

## بررسی اثر محصورشدگی اجزاء مرزی تو سط FRP در رفتار دیوار برشی بتن آرمه لاغر

مریم محمدی انایی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان

داود مستوفی نژاد\*

دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

دیوارهای برشی بتن آرمه رایج ترین سیستم مقاومت در برابر بارهای جانبی در سازه‌های بلندمرتبه هستند. در سال‌های اخیر متدلوژی‌های طرح لرزه‌ای توجه بیشتری بر محدود کردن دررفت سازه در زلزله دارد. سختی درون صفحه‌ی بسیار زیاد این المان‌ها و نقش آن‌ها در باز توزیع نیروها از ستون‌ها به دیوار باعث کنترل دررفت بسیار عالی در سازه می‌گردد. آنالیزهای غیر خطی ابزار قدرتمندی در پیش‌بینی رفتار دیوار برشی بتن آرمه ارائه می‌دهند. این مطالعات باعث تغییرات اساسی در آیین‌نامه‌ها و روش‌های طراحی المان‌های بتن آرمه شد. گذشت زمان، آسیب‌های سازه‌ای و ضعف آیین‌نامه‌های قدیم باعث کارایی نامناسب دیوارهای سازه‌ای موجود در برابر زلزله شده است. از طرفی در سال‌های اخیر مواد کامپوزیت FRP در تقویت و بهسازی المان‌های سازه‌ای کاربردهای بسیاری یافته‌اند. خصوصیات ممتاز این مواد آن‌ها را گزینه اول پروژه‌های تقویت قرار داده است. با این وجود مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد تا کنون بر روی تقویت دیوار برشی بتن آرمه‌ی لاغر با مواد FRP مطالعه‌ی آزمایشگاهی یا تحلیلی صورت نگرفته است.

در این مقاله اثر تقویت FRP و محصورشدگی اجزاء مرزی دیوار توسط این مواد بر رفتار دیوار برشی بتن آرمه‌ی لاغر طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های آبا و ACI مورد مطالعه قرار گرفته است. نرم افزار اجزاء محدود ابتدا کالیبره شده و صحت نتایج آن با مدل سازی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفته است. در این تحقیق از روش آنالیز اجزاء محدود غیر خطی بتن آرمه و مدل رفتاری پلاستیسیته‌ی آسیب (Damage Plasticity) به همراه اثر سخت شدگی کششی برای مدل سازی رفتار بتن استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ورق FRP در اجزای مرزی تأثیر زیادی بر رفتار شکل‌پذیر دیوار دارد.

**واژه‌های کلیدی:** دیوار برشی بتن آرمه، آنالیز اجزاء محدود، مدل پلاستیسیته آسیب، سخت شدگی کششی، تقویت FRP

\* نویسنده مسئول: dmstofi@cc.iut.ac.ir

## ۱. مقدمه

تقویت این قسمت در رفتار دیوار تحت بارهای سیکلیک مونوتونیک بوده است؛ و نتایج به صورت پوش منحنی‌های هیستریزس ارائه گردیده است.

## ۲. بررسی مطالعات انجام شده روی دیوارهای لاغر

در سال ۱۹۹۸ تسنیمی<sup>۱</sup> آزمایشی را بر روی دیوار برشی با مقیاس ۱/۸ و نسبت دهانه‌ی برشی ۳ انجام داد. نتایج نشان می‌دهد که برای همه نمونه‌ها مفصل پلاستیک در تار انتهایی مقطع و در نزدیک پایه‌ی دیوار تشکیل شده است. مقاومت و تغییر شکل نمونه‌ها مستقل از توالی سیکل‌های بارگذاری بود [۵]. در سال ۲۰۰۶ سو و همکاران<sup>۲</sup> آزمایشاتی را ترتیب دادند تا اثر نسبت بار محوری اعمال شده به ظرفیت بار محوری (ALR)<sup>۳</sup> را روی عملکرد دیوارهای بتن آرمه مطالعه کنند. نتایج نشان می‌دهد که ALR تأثیر چشمگیری روی قابلیت تغییر شکل و مود شکست نمونه دارد. در نسبت‌های بالای ALR مود شکست فشاری خارج از صفحه‌ی ناگهانی مشاهده گردید. هم‌چنین افزایش در ALR اثر مخرب روی زوال مقاومت و اتلاف انرژی دیوارها داشت [۶]. در سال ۲۰۰۴ والیس و همکاران<sup>۴</sup> آزمایشاتی را بر روی ۴ دیوار برشی لاغر با مقیاس ۱/۴ انجام دادند. هدف از انجام این آزمایشات تأیید فرضیات روش طراحی بر مبنای تغییر مکان آیین‌نامه‌ی ACI بود [۷]. در سال ۲۰۰۷ پری و همکاران<sup>۵</sup> آزمایشی روی قسمتی از دیوار هسته یک ساختمان بلند مرتبه انجام دادند.

این دیوار نسبت ارتفاع به طول ۷/۲ دارد در حالی که بار محوری معادل  $0.1f'_c A_g$  بر مقطع بال‌دار این دیوار وارد می‌شود. هدف از انجام این آزمایش بررسی اثر ترک خوردگی روی سختی دیوار بوده و از نتایج این آزمایش در کالیبره کردن مدل پیشنهادی استفاده گردیده است [۸].

## ۳. پارامترهای مؤثر در رفتار دیوار

رفتار کلی دیوار به طور قابل توجهی از نسبت ارتفاع به طول آن

دیوارهای برشی اعضای اصلی مقاومت در برابر بار جانبی در سازه‌های بتن آرمه محسوب می‌شوند. این دیوارها نه تنها باید مقاومت کافی را در سازه ایجاد نمایند، بلکه باید شکل‌پذیری کافی به منظور اجتناب از شکست ترد به خصوص تحت بارهای قوی لرزه‌ای را فراهم آورند [۱]. با وجود این بسیاری از دیوارهای برشی بتن آرمه در کشور ما و سایر نقاط دنیا به دلایل متعدد اعم از تغییر ملزومات آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، ضعف در طراحی یا اجرا، گذشت زمان و تأثیر عوامل مخرب محیطی، اجرای وصله‌ی میلگردها در محل مفصل پلاستیک، و در مواردی هم اثر خرابی‌ها و ضعف‌های ناشی از زلزله‌های قبلی یا بارهای انفجاری، نیاز به بهسازی و تقویت دارند. در سال‌های اخیر ایف FRP به صورت گسترده و موفقیت‌آمیزی در بهبود لرزه‌ای سازه‌ها استفاده گردیده است [۲]. مقاومت عالی این مواد در برابر خوردگی در کنار نسبت مقاومت به وزن بسیار بالا در آن‌ها باعث شده تا تقویت سازه با این مواد بر خلاف روش‌های سنتی (استفاده از شاتکریت یا فروسمنت و...) وزن اضافه‌ای به سازه‌ی موجود اعمال نمی‌کند، و نیز خواص دینامیکی سازه‌ی موجود را تغییر نمی‌دهد [۳]. تحقیقات روی اعضای بتن آرمه تقویت شده با پوشش خارجی FRP بر روی ستون‌ها و شمع‌ها بیش‌تر مورد توجه قرار داشته است. در حالی که روی تأثیر FRP بر ظرفیت تغییر شکل تحت بار افقی کمتر کار شده است. در این خصوص دیوارهای بتن آرمه نمونه‌ای از اعضایی هستند که از منظر بهسازی لرزه‌ای کم‌تر مورد توجه بوده‌اند [۴]. از طرفی بررسی ادبیات فنی در مورد تقویت دیوارهای برشی بتن آرمه نشان می‌دهد که تا کنون مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی تقویت دیوار برشی بتن آرمه لاغر بلند مرتبه صورت نگرفته، و بیشتر تحقیقات در این زمینه محدود به دیوارهای بتنی کوتاه و چاق بوده است. این مقاله بر آن است تا رفتار دیوارهای بتن آرمه‌ی لاغر را با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود مورد بررسی قرار داده و سپس به کمک دانشی که از آزمایش تیرها و ستون‌های تقویت شده در دست دارد، به مطالعه‌ی تقویت دیوارهای لاغر بلند مرتبه تحت ترکیب بار جانبی و بار محوری بپردازد. در این تحقیق تمرکز اصلی بر نقش اجزای مرزی دیوار و

<sup>1</sup> Tasnimi

<sup>2</sup> Su et. al.

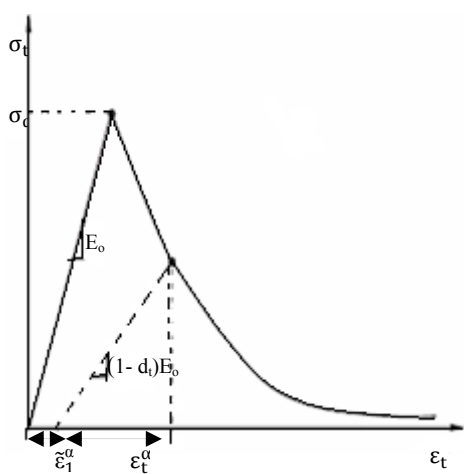
<sup>3</sup> Axial Load Ratio

<sup>4</sup> Wallace et. al.

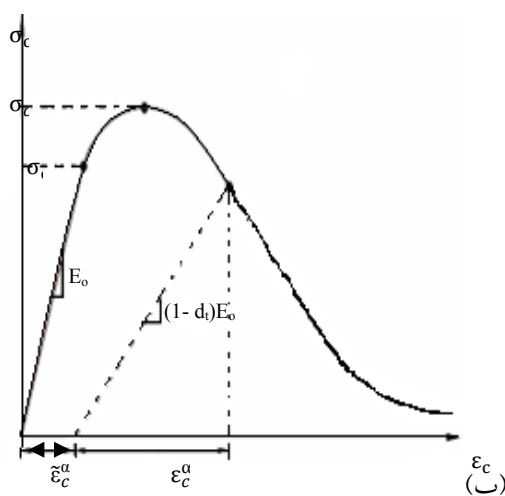
<sup>5</sup> Perry et. al.

محصور کننده‌ی پایین (مثلاً ۴ یا ۵ برابر مقاومت نهایی فشاری تک محوره) اتفاق می‌افتد را بگیرد. شکل ۱- متغیر آسیب را در نمودار تنش کرنش تک محوره‌ی بتن نشان می‌دهد. در این شکل،  $d$  متغیر زوال سختی اسکالر است که مقدار آن در محدوده‌ی صفر (ماده‌ی آسیب ندیده) تا یک (ماده‌ی کاملاً آسیب دیده) متغیر است. آسیب به همراه مکانیزم شکست بتن منجر به کاهش سختی الاستیک می‌شود. در مفهوم تئوری پلاستیسیته‌ی آسیب بتن، اسکالر زوال سختی، ایزوتروپیک است. همان‌گونه که در شکل زیر نشان داده شده است نمونه‌ی بتنی از هر نقطه روی شاخه‌ی کرنش نرمی منحنی تنش کرنش باربرداری شود

تأثیر می‌پذیرد. دیوار برشی‌های با نسبت ارتفاع به طول کمتر از ۳ یا ۲ چاق هستند و دیوار برشی‌های با نسبت ارتفاع به طول بالاتر دیوار بلند یا خمشی هستند. یک دیوار برشی لاغر مانند تیر عمل می‌کند و از تئوری تیرها پیروی می‌کند. برای دیوار با نسبت ارتفاع به طول کم‌تر از ۱ تئوری تیر عملی نیست، زیرا عمق تیر هم مؤثر می‌شود و رفتار برشی و خمشی دیوار درگیر هستند و مقاومت خمشی و برشی این دیوارها از تیرهای عمیق پیروی می‌کند. [۲]. ظرفیت خمشی و نرمی انحنا دیوار، مرتبط با مقدار و توزیع فولادهای عمودی در دیوار است. تمرکز تقویت خمشی در انتهای دیوار در دیوارهای بال‌دار منجر به افزایش ظرفیت



(الف)



(ب)

شکل ۱- پاسخ تک محوره بتن - (الف) در کشش - (ب) در فشار

پاسخ بار برداری مشاهده می‌شود که ضعیف شده است و به نظر می‌رسد که سختی الاستیک ماده زوال یافته است [۱۰].

#### ۵. معرفی پارامترهای مورد نیاز برای تعریف ماده‌ی بتن در نرم افزار ABAQUS

یکی از پارامترهای مهم در همگرایی زاویه‌ی اتساع است؛ که زاویه‌ی بین تنش انحرافی مایسز و فشار هیدرواستاتیک در تنش محصورشدگی بالا می‌باشد برای نمونه‌های تحت خمش با مقدار ۳۶ درجه نتایج بهتری حاصل می‌شود. اما مقدار این زاویه در رفتار نمونه‌های تحت فشار و محصور شده از اهمیت زیادی برخوردار است. در تحقیق حاضر برای نمونه‌ی فشاری مدل شده مقدار این پارامتر برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است.

خمشی و نرمی انحنا دیوار می‌شود البته مادامی که از مودهای شکست برشی ممانعت شود [۹]. نیروهای برشی افقی تحمل شده توسط دیوار برشی طره‌ای نوعاً در بالای آن و به دال یا تیر بالا سری اعمال می‌شود. تیر بالا سری نیروهای اعمال شده به دیوار را به طور یکنواخت در تمام عرض دیوار توزیع می‌کند این امکان توسعه ترک کششی قطری را به حد اقل می‌رساند [۲].

#### ۴. مدل پلاستیسیته‌ی مورد استفاده آباکوس

مدل پلاستیسیته‌ی مورد استفاده آباکوس در این تحقیق مدل پلاستیسیته‌ی آسیب می‌باشد. تنها تفاوت یک مدل آسیب پلاستیک و یک مدل پلاستیسیته در نظر گرفتن آسیب است. تئوری پلاستیسیته‌ی آسیب بتن سعی دارد اثر آسیب بر-گشت‌ناپذیر به همراه مکانیزم‌های شکستی که در بتن در فشارهای

## ۵-۱. معرفی اثر سخت شدگی کششی

عضو خرپایی مدل می‌شوند معرفی منحنی تنش کرنش ترک محوره آن بر حسب کرنش غیر الاستیک کافی است. در آباکوس مدل‌سازی رفتار بتن و فولاد مستقل از هم انجام شده و سپس بر هم نهی می‌شوند. و اثرات درگیر بین بتن و فولاد از قبیل لغزش مهاری و عمل به صورت تقریبی و به وسیله سخت‌شدگی کششی بتن (که قبلاً ذکر آن رفت) معرفی می‌شوند.

کاربر باید ناحیه بعد از ترک خوردگی را که معرف اثرات سخت‌شدگی کششی نیز هست را بر حسب کرنش ترک خوردگی معرفی کند. اثر سخت شدگی کششی بیانگر این مهم است که سختی ماده بعد از ترک خوردن ناگهان صفر نمی‌شود. بلکه در اثر درگیری دانه‌ها و عمل فولادها ماده قابلیت انتقال بار را از طریق فضای بین ترک‌ها دارا می‌باشد. محققان گوناگون مدل‌های مختلفی برای رابطه تنش کرنش کششی بتن بعد از ترک خوردن ارائه داده‌اند. در مدل‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه از رابطه توصیه شده توسط دستورالعمل نرم افزار استفاده شده است. این مدل رابطه‌ی بعد از ترک خوردگی بتن را خطی فرض می‌کند که تا کرنش کششی نهایی ۱۰ برابر کرنش ترک خوردگی ادامه دارد. لازم به ذکر می‌باشد هر چه کرنش نهایی کششی بیشتر باشد در واقع به منزله‌ی آن است که از ظرفیت بتن بعد از ترک خوردگی بیش‌تر استفاده می‌شود.

## ۶. دیوار پری و همکاران

این دیوار قبلاً معرفی گردید [۸] و در جداول ۱ و ۲ و شکل ۲ زیر مشخصات مواد و مقطع طولی و عرضی دیوار نمایش داده شده است. و در اشکال ۳ و ۴ الگوی ترک خوردگی دیوار تحت بار برگشتی ملاحظه می‌گردد.

در شکل ۵ نمودار بار تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی با هم مقایسه گردیده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد نتایج مدل‌سازی از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشد.

## ۵-۲. فولادها

در نمونه‌های مدل‌سازی شده در بخش‌های بعدی فولادها به صورتی مدل شده‌اند که اعضای یک بعدی دارای جانمایی دقیق هستند. برای معرفی قیود بین بتن و فولاد از قید استفاده شده که درجات آزادی المان‌های فولادی را به درجات آزادی المان‌های بتن اطراف آن مقید می‌کند. برای جلوگیری از ناپایداری‌های عددی برای رفتار کاملاً پلاستیک یک مقدار مثبت کوچک به عنوان شیب منحنی تنش کرنش در ناحیه پلاستیک تخصیص می‌یابد [۱۱].

## ۵-۳. مش‌بندی و المان مورد استفاده

در ادبیات فنی مطلبی در مورد تقویت دیوارهای بلند مرتبه لاغر با مواد کامپوزیت FRP دیده نمی‌شود. به همین دلیل ابتدا سعی می‌شود ستون مستطیلی تحت بار جانبی و بار محوری را که با FRP تقویت شده در آباکوس مدل کنیم تا از توانایی شبیه‌سازی محصورشدگی توسط آباکوس اطمینان حاصل کنیم. بدیهی است انتخاب ستون با مقطع مستطیل و تحت بار جانبی به جهت تقریب به مسئله اصلی یعنی محصورشدگی اجزاء مرزی دیوار است. در یک ستون مستطیلی فشار محصورشدگی بیش‌تر در بین گوشه‌ها متمرکز می‌شود. و سطح مؤثر محصورشدگی به طرز چشمگیری کم‌تر از هسته بتن محصور شده است؛ که به نسبت طول به عرض ستون، آرایش خاموت‌ها و شعاع گوشه بستگی دارد [۱۲]. گرد کردن گوشه‌های تیز در ستون‌های مستطیلی از تمرکز تنش در گوشه‌ها و شکست احتمالی زودرس FRP جلوگیری می‌کند [۱۲]. ACI 440 پیشنهاد می‌کند که در صورت استفاده از زور پیچ FRP حداقل شعاع گوشه ۱۳ میلیمتر باشد [۱۳].

نرم افزار ABAQUS المان خاصی برای بتن ندارد و از المان هشت نقطه‌ای 3DSTRESS معمولی استفاده می‌گردد. انتگرال گیری عددی این المان به روش گوس انجام می‌پذیرد. اعمال بار به صورت کنترل تغییر شکل، و روش حل عددی مورد استفاده، برای تیر روش طول قوس ریکس<sup>۱</sup> است. از آنجا که معیار پلاستیسیته فولاد معیار فون میسز است و فولادها به صورت

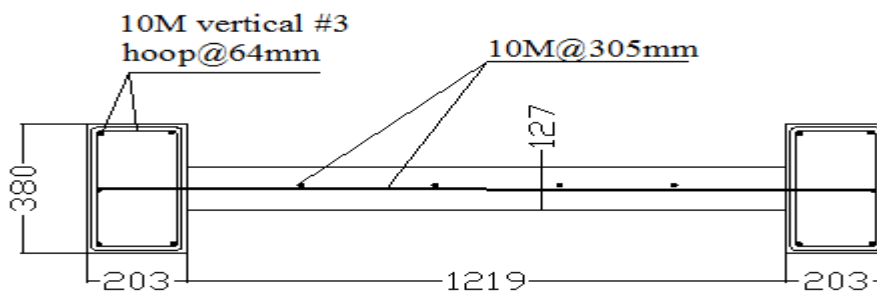
<sup>۱</sup>Riks

جدول ۱. خواص ماده بتن [۸]

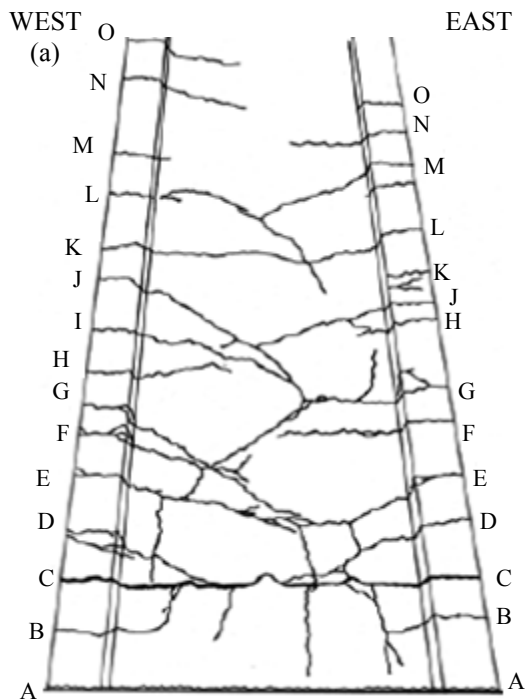
	مقاومت نمونه استوانه ای (مگاپاسکال) در زمان ساخت نمونه	کرنش بتن در تنش فشاری حداکثر
دیوار پری	۴۹	۰/۰۰۲۲

جدول ۲. خواص ماده فولاد [۸]

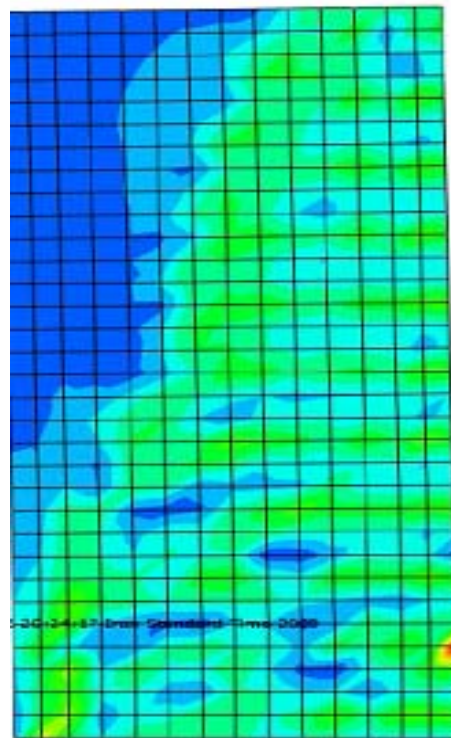
تقویت	مقاومت تسلیم فولاد (مگا پاسکال)	مقاومت کششی نهایی فولاد (مگا پاسکال)
تقویت طولی	۴۵۵	۶۵۰



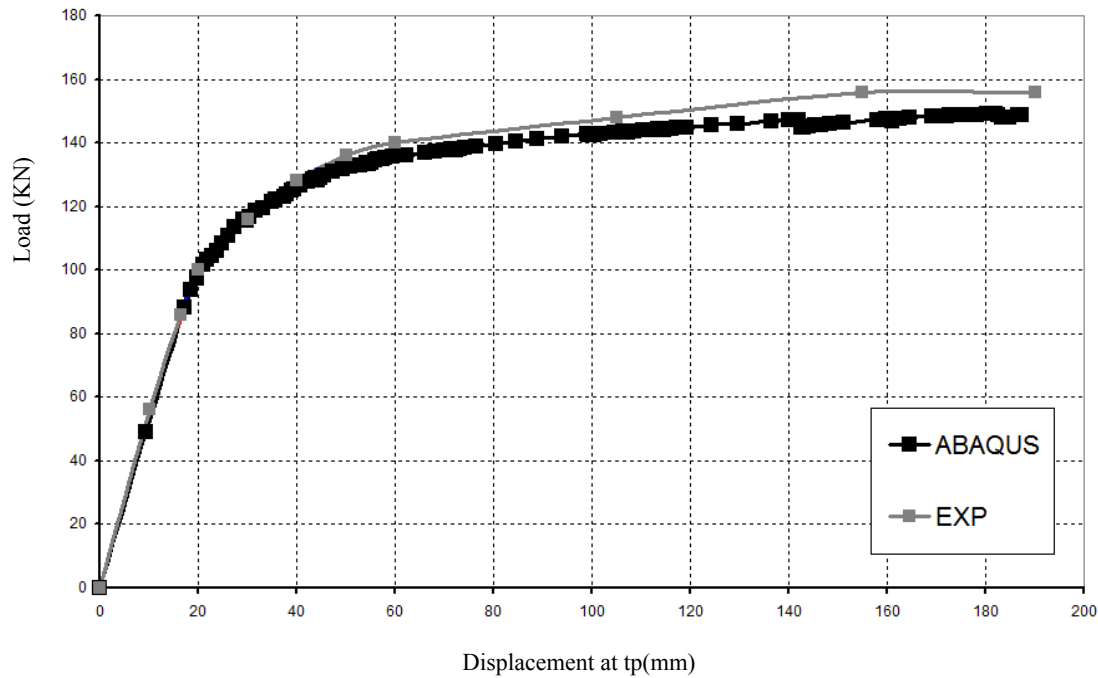
شکل ۲- مقطع دیوار پری [۸]



شکل ۴- الگوی ترک در پایین دیوار-آزمایشگاه [۸]



شکل ۳- الگوی ترک در پایین دیوار-اباکوس



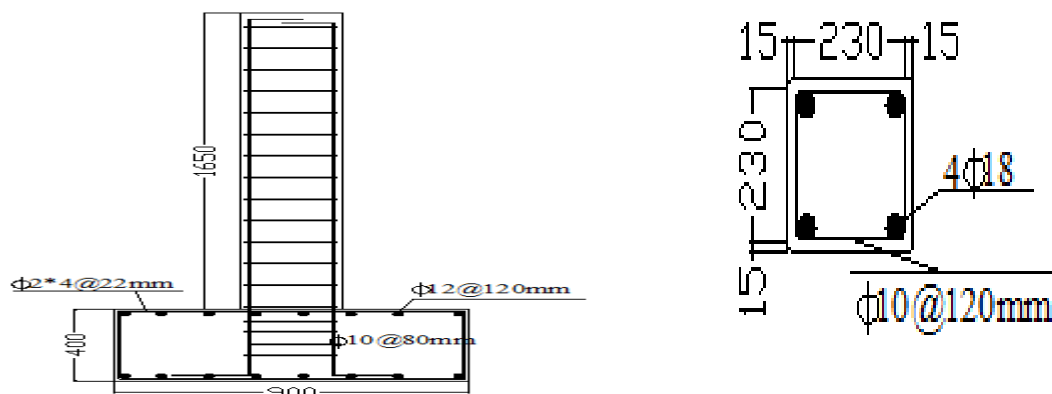
شکل ۵- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دیوار پری

است. نمودار بار جانبی در مقابل جابه‌جایی جانبی بالای ستون در نمونه‌ی CI4 در نمودار شکل ۷ با نتایج آزمایش مقایسه شده است. این نمودارها سازگاری بسیار خوبی را بین نتیجه به‌دست آمده از نرم افزار و نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد.

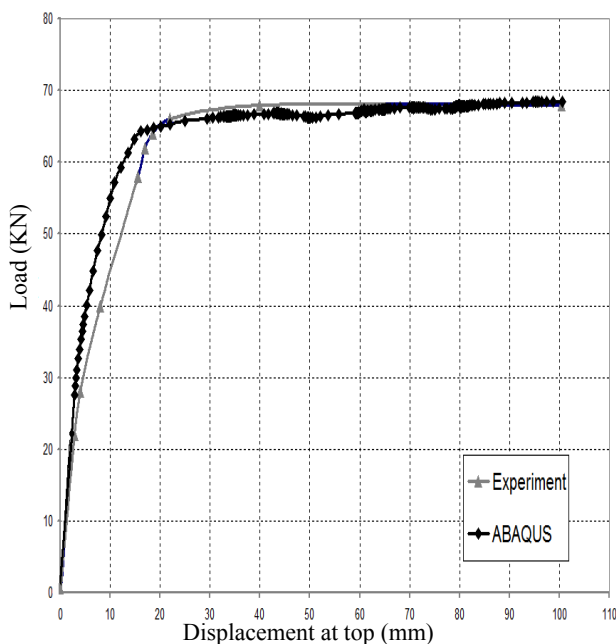
در شبیه‌سازی نمونه تقویت شده W14 با توجه به این که از مدل پلاستیسیته آسیب برای بتن استفاده شده است انتظار می‌رود با دادن رابطه تنش کرنش بتن محصور نشده به نرم افزار این مدل بتواند محصورشدگی را بگیرد. آنچه در تعریف این مدل رفتاری مهم است کرنش نهایی بتن محصور شده است که در اینجا ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. نکته حائز اهمیت دیگر تعریف پارامتر آسیب فشاری بتن است که به نوعی کاهش سختی در کرنش فشاری بتن را معرفی می‌کند. چنانچه زاویه اتساع برای نمونه‌های محصور شده کمتر از نمونه‌های محصور نشده و حدوداً برابر ۱۰ در نظر گرفته شود نتایج بهتری به دست می‌آید. نمودار بار جانبی در مقابل جابه‌جایی جانبی بالای ستون در نمونه W14 در نمودار شکل ۸ با نتایج آزمایش مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل پلاستیسیته آسیب تا حد خوبی می‌تواند محصورشدگی مقاطع مستطیلی را شبیه‌سازی کند.

#### ۸. ستون CI4 در دو حالت بدون تقویت و با تقویت ژاکت FRP

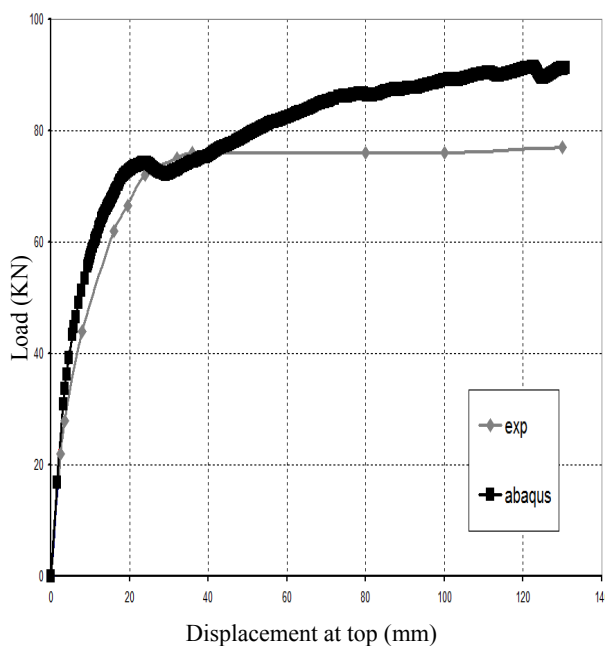
این ستون در سال ۱۹۹۴ توسط حسینی و خالو [۱۴] مورد آزمایش قرار گرفت. و نتایج بارگذاری ستون تحت بار سیکلیک در دو حالت بدون تقویت (CI4)، و تقویت شده با ژاکت CFRP، (W14) ارائه گردیده است. که در هر دو حالت رفتار آن در اباکوس مدل شده است. شکل ۶- مشخصات هندسی ستون را نشان می‌دهد و در ادامه مشخصات مواد بیان شده‌اند. بتن مورد آزمایش از نوع بتن مقاومت بالا با  $f^c$  برابر ۵۳ مگا پاسکال است. در ساخت نمونه‌ها از فوق روان کننده استفاده شده و نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز در شرایط آزمایشگاه نگهداری شده‌اند. فولادها از نوع فولاد Grade40 هستند. CFRP به کار رفته در این آزمایش دارای سه لایه هر یک به ضخامت ۰/۱۶ میلیمتر، مقاومت کششی نهایی ۳۵۰۰ MPa، مدول الاستیسیته ۲۳۰ GPa و کرنش نهایی ۰/۰۱۵ می‌باشد. و تا ارتفاع ۵۰۰ میلیمتر از پای دیوار امتداد یافته‌اند. مود شکست نهایی گسیختگی FRP بوده است و به عبارتی در مدل آباکوس باند کامل بین FRP و بتن در نظر گرفته می‌شود. می‌دانیم رفتار FRP الاستیک خطی



شکل ۶- مقطع ستون به همراه میلگرد گذاری آن [۱۴]



شکل ۸- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی ستون CI4



شکل ۷- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی ستون WI4

می گردد، است. در آیتم آخری که ذکر شد محصورشدگی فقط در ناحیه المان مرزی با حالتی که دور تا دور طول دیوار محصور شود مقایسه شده است.

#### ۱۰. دیوار SH3

این دیوار ۱۳ طبقه با استفاده از آیین نامه ACI و به روش مقاومتی طراحی شده و ملزومات آیین نامه ی بتن ایران (آبا) را

#### ۹. مطالعات پارامتری

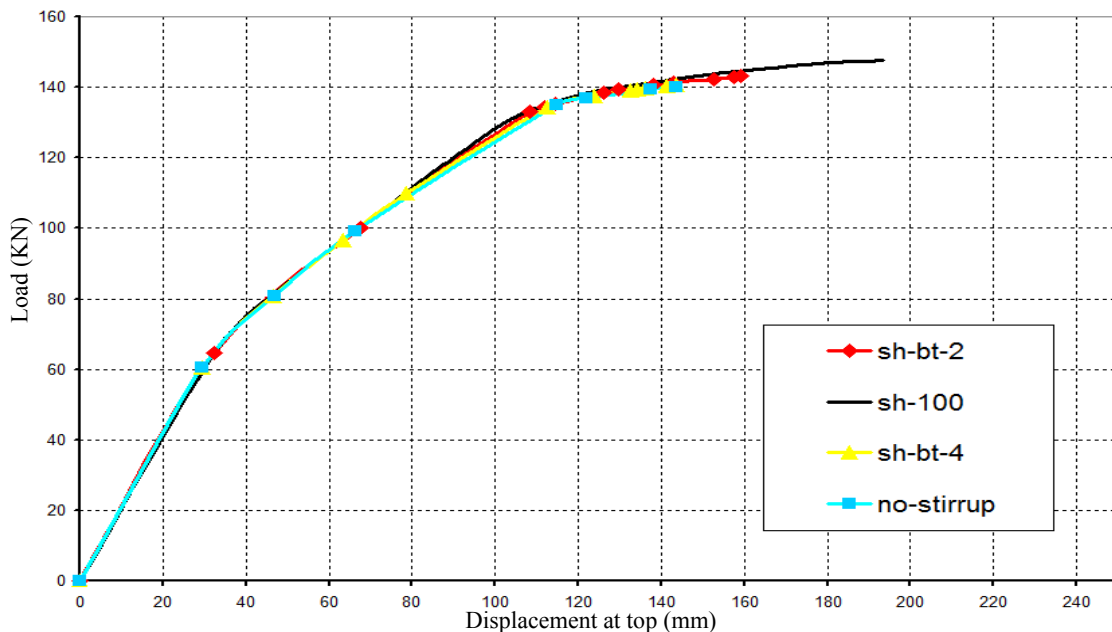
در این بخش تقویت دیوارها به صورت دو بخش جداگانه شامل تقویت عرضی مورد توجه قرار گرفته است. منظور از تقویت عرضی استفاده از ورق FRP به صورت دور پیچ به دور اجزاء مرزی است. در بخش تقویت عرضی پارامترهای مورد مطالعه، اثر تغییر ارتفاعی از دیوار است که با ژاکت پوشیده می شود، اثر تعداد لایه های ژاکت FRP و اثر طولی از دیوار که محصور

اصلاً طرح لرزه‌ای نداشته باشد، و در اجزای مرزی از خاموت استفاده نشده باشد مورد مطالعه قرار گرفت. تقویت عرضی بر روی دیواری انجام می‌شود که فاصله خاموت‌ها در جزء مرزی ۲ برابر فاصله آن در دیوار طرح شده مطابق آیین نامه است. نتایج این بررسی، با رفتار دیواری که مطابق آیین نامه طراحی شده مقایسه می‌شود، تا مشاهده گردد که آیا تقویت می‌تواند رفتار دیوار معیوب را به رفتار دیوار طرح شده بر طبق آیین نامه نزدیک کند یا خیر. پارامترهای مورد بررسی اثر ارتقاعی از دیوار که جزء مرزی تقویت می‌شود؛ اثر تعداد لایه‌ها، و مقایسه تقویت جزء مرزی با تقویت تمام طول افقی دیوار می‌باشند.

هم‌ارضا می‌نماید. به همین دلیل با استفاده از مرجع [۷] دیوار به صورت مقیاس شده و با مقیاس یک چهارم مدل‌سازی شد.

### ۱.۱. اثر کاهش میلگردها و اعمال تقویت عرضی

ابتدا اثر کاهش میلگردهای خاموت در اجزای مرزی بر روی رفتار دیوار SH3 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. اشتباه در طراحی یا اجرا و ارضا نکردن آیین‌نامه‌های لرزه‌ای جدید به خصوص در مناطق با لرزه خیزی بالا نیز موقعیت‌هایی هستند که در آن ممکن است میلگردهای دیوار برشی کافی نباشند. در این حالت فاصله خاموت‌ها به ۲ و ۴ برابر فاصله آن‌ها در دیوار طراحی شده طبق آیین نامه افزایش یافت. هم‌چنین حالتی هم که دیوار



شکل ۹- تأثیر کاهش میلگردهای عرضی در اجزای مرزی دیوار SH3

دیوار مؤید این مطلب است که تقویت اجزای مرزی به ارتفاع مفصل پلاستیک و تنها با یک لایه FRP جابه‌جایی دیوار ضعیف را به جابه‌جایی دیوار طراحی شده بر اساس آیین‌نامه می‌رساند. حتی تقویت ارتفاع کم‌تر از آن هم این منظور را با بار ترک خوردگی اندکی کمتر تأمین می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌گردد افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش چشمگیر در بار نهایی، بار ترک خوردگی و جابه‌جایی دیوار نسبت به نمونه آیین‌نامه‌ای می‌شود. چنانچه تقویت ناحیه مفصل پلاستیک دیوار در حالتی

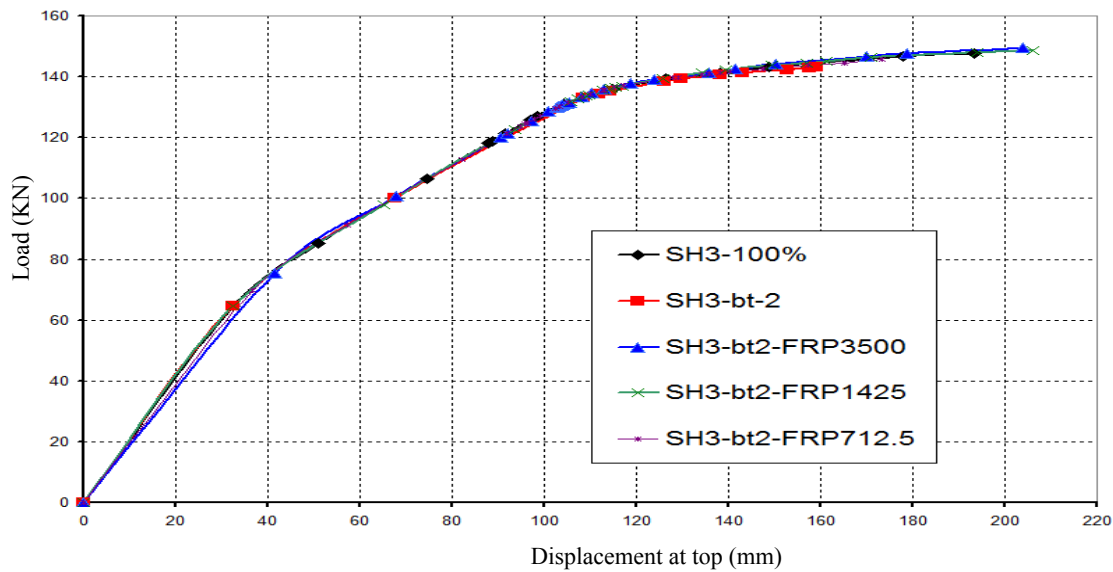
### ۱.۲. نتایج

نتایج نشان می‌دهد که فاصله بیش از حد خاموت‌ها بر روی رفتار شکل‌پذیر دیوار بیش‌تر مؤثر است تا مقاومت آن؛ به طوری که افزایش فاصله خاموت‌ها در اجزای مرزی کاهش ۲۱ درصدی در جابه‌جایی و کاهش ۳ درصدی در بار نهایی دیوار را در پی دارد. هم‌چنین چنانچه فاصله خاموت‌ها از حدی بیش‌تر شود رفتار دیوار مشابه رفتار دیواری می‌شود که هیچ خاموتی در اجزای مرزی ندارد (دیوار برون طرح لرزه‌ای). نتایج تقویت

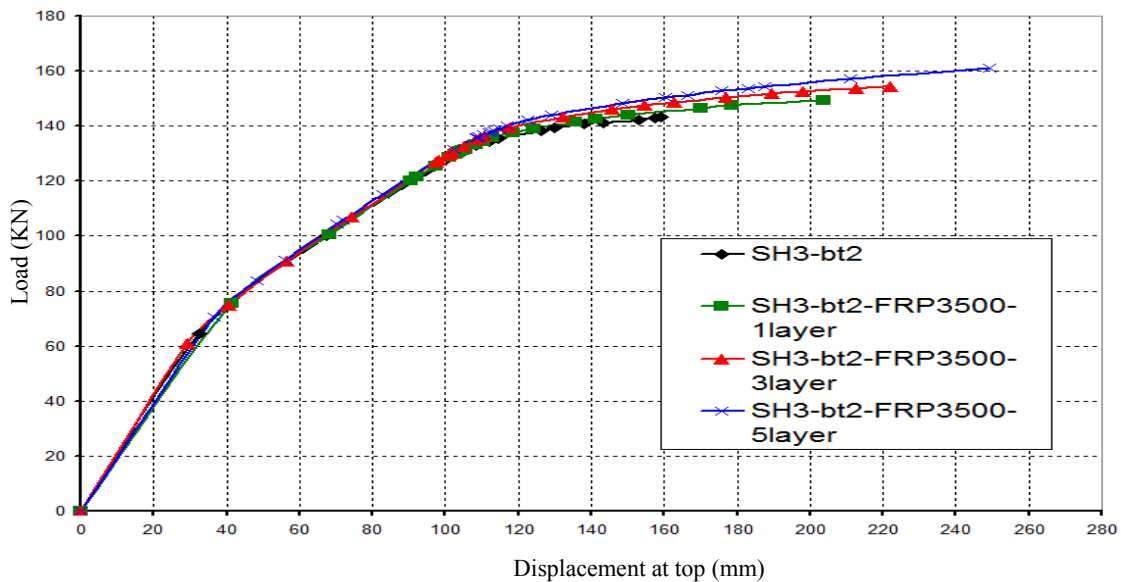


که فقط جزء مرزی تقویت شود با حالتی که دورتا دور با ژاکت FRP تقویت گردد مقایسه شود ملاحظه می گردد که استفاده از ژاکت باعث افزایش ۱۵ درصدی در بار نهایی و ۳۶ درصدی در جابه جایی و ۱۰ درصدی در بار ترک خوردگی نسبت به نمونه آیین نامه ای شده است.

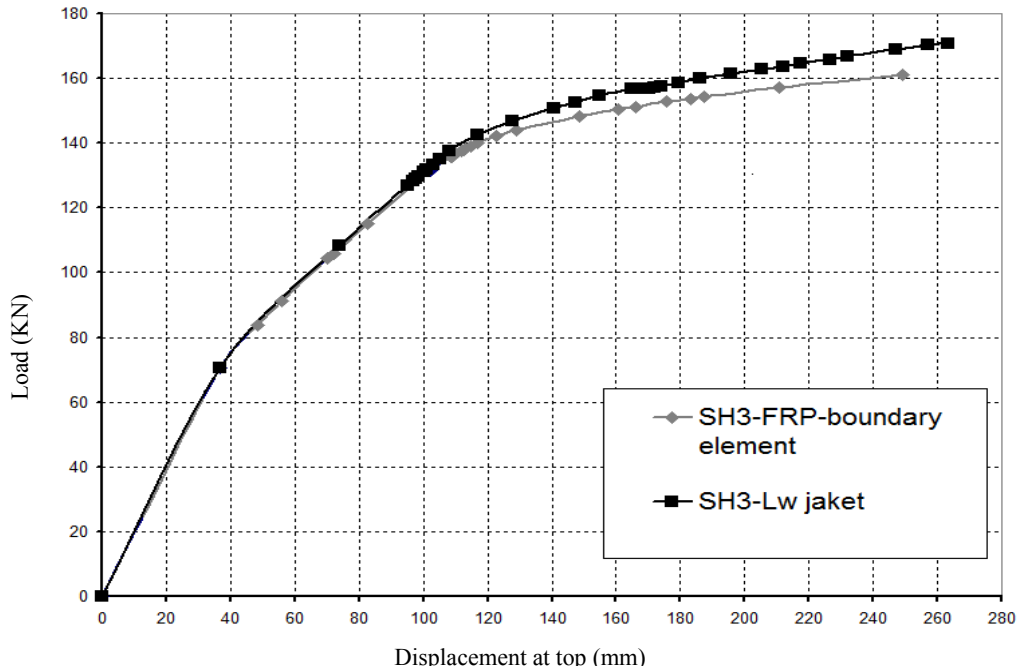
هم چنین چنانچه دیوار بدون طرح لرزه ای با دور پیچ FRP در مفصل پلاستیک تقویت شود بار نهایی و نقطه تسلیم میگردها در



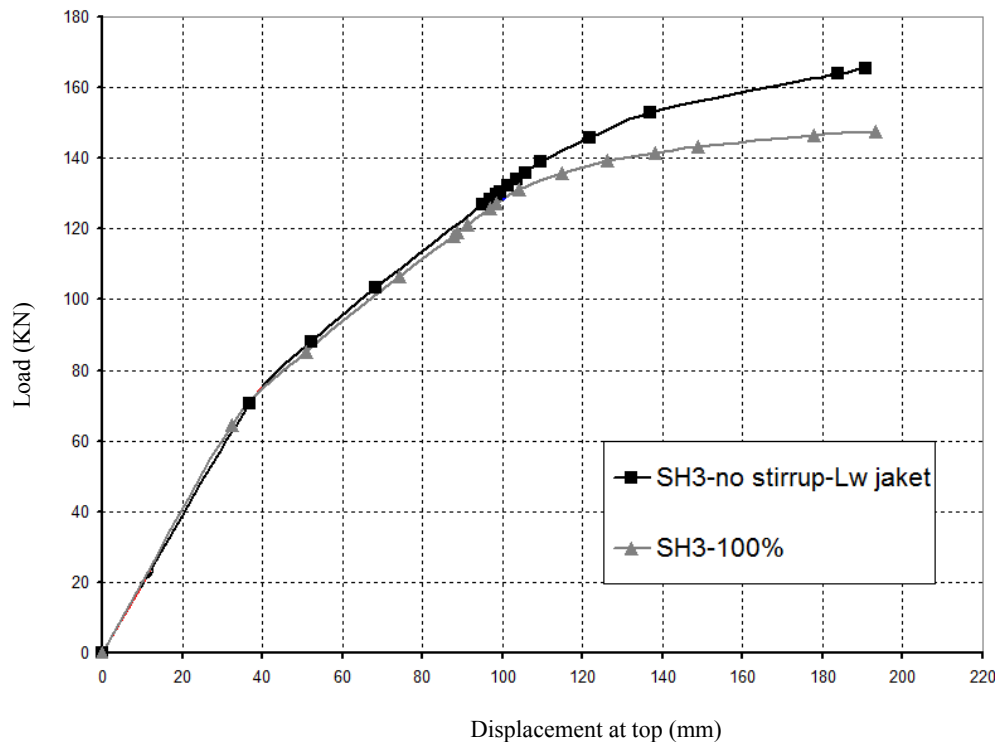
شکل ۱۰- اثر تغییر ارتفاعی از دیوار که مورد تقویت عرضی قرار می گیرد.



شکل ۱۱- اثر تغییر تعداد لایه های FRP در تقویت عرضی اجزای مرزی دیوار SH3.



شکل ۱۲- مقایسه تقویت اجزای مرزی با حالتی که دور تا دور دیوار با ژاکت FRP محصور گردد.



شکل ۱۳- مقایسه تقویت اجزاء مرزی دیوار بدون طرح لرزه‌ای و در حالتی که دور تا دور دیوار با ژاکت FRP محصور گردد، با دیوار طرح شده بر اساس آیین نامه.

Experimental Investigation of Walls with Rectangular And T Shaped Cross-Section”, Report to National Science Foundation, Clarkson University, 1995.

[8]. Perry, A., Ahmed, M.M. and Bryson, M., “Test of High Rise Core Wall: Effective Stiffness for Seismic Analysis,” ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 5, PP. 549-559, 2007.

[9]. M.M. Ahmed, , “Linear and Nonlinear Flexural Stiffness Models for Concrete Walls in High-Rise Buildings,” University of British Columbia, PHD thesis, 2000.

[10]. ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User Manual, Version 6.7, 2007.

[11]. G. Horrigmoe, , I. Sæther, , B. Sand, “Validation of Nonlinear Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Attacked by Corrosion,” Report of Sustainable Development Global Change and Ecosystems Integrated Project, 2007.

[12]. M.H. Harajli, “Axial Stress-Strain Relationship for FRP Confined Circular and Rectangular Concrete Columns,” Cement & concrete Composites, Vol. 28, PP. 938-948, 2006.

[13]. ACI 440.XR, Report on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2007.

[14]. A. Hosseini, A.R. Khaloo, S. Fadaee., “Seismic Performance of High-Strength Concrete Square Columns Confined with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPs),” Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 32, NO. 3, 2005.

### ۱۳. مراجع

[1]. A. Kheroddin, and H. Naderpour, “Nonlinear Finite Element Analysis of R/C Shear Walls Retrofitted Using Externally Bonded Steel Plates and FRP Sheets,” 1<sup>st</sup> International Structural Specialty Conference, May 23-26, 2006.

[2]. J.C. Lombard, ”Seismic Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Shear Walls Using Externally Bonded Carbon Fiber Tow Sheets,” PHD thesis, Carleton University, 1997.

[3]. S. Hiotakis, , D.T. Lau, and N. Londono, “Research On Seismic Retrofit and Rehabilitation of Reinforced Concrete Shear Walls Using FRP Materials”, Carleton University, Ottawa, Canada, 2004.

[4]. N. Thomas, A.J. Salonikios, KaPPos, A. Lonnis Tegos and G. P. Georgios “Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Failure Modes, Strength and Deformation Analysis and Design Implications,” ACI Structural Journal, Vol. 97, January-February, 2000.

[5]. A.A. Tasnimi, “Strength and Deformation of Mid-Rise Shear Walls Under Load Reversal”, Engineering Structures, Vol. 22, PP 311-322, 2000.

[6]. R.K.L. Su, S. M. Wong, “Seismic Behavior of Slender Reinforced Concrete Shear Wall under High Axial Load Ratio,” Engineering Structures, Vol. 29, PP 1957-1965, 2007.

[7]. J. H. Thomsen, and J.W. Wallace, “Displacement-Based Design of R/C Structural Walls: An

## Effect of FRP confinement of boundary elements in slender RC shear walls

M. Mohammadi Anaei

Master Student, Isfahan University of Technology (IUT)

D. Mostofinejad\*

Assistant Professor, Isfahan University of Technology (IUT)

(Received: 2010/12/15, Accepted: 2011/5/10)

### Abstract

Concrete shear walls are the most commonly used systems to resist lateral loads due to earthquakes in high rise buildings. In recent years, seismic design methodologies have put more attention on limiting the maximum drift experienced by a structure during earthquake. Very large in-plane stiffness of shear walls and its role on redistribution of the lateral loads from columns to wall provide an excellent drift control. Nevertheless, Time expiring, structural damages and early code shortcomings cause unsuitable efficiency of existing structural walls against earthquake. Fiber Reinforced Polymer (FRP) materials have greatly used in strengthening and retrofitting of structural elements in recent years. The excellent features of FRP materials set them the first alternative in the strengthening projects. However, a glance on the previous studies shows that very limited analytical and/or experimental studies have been conducted on the FRP strengthening of the slender RC shear walls so far. In this paper, effect of FRP confinement of boundary elements in slender RC shear walls on the overall behavior of boundary elements is investigated. The finite element software is calibrated and verified using available experimental data. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete walls is performed using damage plasticity model and tension stiffening effects. Results of the current study show the superior effectiveness of strengthening FRP composite layers on ductile behavior of concrete shear walls.

**Keywords:** Reinforced concrete, shear wall, finite element analysis, damage plasticity model, tension stiffening, FRP, strengthening.

---

\* Corresponding author: dmostofi@cc.iut.ac.ir