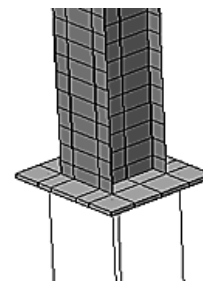


Fig. 1. Column base connection in case of steel boundary element

## 1 Fracture energy

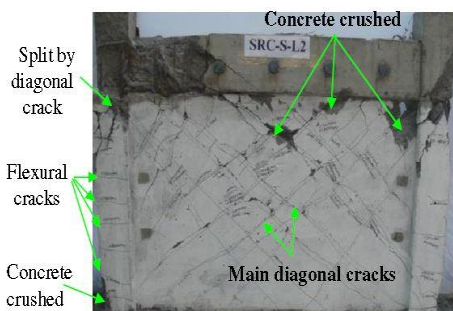
در برخی موارد مشاهده شده است به دلیل مسائل اجرایی در دیوارهای برشی SRC-BP آرماتورهای دیوار در ناحیه المان مرزی قطع می‌شود و در داخل فونداسیون مدفون نمی‌شود. پس در مرحله چهارم پژوهش تاثیر مدفون شدن آرماتورها در ناحیه المان مرزی دیوار بررسی می‌شود.

#### ۴- اعتبار سنجی مدل سازی

به منظور اعتبار سنجی و نشان دادن هماهنگی نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی، مدل المان محدود از نمونه آزمایشگاهی ایجاد می‌شود و سپس به کمک نرم افزار تحلیل می‌شود. مدل مذکور مربوط به آزمایش نمونه دیوار برشی مرکب (SRC) است که به وسیله لیو و همکاران در سال ۲۰۱۲ آزمایش شده است [16]. شکل (۴-الف) گسیختگی دیوار برشی مرکب آزمایش شده توسط لیو [16] و (شکل ۴-ب) نتایج مدل تحلیلی اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود گسیختگی به واسطه ترک‌های قطری در ناحیه فوقانی نمونه و ترک‌های خمشی در ناحیه کششی پای دیوار اتفاق می‌افتد.

در این نمونه یک طبقه، بار محوری ثابت به دیوار وارد و در مرحله دوم، بارگذاری جانبی در تراز طبقه اعمال می‌شود. شکل (۵) توزیع تنش قاب صلب فولادی مدفون در دیوار برشی مرکب که از تحلیل المان محدود مدل اعتبار سنجی بدست آمده را نشان می‌دهد. ایجاد پایه فشاری که به صورت قطری است سبب می‌شود قسمت بالای سمت چپ و قسمت پایین سمت راست قاب فولادی تسلیم شود.

شکل ۴. نمایش چگونگی گسیختگی نمونه دیوار برشی



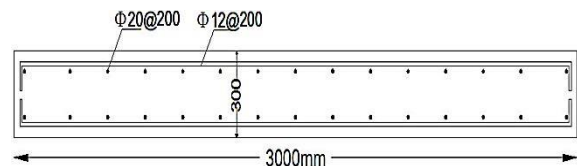
(a) Observed [16]

روی فونداسیون می‌باشد (شکل ۳). با توجه به آن که نیروی کششی در این ناحیه نیروی قابل توجهی است پس پیش‌بینی می‌شود ظرفیت این نوع از دیوارهای برشی RC کمتر باشد.

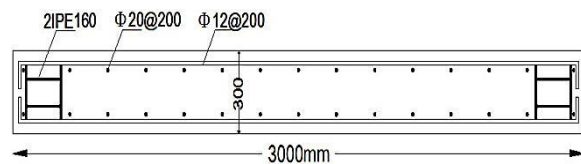
با توجه به آن که صفحه ستون‌های المان مرزی به دلیل مسائل اجرایی معمولاً کوچک است، امکان افزایش بولت‌های صفحه ستون وجود ندارد. در عوض یکی از راهکارهایی که معمولاً پیشنهاد می‌شود افزایش قطر بولت‌ها است. با توجه به آن چه اشاره شد در مرحله سوم این مطالعه تاثیر قطر بولت‌ها بر مقاومت و سختی دیوار برشی SRC-BP بررسی می‌شود. پس این مقایسه با استفاده از بولت‌های با قطر ۲۰، ۲۵ و ۳۲ میلی‌متر انجام می‌شود.

شکل ۲. جزئیات آرماتورگذاری نمونه های دیوار

الف) دیوار برشی بتن آرمه (ب) دیوار برشی مرکب



(a) RCW



(b) SRCW

Fig. 2. Reinforcement details of wall specimens (unit: mm)

شکل ۳. جدا شدگی صفحه ستون از روی فونداسیون

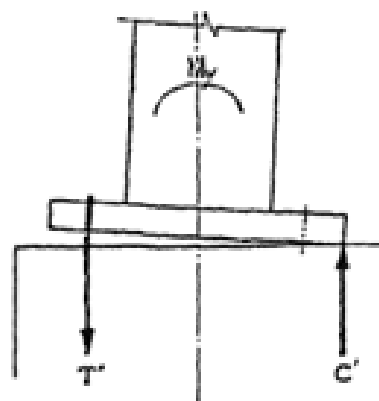
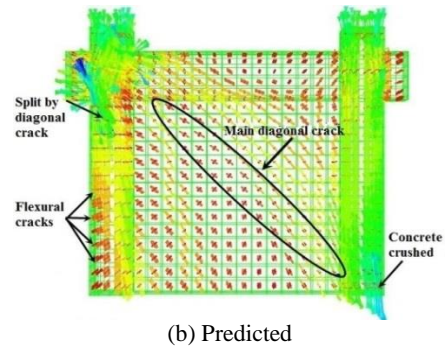


Fig. 3. The behavior of base plate



زمانی که دیوار به حدود ۷۰ درصد مقاومت نهایی خود می‌رسد آرماتورهای دیوار در ناحیه قطری به صورت تدریجی دچار تسلیم شدگی می‌شوند. پس از این مرحله بارهای جانبی که عمدتاً به وسیله بتن تحمل می‌شدند به آرماتورهای دیوار منتقل می‌شود که در نتیجه آن تنش آرماتورها افزایش می‌یابد و بردارهای کرنش پلاستیک اصلی کششی به میزان بیشتری گسترش می‌یابد؛ ضمن آنکه ترک‌هایی در ناحیه کششی پای دیوار پدیدار می‌شود (شکل ۷).



(b) Predicted  
Fig. 4. Failure mode of tested specimen

در شکل (۶) نیروی برشی پایه برحسب تغییر مکان افقی بالای دیوار ترسیم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی مدل تا نقطه مقاومت ماکزیمم دیوار تقریباً بر پوش نمودار هیسترسیس حاصل از آزمایش منطبق است؛ ضمن آنکه بیشترین خطای تحلیل غیر خطی در ناحیه افت مقاومت دیوار و به میزان ۷ درصد مشاهده شد.

شکل ۷. بردارهای کرنش پلاستیک اصلی کششی بتن

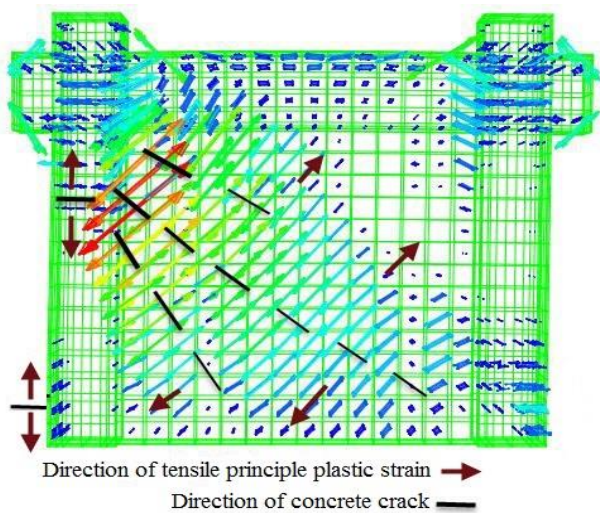


Fig. 7. Tensile principal plastic strain vectors of concrete

شکل ۵. توزیع تنش قاب فولادی دیوار برشی مرکب

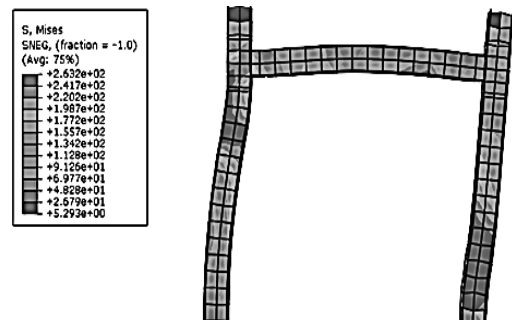


Fig. 5. Stress distribution of I-shaped steel

شکل ۶. مقایسه نتایج مدل المان محدود با آزمایش

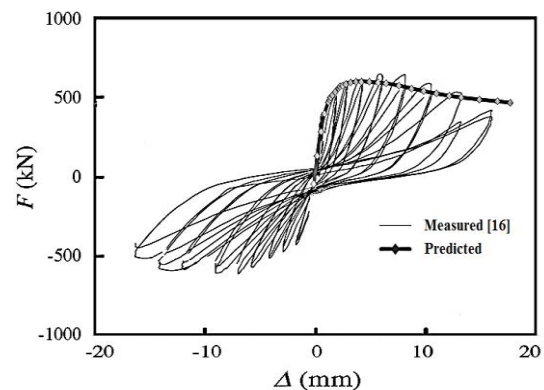


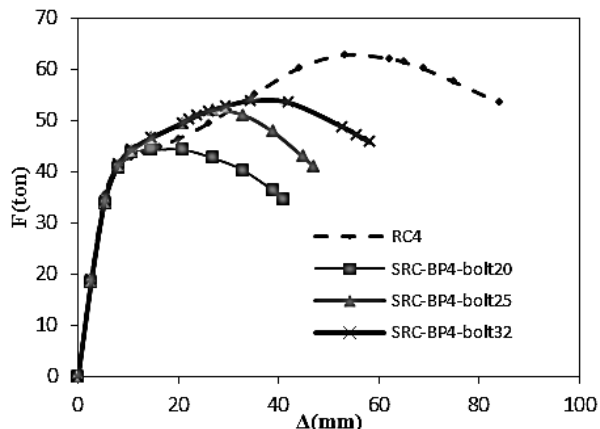
Fig. 6. Comparisons between predicted and experimental results

## ۵- انجام تحلیل و مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌ها

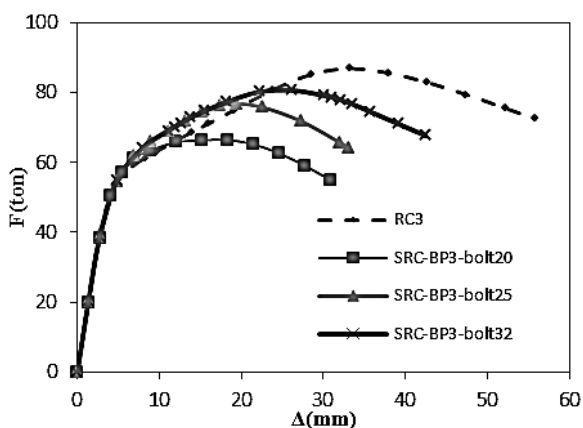
در شکل (۸) مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای بتن آرمه بدون المان مرزی فولادی (استاندارد) برای دیوارهای یک تا چهار طبقه نشان داده شده است. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل غیر خطی (پوش‌آور) دیوار برشی استاندارد، هماهنگی مناسب سختی اولیه حاصل از دو نوع تحلیل را نشان می‌دهد. ضمن آن که در انجام تحلیل استاتیکی خطی از ضوابط ترک خوردگی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده شده است [23].

اتفاق می‌افتد. که همین امر می‌تواند روی مقاومت دیوار تاثیرگذار باشد.

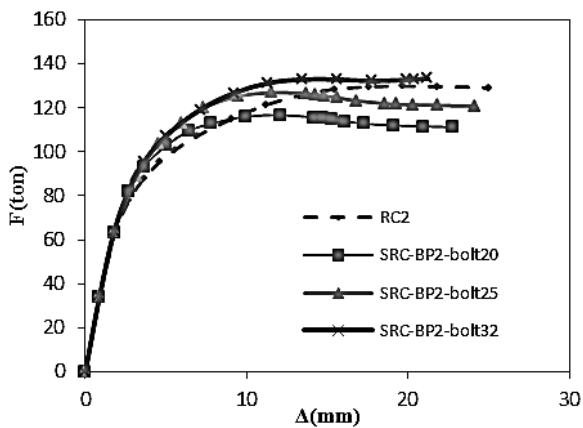
شکل ۹. اثر افزایش سطح مقطع بولت در دیوار الف) دیواره ۴ طبقه ب) دیوار سه طبقه ج) دیوار دو طبقه د) دیوار یک طبقه



(a) 4-story walls



(b) 3-story walls



(c) 2-story walls

شکل ۸. مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای استاندارد

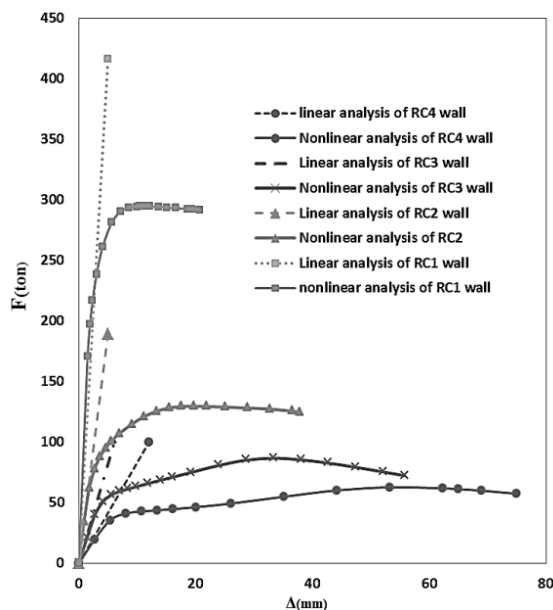


Fig. 8. Lateral load (F) versus lateral deflection ( $\Delta$ ) analysis curves of Reinforced concrete shear walls

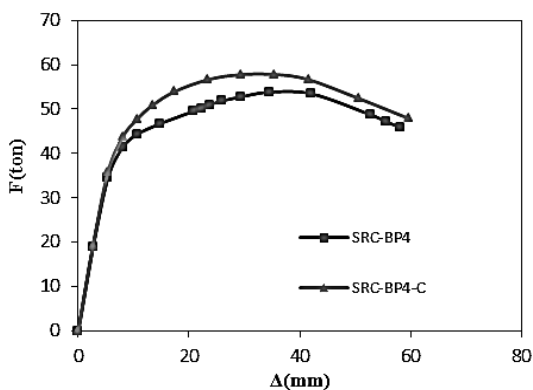
مشاهده می‌شود سختی بدست آمده از تحلیل خطی بر مبنای ضرایب ترک خوردگی، تطابق خوبی با سختی اولیه بدست آمده از تحلیل غیر خطی دارد. با افزایش تعداد طبقات از یک به چهار طبقه و تغییر رفتار دیوار از حالت برشی به خمشی مقاومت تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد در حالی که تغییر مکان نهایی تا ۴ برابر افزایش می‌یابد.

شکل (۹)، تاثیر سطح مقطع بولت‌ها در دیوارهای برشی مرکب (SRC-BP) و مقایسه با دیوار بتن آرمه (استاندارد) برای دیوارهای یک تا چهار طبقه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش سطح مقطع بولت‌ها مقاومت ماکزیمم و مقاومت نهایی دیوار افزایش می‌یابد به دلیل آن که بولت‌های المان مرزی کششی جاری می‌شوند دچار ازدیاد طول می‌شود و صفحه ستون از روی فونداسیون جدا می‌شود. این جدا شدگی صفحه، تشکیل مفصل پلاستیک را دچار اختلال می‌کند و سبب می‌شود بیشینه ظرفیت ستون المان مرزی کششی استفاده نشود. پس با افزایش تعداد طبقات مقاومت این دیوارها در مقایسه با دیوار استاندارد به میزان چشمگیری کمتر است. توجه به این نکته ضروری است که در مدلسازی فرض شده بولت‌ها در داخل فونداسیون دچار لغزش نمی‌شوند. در صورت وجود لغزش جدا شدگی صفحه از روی فونداسیون با سرعت بالاتری

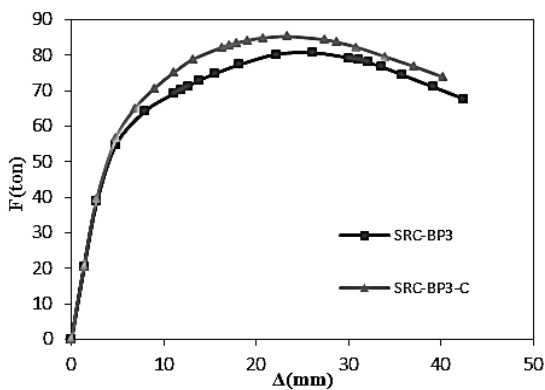


شکل (۱۱) مقایسه دو حالت مدفون شدن آرماتورهای طولی المان مرزی دیوار در فونداسیون (SRC-BP-C) و حالتی که آرماتورهای طولی المان مرزی به دلیل مسائل اجرایی منقطع شده و در فونداسیون مدفون نمی‌شود (SRC-BP) را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود مدفون شدن آرماتورهای دیوار در ناحیه المان مرزی مقاومت دیوار را افزایش می‌دهد. این آرماتورها دوران صفحه ستون المان مرزی کششی را کاهش می‌دهد. با کاهش دوران، جدا شدگی صفحه ستون از روی فونداسیون کاهش می‌یابد. در نتیجه مقاومت دیوار افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت با افزایش تعداد طبقات دیوار افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که برای دیوارهای یک، دو، سه و چهار طبقه افزایش مقاومت نسبت به حالتی که این آرماتورها در داخل فونداسیون مدفون نشود به ترتیب ۱،۵، ۲، ۶ و ۸٪ است.

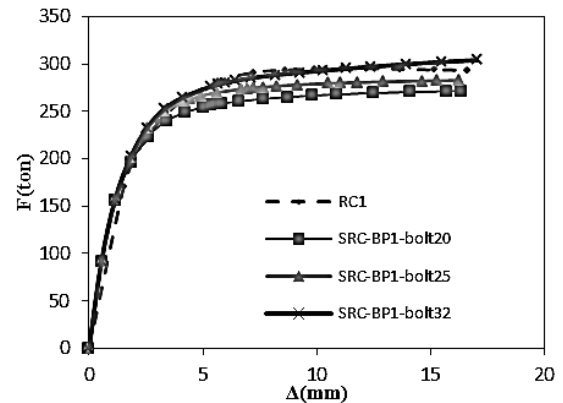
شکل ۱۱. اثر مدفون شدن آرماتورهای طولی المان مرزی



(a) 4-story walls



(b) 3-story walls



(d) 1-story walls

Fig. 9. Effect of increasing cross sectional area of the bolt a) 4 story wall b) 3 story wall c) 2 story wall d) 1 story wall

با افزایش تعداد طبقات دیوار برشی به دلیل تغییر رفتار دیوار از برشی به خمشی تفاوت مقاومت دیوار مرکب با دیوار استاندارد به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. اما در دیوارهای ۱ و ۲ طبقه اختلاف مقاومت دیوار مرکب و دیوار استاندارد ناچیز است. شکل (۱۰) توزیع تنش در ستون‌های فولادی دیوار مرکب چهار طبقه را نشان می‌دهد. با افزایش سطح مقطع بولت مقاومت دیوار افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش سایز بولت از ۲۰ به ۳۲ برای دیوارهای چهار، سه، طبقه و یک طبقه، مقاومت ماکزیمم دیوار به ترتیب ۲۱، ۱۸، ۱۲ و ۱۰٪ افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰. توزیع تنش در ستون‌های مرزی دیوار

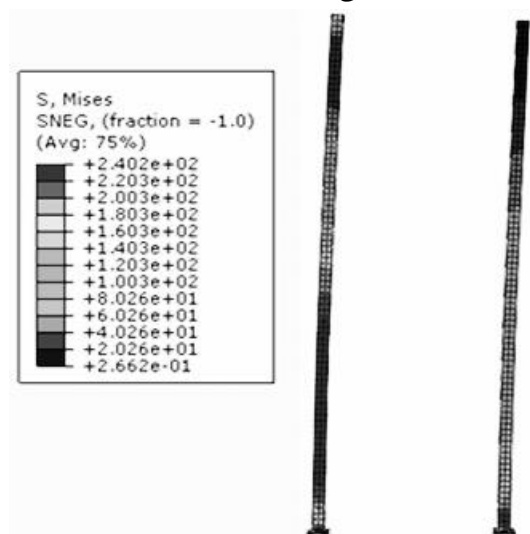


Fig. 10. Stress distribution of steel boundary element

۳- پارامتر افزایش سطح مقطع بولت، مقاومت دیوار را افزایش می‌دهد اما این پارامتر به تنهایی نمی‌تواند مقاومت دیوار را تا رسیدن به مقاومت دیوار استاندارد افزایش دهد.

۴- مدفون شدن آرماتورهای طولی ناحیه المان مرزی دیوار و یا میلگردهای اضافی دوخت در فونداسیون دوران صفحه ستون را کاهش می‌دهد که در نتیجه آن مقاومت ماکزیمم و نهایی دیوار افزایش می‌یابد.

## References

## ۷- مراجع

[1] Dan, D., Fabian, A., and Stoian, V.; "Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles"; *Constructional Steel Research*; 2011; pp. 800-813.

[2] AISC.341-10; "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings"; Chicago: American Institute of Steel Construction; 2010.

[3] CEN. Final Draft of EuroCode 8; "Design Provisions for Earthquake Resistance part 1 :General Rules"; Seismic Actions and Rules for buildings; Brussels: European Committee Standardization; 2003.

[4] JGJ. Technical specification for concrete structures of tall building (JGJ 3-2010); Beijing: China Ministry of Construction; 2011 (in Chinese).

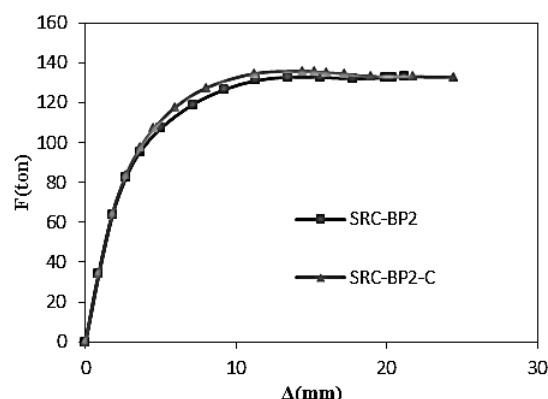
[5] Ji, X., Qian, J., and Jiang, Z. "Seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite wall"; *Steel & Composite Structures*. In: Proceedings of the 4-th international conference; 2010; pp. 185-90.

[6] Hossain, A.K.M., and Wright, H.D. "Experimental and theoretical behavior of composite walling under in-plane shear"; *J Construct Steel Res*; 2004; pp. 59-83.

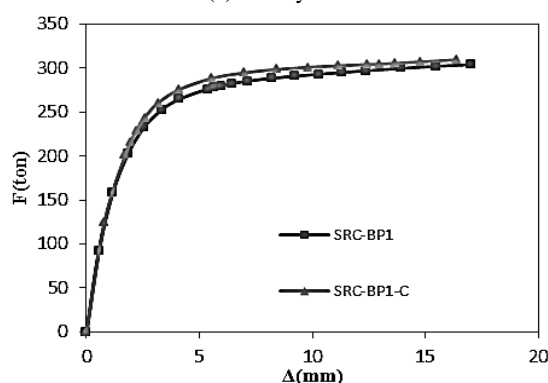
[7] Qian, J., Jiang, Z., and Ji, X. "Behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading"; *Engineering Structures*; 2012; pp. 173-184.

[8] Han, L.H., Tao, Z., and Wang, W.D. "Advanced composite and mixed structures-testing, theory and design approach"; Beijing: China Science Press; 2009.

[9] Xia, H.Q., and Liu, J.X. "Application and structural analysis of shear wall connected with rectangular concrete-filled steel tube columns." *Building Structure*; 2005; pp. 8-16 [in Chinese].



(c) 2-story walls



(d) 1-story walls

Fig. 11. The embedding effect of longitudinal reinforcements of boundary elements

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به صورت تحلیلی دیوارهای برشی یک تا چهار طبقه با و بدون المان مرزی فولادی بر مبنای اعتبارسنجی آزمایشگاهی مدل‌سازی شد و تاثیر افزایش سطح مقطع بولت‌های متصل کننده صفحه ستون به فونداسیون و مدفون شدن آرماتورهای طولی ناحیه المان مرزی دیوار در فونداسیون مطالعه شده است. بطور خلاصه نتایجی که در بخش‌های مختلف این پژوهش بدست آمده است را می‌توان بصورت زیر ارائه کرد:

- ۱- مدل آسیب دیدگی خمیری بتن قادر به شبیه سازی رفتار دیوار برشی مرکب تحت بار مونوتونیک با دقت بالایی است.
- ۲- با توجه به منقطع بودن دیوار مرکب در نواحی المان مرزی و تحت ترکیبات معمول بار محوری، در نظر نگرفتن اثر ستون-های مرزی منطقی به نظر می‌رسد. همچنین با افزایش تعداد طبقات دیوار مقاومت این دیوارها کمتر از دیوار بتن آرمه (RC) است.

- [17] Hibbitt, Karlson, and Sorensen. "ABAQUS/standard user's manual, version 6.5"; USA: Hibbitt, Karlson & Sorensen Inc.; Providence; RI; 2005.
- [18] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E. "A plastic-damage model for concrete"; *Int J Solids Struct*; 1989; pp. 299–326.
- [19] Lee, J., and Fenves, G.L. "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures"; *J Eng Mec*; ASCE; Vol. 124; No.8; 1998; pp. 892–900.
- [20] ACI.318-08; "Building code Requirements for Structural Concrete and Commentary"; American Concrete Institute; 2008.
- [21] Attard, M.M., and Setunge, S. "Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete"; *ACI Mater J*; Vol. 93; No.5; 1996; pp. 432–42.
- [22] Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E. "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements"; *Cem Concr Res*; Vol. 6; No.6; 1976; pp. 773-82.
- [23] BHRC – PN S- 253 [2014] "Iranian code of practice for seismic resistant design of building," Iranian building codes and standards, 4th edition, (in Persian).
- [10] Esaki, F., and Ono, M. "Effect of loading rate on mechanical behavior of SRC shearwalls"; *Steel Compos struct*; Vol. 1; No.2; 2001; pp. 201-212.
- [11] Tong, X., Hajjar, J.F., Schultz, AE., and Shield, CK. "Cyclic behavior of steel frame structures with composite reinforced concrete infill walls and partially-restrained connections"; *Journal of Constructional Steel Research*; Vol. 61; NO.4; 2005; pp. 531-552.
- [12] Mostofinejad, D., and Anaei, M. "Effect of confining of boundary of elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups"; *Engineering Structures*; Vol. 41; No.8; 2012; pp. 1-13.
- [13] Ma, H., Zhang, H.M., and Zhai, Y.Q. " Experimental Study on Seismic Performance of RC Shear Wall with High-Strength Rebars"; *American Society of Civil Engineers*; 2013; pp. 505-512.
- [14] Altin, S., and Koprman, Y. "Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips"; *Engineering Structures*; Vol. 49; 2013; pp. 686-695.
- [15] Adebar, P., Ibrahim, A.M.M., and Bryson, M. "Test of High-Rise Core Wall: Effective Stiffness for Seismic Analysis"; *ACI STRUCTURAL JOURNAL*; Vol. 104; No.5; 2007; pp. 549-559.
- [16] Liao, Fei-Yu, Lin Hai Han, and Zhong Tao. "Performance of reinforced concrete shear walls with steel reinforced concrete boundary columns." *Engineering Structures*, 2012: 186-209.

# Assessment of RC Shear Walls with Steel Boundary Element

E. Dehghani<sup>1\*</sup>, S.Mehdi. Allameh Najafi<sup>2</sup>, S.Ali. Allameh Najafi<sup>3</sup>

1- Assist. Prof., Civil Eng, Qom University

2- M.Sc. Structural Engineering, Qom University

3- M.Sc., Structural Engineering, Qom University

\*Dehghani@qom.ac.ir

## Abstract:

Composite construction – using steel and concrete - offers significant advantages in preparing the primary lateral resistance systems in building structures subjected to seismic loading. Composite construction of composite beam and joist floor systems have been commonly adopted for over half a century. However, in the past decade a substantial amount of research has been conducted worldwide on a wide range of composite lateral resistance systems. These systems include unbraced moment frames consisting of steel girders with concrete-filled steel tube (CFT) or steel reinforced concrete (i.e., encased steel sections, or SRC) beam-columns; braced frames having concrete-filled steel tube columns; and a variety of composite and hybrid wall systems.

Structural walls are widely used as the major structural members to provide required lateral strength, stiffness, and the inelastic deformation capacity of building structures to withstand earthquake ground motions. In recent years, steel reinforced concrete (SRC) walls have widely used in high-rise buildings located in regions of high seismicity. SRC walls include additional structural steel embedded in the boundary elements of the reinforced concrete (RC) walls. The walls contain one or more encased steel shapes, usually located at the ends of the wall.

Composite shear walls with steel boundary elements are known as the structural members able to withstand high in-plane lateral forces at low displacement levels. Steel boundary elements of SRC shear walls are joined to the foundation usually through bolts and base plates. Behavior of this type of shear walls was not clearly discussed in most of reliable standards and no experimental studies or analyses have been conducted on the behavior of this type of shear walls. In the past decade, great efforts have been devoted to study the seismic behavior of SRC walls and Design provisions for such walls were included in some major design codes and specifications, for example, AISC 341-10, Eurocode 8, and JGJ 3-2010.

Exposed baseplates together with anchor bolts are the customary method of connection of steel structures to the concrete footings. In this paper, the behavior of this type of shear walls has been investigated under the effects of changing the amount of base plate's connection bolts and wall's longitudinal bars embedded within the area of boundary element in the foundation. The finite element software is first calibrated and the accuracy of its results is validated through modeling the experimental samples. Nonlinear finite element analysis of concrete is performed by the use of damage plasticity model. Results show that an increase in the number of connection bolts and also the embedded longitudinal bars of boundary element in the foundation may improve the capacity of such walls. However, the resistance of the walls against normal axial loads is considered to be less than that of reinforced concrete shear wall.

**Keywords:** Reinforced concrete shear wall, Steel boundary element, Concrete damage plasticity model, Finite element model.