

# مقایسه تاثیر مقاومسازی لرزه ای ستون بتنی با استفاده از ژاکت بتنی، ژاکت فولادی و FRP به وسیله ی مدل سازی عددی

عطیه دائمی

کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی شریف  
atieh.daemi@gmail.com

علیرضا خالو

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
khaloo@sharif.edu

## چکیده:

در چند دهه ی اخیر، مقاومسازی ستون های بتنی و بررسی رفتار آنها تحت بار زلزله به خصوص از نقطه نظر شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی سازه، مورد توجه قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از این مطالعات بر محور سازی اعضای بتنی به منظور افزایش شکل پذیری و جذب انرژی آنها در برابر نیروهای ناشی از زلزله می باشد. در این مطالعه ۳ روش عمده برای مقاومسازی ستون های بتنی شامل تقویت ستون با استفاده از ورق های FRP، استفاده از ژاکت فولادی و استفاده از ژاکت بتنی در مقاومسازی ستون مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در این راستا مقاومسازی ستون های بتنی تحت بارهای لرزه ای با بکارگیری تحلیل های عددی با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام گرفت. ابتدا روش عددی با نتایج حاصل از مطالعات تجربی صحت سنجی گردید. با استفاده از نمونه هایی با متغیر های شامل مقاومت بتن، نوع الیاف و تعداد لایه های FRP برای بتن تقویت شده با FRP، متغیر ها شامل ابعاد ورق ها، تعداد و ضخامت ورق های فولادی برای ستون های تقویت شده با ژاکت فولادی و متغیرها شامل مقاومت بتن، ابعاد پوشش بتن و اندازه تنگ و فاصله بین آنها برای ستون های تقویت شده با ژاکت بتنی، در ۳ روش، میزان مقاومت، شکل پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی بر اساس نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که نمونه های تقویت شده با ورق های FRP، عمدتاً باعث بهبود در شکل پذیری شده اند. نمونه های تقویت شده با بتن اگرچه باعث بهبود قابل توجه در تحمل حداکثر مقاومت برشی شده و دامنه عملکرد خطی را ارتقاء داده اند و نیز قابلیت جذب انرژی را بهبود بخشیده اند لیکن شکل پذیری مناسبی از خود نشان نداده اند و نمونه های تقویت شده با ژاکت فولادی، ضمن بهبود در بیشینه مقاومت برشی و قابلیت جذب انرژی، شکل پذیری مناسبی را از خود نشان داده اند. در حالتی که متغیر های سه روش مقاوم سازی با بار محوری ثابت را طوری تغییر دادیم که ظرفیت باربری جانبی یکسان داشته باشند، نمونه ژاکت فولادی و بتنی شکل پذیری بهتری نسبت به نمونه تقویت شده با FRP نشان می دهند. همچنین نمونه تقویت شده با ژاکت فولادی بیشترین جذب انرژی را دارد.

**کلمات کلیدی:** ورق های FRP، ژاکت فولادی، ژاکت بتنی، مقاومسازی، المان محدود.

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه عمری بیش از چند دهه دارند و به دلیل حوادث طبیعی از قبیل زلزله، باد و یا بر اثر خستگی مصالح و یا عوامل خوردنده آسیب پذیرند و یا بر اساس آئین نامه‌های قدیمی با ضرایب ایمنی پایین طراحی شده‌اند. از آنجا که این سازه‌ها اهمیت زیادی دارند و تعداد آنها نیز فراوان است، جایگزین کردن آنها با سازه‌های جدید، اکثراً فاقد توجیه اقتصادی بوده و از نظر اجرایی غیرعملی می‌باشد. در حالی که تعمیر و تقویت آنها در بیشتر موارد امری ضروری و مقرون به صرفه می‌باشد و اهمیت ویژه‌ای به خود گرفته است. عمده این سازه‌ها معمولاً با توجه به آیین‌نامه‌های قدیمی ساخته شده‌اند و در آنها نیروها ناشی زلزله یا به درستی محاسبه نشده یا در محاسبات طراحی منظور نشده است. این عامل و استفاده از مصالح ضعیف و غیر استاندارد و همچنین ضعف در اجرا باعث می‌شود که در برابر زلزله سازه مقاومت لازم برای مقابله و جذب انرژی را نداشته باشد. برای مقاوم سازی تیرهای بتنی و تأمین شکل پذیری و مقاومت لرزه‌ای مورد نیاز در آنها، روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. به طور کلی این روشها به یکی از سه گروه زیر تعلق دارند:

۱- تقویت با استفاده از ژاکت فولادی (ورقه‌های فولادی)

۲- تقویت با استفاده از ژاکت بتنی مسلح

۳- تقویت با استفاده از ژاکت پلیمری الیافی (Fiber Reinforced Polymer or FRP)

محققان بسیاری سعی نموده‌اند با استفاده از روش‌های فوق رفتار ستون‌های تقویت شده را بررسی کنند:

اولین بارکتسوماتا و همکارانش در سال ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ موضوع استفاده از ورق‌های FRP را جهت مقاوم سازی ارائه کردند. در این مطالعه ۵ ستون دایره‌ای و ۱۰ ستون مستطیلی را تحت بار چرخه‌ای قراردادند و اثر ورق‌های FRP را بررسی کردند [۱]. Carlos Chastre و همکاران در سال ۲۰۱۰ تقویت ستون بتنی دایره‌ای را با استفاده از ورق‌های FRP مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بصورت نمودارهای نیرو - تغییر مکان ارائه شد [۶]. Garzón-Roca و همکاران ۱۶ مدل ستون بتنی، در نرم افزار اجزای محدود مدل‌سازی کردند. در شکل ۱ مدل این محققین نشان داده شده است. ستون‌ها با ژاکت فلزی مقاوم سازی شدند و تحت بارگذاری خمشی و محوری قرار گرفتند [۲]. Konstantinos و همکاران در سال ۲۰۰۶ طراحی و آزمایش یک ستون را، تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. میلگردهای طولی ستون اصلی به میلگردهای طولی اضافی در ژاکت بتنی، با استفاده از وارد کردن فولاد متصل شدند. مشخص شد که زمانی که ژاکت بتنی با سخت کننده عرضی ساخته شده است، رفتار تقریباً یکپارچه‌ای می‌توان بدست آورد [۳]. Jankowiak در سال ۲۰۰۵ به معرفی پارامترهای خرابی پلاستیک بتن در مدل اجزای محدود پرداخت [۴]. خالو و حسینی در سال ۲۰۰۵ عملکرد لرزه‌ای ستون با بتن مقاومت بالا را به هنگام تقویت با استفاده از ورق‌های FRP مورد ارزیابی قرار دادند. مدل ستون مربعی به ابعاد ۲۶۰ میلی متر و طول ۱۶۵۰ میلی متر ساخته شد. در پایان نمودارهای ممان - زاویه برای مدل‌ها رسم و مورد بررسی قرار گرفت [۵]. با توجه به خرابی‌های زیادی که در نقاط مختلف دنیا به دلیل وقوع زلزله به خصوص در سال‌های اخیر رخ داده، لزوم شناسایی سازه‌های آسیب پذیر و ارائه راه حلی اقتصادی و مناسب برای جلوگیری از تلفات انسانی و اقتصادی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از همین رو ما در این تحقیق بر آن شدیم که مقاوم سازی ستون بتنی تحت بار زلزله با بار محوری ثابت مورد بررسی قرار دهیم.

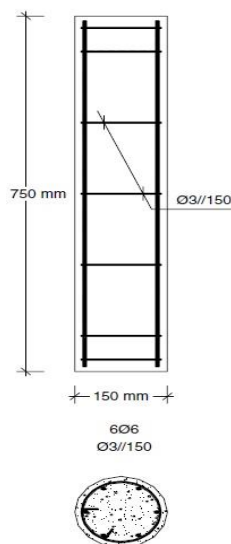
## ۲- روش مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج با روش آزمایشگاهی

به منظور تطابق بیشتر نتایج بدست آمده از نرم‌افزار، سه مدل آزمایشگاهی معتبر که به ترتیب با ورق‌های FRP، ژاکت فلزی و ژاکت بتنی تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل آزمایش شده را توسط نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار می‌دهیم. سپس نتایج حاصل از آزمایش را با نتایج حاصل از تحلیل مورد مقایسه قرار می‌دهیم. به منظور مدل‌سازی هریک از نمونه‌ها، ابتدا هندسه هر قسمت از مدل به صورت جداگانه مطابق جزییات آزمایشگاهی در نرم‌افزار مدل می‌شود. به این روش مدل‌سازی که عمدتاً برای مدل‌های پیچیده و

مشمول بر چند جزء بکار می‌رود، مدلسازی غیرمستقیم گفته می‌شود. سپس خواص نظیر هر یک از قسمت‌های مدل در نرم‌افزار تعریف شده و به آن قسمت اختصاص می‌یابد. پس از این مراحل، اجزای مختلف مطابق مدل آزمایشگاهی بر روی هم سوار می‌شوند و تماس بین اجزای مختلف تعریف می‌شود. در ادامه بار گذاری و شرایط تکیه‌گاهی تعریف شده و مدل هندسی ساخته شده به تعدادی گره و المان تقسیم می‌شود و آماده تحلیل می‌شود. در این پروژه از المان سه بعدی Solid برای مدل‌سازی اجزای سه بعدی استفاده شده است. المان Solid می‌تواند جابه‌جایی‌های زیاد در مجموعه را مدل نماید. همچنین امکان مدل نمودن رفتار غیرخطی و نیز تغییر شکل‌های بزرگ نیز وجود دارد. برای تحلیل باید خواص المان‌ها روی مدل معلوم باشد. به طور معمول این خواص شامل جنس و سایر خصوصی اتمی باشد. در این مدل از پلاستیسیته مستقل از زمان استفاده شده است. پلاستیسیته مستقل از زمان به حالتی اطلاق می‌شود که با رسیدن به یک سطح معلوم تنش، کرنش برگشت ناپذیر می‌شود. کرنش در این حالت به طور مستقل از زمان متحول می‌شود و به مقدار تنش و تاریخچه تنش بستگی دارد.

## ۱-۲- مدل تقویت شده با ورق های FRP

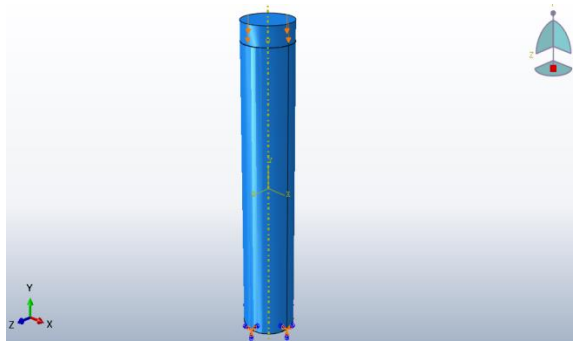
برای انجام صحت سنجی، مدل پیشنهادی تقویت ستون بتنی با FRP از مدل آزمایشگاهی که توسط Carlos Chastre و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۰ مورد آزمایش قرار گرفته است، استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی برای بررسی ستون تقویت شده با FRP، ستونی با مقطع دایره شکل به قطر مشخص شده در شکل ۱ می‌باشد که از بتن با مقاومت فشاری ۳۸ مگاپاسکال پر شده است. طول ستون به جهت سادگی انجام آزمایش ۷۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده است.



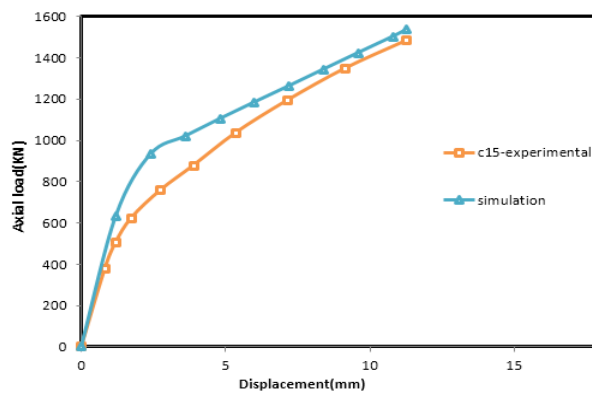
شکل ۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی ستون بتن مسلح مقاوم سازی شده با ورق های FRP [1]

بارگذاری در این آزمایش بر اساس نمونه‌ی آزمایش شده در مقاله مرجع آورده شده است. ۱۵۰۰ کیلونیوتن نیروی محوری به ستون به صورت خطی با روش کنترل نیرو وارد شده است.

مدل اجزای محدود نمونه تقویت شده با ورق های FRP در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در بالای ستون از یک ورق فولادی الاستیک برای اعمال نیرو به ستون و جلوگیری از تمرکز تنش استفاده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاه در شکل ۳ نشان داده شده است که تطابق مناسبی بین دو روش مشاهده می‌شود.



شکل ۲- نمونه مدل‌سازی شده ستون بتن مسلح مقاوم سازی شده با ورق های FRP در نرم افزار

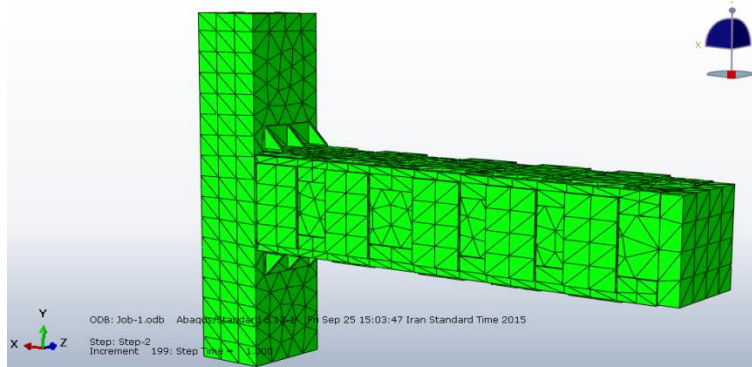


شکل ۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی ستون بتن مسلح مقاوم سازی شده با ورق های FRP

## ۲-۲ مدل تقویت شده با ژاکت فولادی

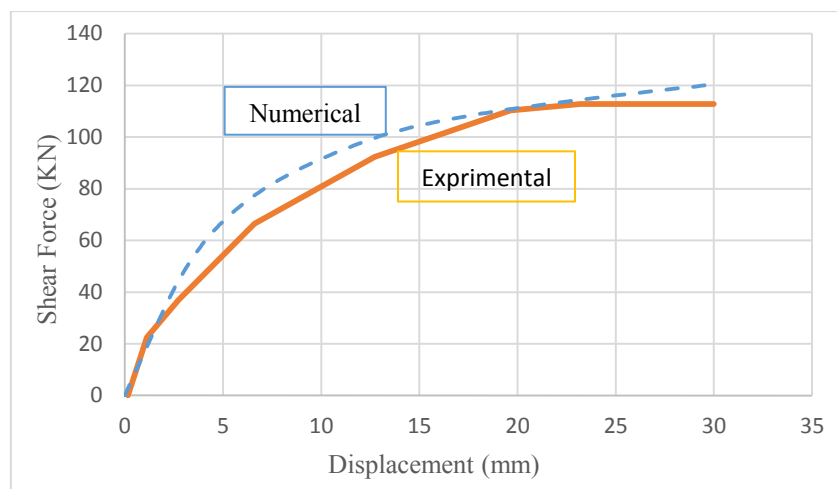
به منظور مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌ی تقویت شده با ژاکت فلزی، از پژوهش‌های Julio Garzón-Roca و همکاران [۲] که در سال ۲۰۱۲ انجام گرفت، استفاده شده است. به این منظور ستون به همراه قسمتی از تیر متصل به آن تحت آزمایش قرار گرفته است. دو سر ستون به صورت مفصلی می‌باشد و تاریخچه‌ی بارگذاری به این صورت است که در مرحله اول یک بار محوری به میزان ۴۰۰ کیلونیوتن به ستون اعمال می‌شود و در مرحله بعد نیروی برشی به اندازه‌ی ۱۱۲/۵ کیلونیوتن توسط جک هیدرولیکی به نمونه وارد می‌شود.

به منظور ساخت مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار، با توجه به تقارن محوری موجود در مدل، با یک قضاوت مهندسی می‌توانیم نصف سازه را مطابق شکل ۴ مدل کنیم. طبیعی است در نیمه دیگر مدل، بارها مشابه نیمه مدل شده می‌باشد. بارگذاری محوری در ابتدا به مدل اعمال می‌شود و در ادامه بارگذاری برشی به روش کنترل جابجایی تا رسیدن به تغییر مکان جانبی ستون به میزان ۳۰ میلی متر ادامه پیدا می‌کند. میلگردهای طولی و تنگ های مدل شده نیز به صورت مدفون در بتن مدل شده‌اند که نزدیکترین روش به واقعیت است.



شکل ۴- نمونه مدل‌سازی شده ستون بتن مسلح تقویت شده با ژاکت فولادی در نرم افزار

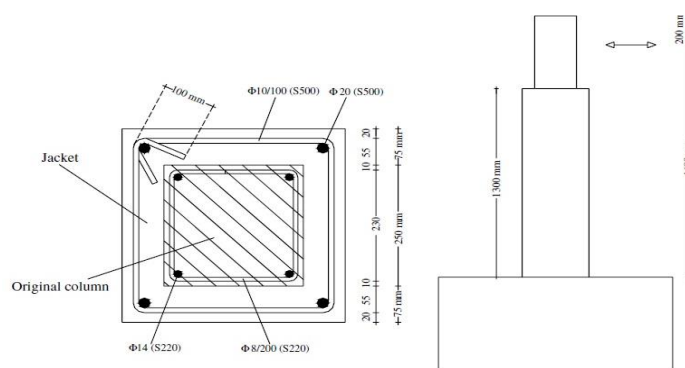
نمودارهای نیرو - تغییر مکان بدست آمده از بارگذاری آزمایشگاهی و مدلسازی اجزای محدود، برای ستون تقویت شده با ژاکت فلزی، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می توان گفت نتایج مدلسازی اجزای محدود تقریب مناسبی با روش آزمایشگاهی دارد. با توجه به معیار کرنش پلاستیک، در مدلسازی عددی میزان جابجایی نهایی ۳۶ mm بدست آمد. ولی بدلیل اینکه بارگذاری آزمایشگاهی تا ۳۰ mm ادامه پیدا کرده است لذا نمودار عددی در این نقطه قطع شده است.



شکل ۵- نتایج حاصل از مدلسازی عددی و آزمایشگاهی ستون بتن مسلح تقویت شده با ژاکت فولادی

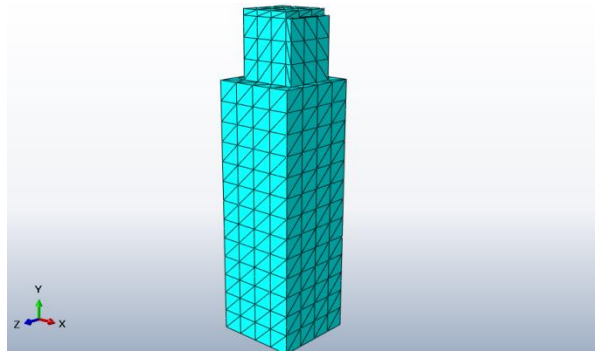
### ۲-۳ مدل تقویت شده با ژاکت بتنی

در این قسمت جهت اعتبارسنجی نتایج، از آزمایش‌هایی که توسط Konstantinos و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۶ انجام شد، استفاده می‌کنیم. هندسه و ابعاد نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. بارگذاری به صورت نیروی محوری ثابت با متوسط مقدار ۹۰۰ کیلونیوتن، و نیروی برشی چرخه‌ای که عمود بر نیروی محوری در انتهای ستون وارد می‌شود، می‌باشد. نیروی برشی به صورت کنترل جابجایی وارد شده و حداکثر مقدار آن در نمونه به ۱۰۰ میلی‌متر جابجایی عرضی می‌رسد.



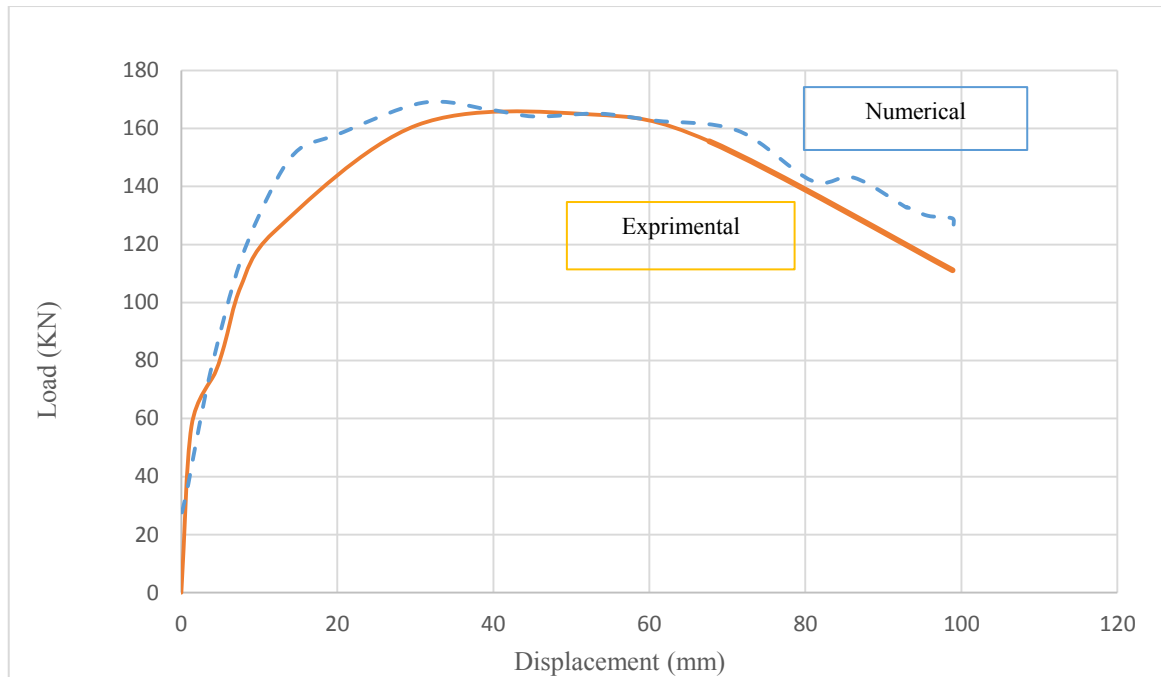
شکل ۶- مشخصات نمونه آزمایشگاهی ستون بتن مسلح تقویت شده با ژاکت بتنی [۳]

مطابق شکل ۷ مدل اجزای محدود نمونه‌ی آزمایشگاهی مدلسازی شده است. همانطور که مشخص است در قسمت تقویت نشده ستون که بارگذاری اعمال می‌شود، برای جلوگیری از تمرکز تنش از دو صفحه الاستیک فولادی افقی و قاعم به ترتیب برای اعمال بار محوری و برشی استفاده شده است.



شکل ۷- نمونه مدل‌سازی شده ستون بتن مسلح تقویت شده با ژاکت بتنی در نرم افزار

یک معیار مناسب برای مقایسه دو روش، ترسیم پوش نمودارهای بدست آمده است. بدین منظور و برای مقایسه بهتر، پوش نمودارهای هیستریزس حاصل از هر دو روش آزمایشگاهی و عددی در شکل ۸ نشان داده شده است که تطابق مناسبی مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به معیار کرنش پلاستیک، در مدل‌سازی عددی میزان جابجایی نهایی ۱۰۳ mm بدست آمد. ولی بدلیل اینکه بارگذاری آزمایشگاهی تا ۱۰۰ mm ادامه پیدا کرده است لذا نمودار عددی در این نقطه قطع شده است.



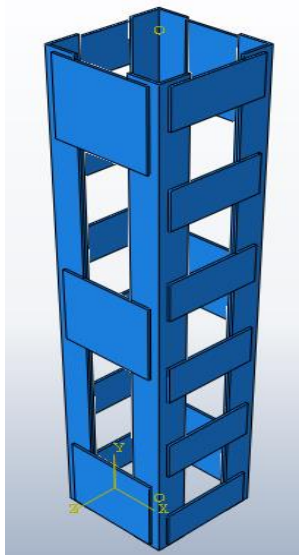
شکل ۸- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی ستون بتن مسلح تقویت شده با ژاکت بتنی

### ۳. مدل‌سازی و مشخصات مصالح مدل‌ها

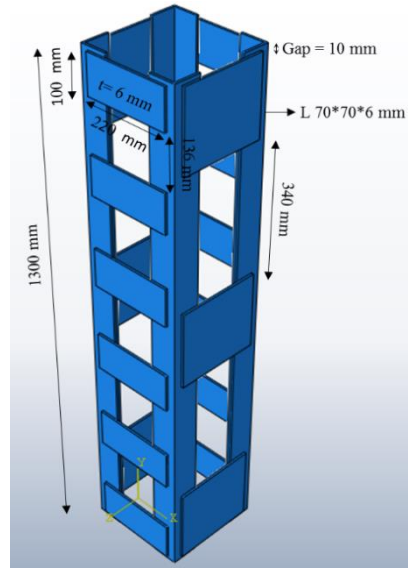
ابتدا هندسه‌ی مدل تشریح شده و ابعاد و اندازه‌های قطعات مورد استفاده و ابعاد ستون و جزییات هندسی نشان داده خواهد شد. در ادامه خواص مصالح نسبت داده شده به مقاطع آورده می‌شود و سپس نوع مش‌بندی المانها آورده می‌شود. همچنین نوع بار اعمالی و تاریخچه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی مورد استفاده در مدل‌سازی نیز بیان خواهد شد. به منظور مدل‌سازی ستون، با مطالعه تحقیقات انجام شده، مقطع ستون به صورت مربعی با ابعاد ۲۵۰\*۲۵۰ میلی متر است و از چهار میلگرد ۱۴ در چهار گوشه ستون به عنوان میلگرد طولی استفاده شده است. همچنین از میلگرد ۸ با فواصل ۲۰۰ میلی متر به عنوان تنگ برای تامین محصور شدگی بتن و تحمل برش استفاده شده است (شکل ۱-۹). در واقع این مقطع ستون یک مقطع ضعیف برای بارهای وارده می‌باشد که ناشی از اشتباه





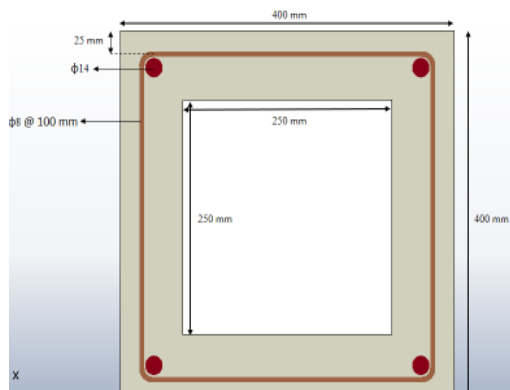


شکل ۵-۱۰-ژاکت فولادی با ۶ ورق در جهت برشی و ۱۲ ورق در جهت عمودی

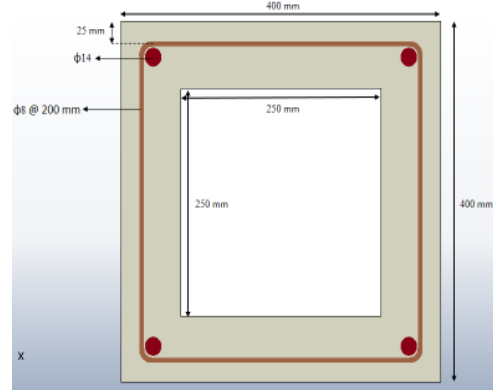


شکل ۴-۱۰-ژاکت فولادی با ۱۲ ورق در جهت برشی و ۶ ورق در جهت عمود

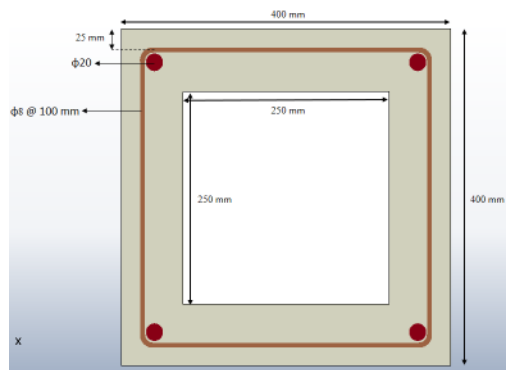
به منظور مدلسازی ژاکت بتنی، از چهار مقطع نشان داده شده در شکل‌های ۱۱-۱ تا ۱۱-۴ استفاده شده است. همانطور که مشخص است همه نمونه‌ها مربعی و با ابعاد داخلی ۲۵۰\*۲۵۰ میلی‌متر و ابعاد خارجی ۴۰۰\*۴۰۰ میلی‌متر هستند. از ۲۵ میلی‌متر کاور از سطح بیرونی تنگ استفاده شده است. در واقع در این مدل‌ها تاثیر فاصله تنگ‌ها و قطر تنگ و قطر میلگرد اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



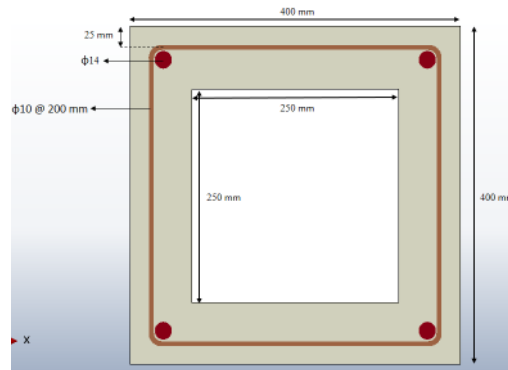
شکل ۲-۱۱-مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ  $\phi 8 @ 100 \text{ mm}$



شکل ۱-۱۱-مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ  $\phi 8 @ 200 \text{ mm}$



شکل ۴-۱۱-مقطع با میلگرد ۲۰ و تنگ  $\phi 8 @ 100 \text{ mm}$



شکل ۳-۱۱-مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ  $\phi 10 @ 200 \text{ mm}$



با توجه به اینکه در مدل‌سازی ستون اجزای مختلفی نظیر میلگردها، بتن، ورق‌های FRP و اجزای فولادی استفاده شده است، لذا خواص هر یک به صورت جداگانه آورده می‌شود. بدیهی است این خواص در مدل‌سازی به هر یک از اجزا نسبت داده شده است. در مدل‌سازی از خواص متعارف فولاد برای میلگردها مطابق جدول ۱ استفاده شده است. و با رفتار تنش - کرنش دارای سخت شونده‌گی بر اساس استاندارد ASTM استفاده شده است.

جدول ۱- خواص فولاد استفاده شده برای میلگردها

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی
۲۰۰	۰/۳	۴۲۰	۵۱۰	۰/۱

به منظور مدل‌سازی مصالح بتنی از روش Concrete Damage Plasticity استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی، رفتاری غیر الاستیک برای بتن در نظر می‌گیرد. این روش از نظریه دراکر پراگر [۸] استفاده می‌کند. این روش برای تحلیل سازه‌های بتنی که تحت تاثیر بارهای غیر متناوب و متناوب و یا دینامیکی قرار دارند استفاده می‌شود. در فاز الاستیک، از مدول الاستیسیته و ضریب پواسون استفاده می‌شود. برای فاز پلاستیک بتن، از ضرایب مربوط به رفتار فشاری و رفتار کششی و همچنین جدول مربوط به پارامتر خرابی مطابق جدول ۲ استفاده شده است. مطابق پیشنهادی مطرح شده در قسمت مدل‌سازی مصالح بتنی در نرم‌افزار آباکوس، در مرجع [۴] محاسباتی برای دستیابی به نمودارهای تنش - کرنش مصالح بتنی دارای رفتار خرابی پلاستیک<sup>۱</sup> (CDP) انجام شده، استفاده شده است.

جدول ۲- پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی رفتار بتن محصور [۴]

Material's parameters	B50	The parameters of CDP model	
		$\beta$	38°
Concrete elasticity		$m$	1
$E$ [GPa]	19.7	$f=f_{60}/f_c$	1.12
$\nu$	0.19	$\gamma$	0.666
Concrete compression hardening		Concrete compression damage	
Stress [MPa]	Crushing strain [-]	DamageC [-]	Crushing strain [-]
15.0	0.0	0.0	0.0
20.197804	0.0000747307	0.0	0.0000747307
30.000609	0.0000988479	0.0	0.0000988479
40.303781	0.000154123	0.0	0.000154123
50.007692	0.000761538	0.0	0.000761538
40.236090	0.002557559	0.195402	0.002557559
20.236090	0.005675431	0.596382	0.005675431
5.257557	0.011733119	0.894865	0.011733119
Concrete tension stiffening		Concrete tension damage	
Stress [MPa]	Cracking strain [-]	DamageT [-]	Cracking strain [-]
1.99893	0.0	0.0	0.0
2.842	0.00003333	0.0	0.00003333
1.86981	0.000160427	0.406411	0.000160427
0.862723	0.000279763	0.69638	0.000279763
0.226254	0.000684593	0.920389	0.000684593
0.056576	0.00108673	0.980093	0.00108673

همچنین در مدل‌سازی ورق‌های FRP از خواص ورق‌های تقویتی CFRP و GFRP استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات این ورق‌ها در محدوده خواص شرکت‌های سازنده آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات ورق‌های FRP

ورق تقویتی	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	ضخامت (mm)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی
CFRP	۲۲۶	۰/۳	۰,۲	۳۳۳۹	۰/۰۱۴۸
GFRP	۷۵	۰/۳	۰,۲	۱۹۶۰	۰/۰۲۶۱

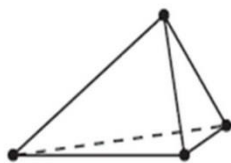
<sup>1</sup> Concrete Damage Plasticity

در مدلسازی اجزای فولادی استفاده شده در ساخت ژاکت فولادی، با توجه به متفاوت بودن خواص فولاد در ساخت میلگرد و ورق، از خواص نشان داده شده در جدول ۴ مطابق با خواص متعارف فولاد ساختمانی و منطبق بر رفتار استاندارد ASTM استفاده شده است.

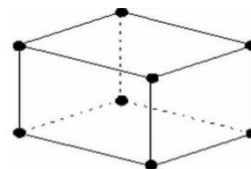
جدول ۴- خواص اجزای ژاکت فولادی

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی
۲۱۰	۰/۳	۲۷۵	۳۵۰	۰/۱۵

به منظور مدلسازی ستون‌ها همچنین از دو نوع بتن C 20 و C 38 جهت بررسی پارامتر مقاومت بتن در مقاوم سازی استفاده شده است. که باید به عنوان خواص اولیه بتن برای دو دسته بتن اعمال شود. در مش بندی قطعات از دو مش مکعبی و هرمی استفاده شده است. المان مورد استفاده برای مش مکعبی، المان C3D8R در نرم‌افزار می‌باشد. نمایی از این المان در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این المان یک المان هشت گره‌ای است که دارای سه درجه‌ی آزادی برای هر گره می‌باشد. همچنین المان مورد استفاده برای مش هرمی، المان C3D4R می‌باشد که این المان نیز دارای چهار گره است که در هر گره، دارای سه درجه‌ی آزادی می‌باشد. نمایی از این المان نیز در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

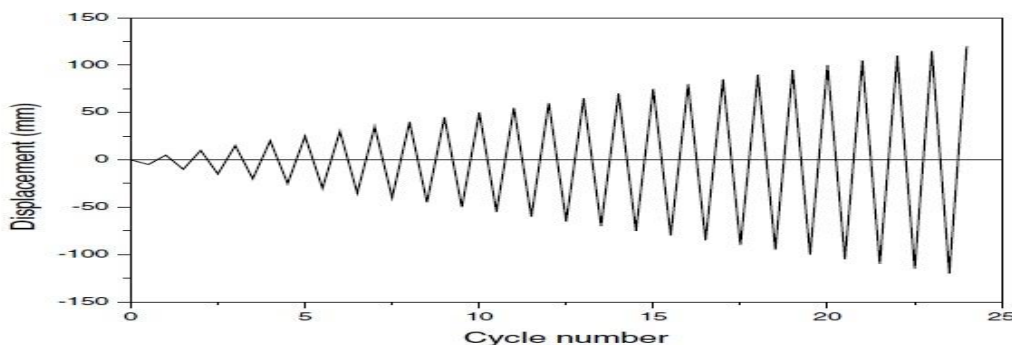


شکل ۲-۱۲- المان هرمی



شکل ۱-۱۲- المان مکعبی

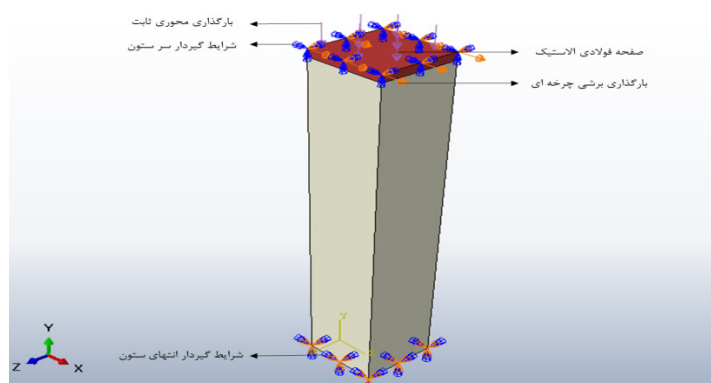
در این مطالعه بار محوری ثابت است و کلاً بار لرزه ای افقی ملاک ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی رفتار سازه تحت بار زلزله، از تاریخچه‌ی بارگذاری مشخصی استفاده می‌شود. کلیه‌ی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای به روش کنترل جابجایی قرار دارند. بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱۳ به صورت اعمال تغییر مکان می‌باشد. در ابتدا تغییر مکان اعمالی کم بوده و رفته رفته افزایش می‌یابد. این نوع بارگذاری را بارگذاری افزایشی می‌نامند. در این مدل-ساز، بار اعمالی تا دریفت ۰/۰۴ رادیان ادامه پیدا کرده است. این دریفت متناظر تغییر مکان ۵۲ mm در انتهای ستون می‌باشد. در ابتدای بارگذاری رفتار مواد در فاز الاستیک بوده و با افزایش بار، سازه وارد فاز پلاستیک می‌شود. تغییر مکان اعمالی به انتهای ستون وارد می‌شود. به جهت جلوگیری از تمرکز تنش در این ناحیه، از یک صفحه فولادی الاستیک در نرم‌افزار در سر ستون استفاده شده است که در واقع تغییر مکان به این صفحه اعمال می‌شود.



شکل ۱۳- تاریخچه بارگذاری چرخه ای [۷]

همچنین با توجه به اینکه در هر سازه‌ای یک ستون غالباً تحت نیروی محوری قابل ملاحظه‌ای قرار دارد، لذا بار محوری ۹۰ton (برای بتن با مقاومت ۳۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع معادل ۰/۲۴۴ $\sigma_c$  و مقاومت ۲۰۰ کیلوگرم بر

سانتی متر مربع معادل  $0.45f_c'$  به صورت ثابت در طی بارگذاری چرخه ای بر روی ستون قرار دارد تا نتایج بدست آمده با تاثیر همزمان نیروی برشی و نیروی محوری باشد (شکل ۱۴). مدل ساخته شده در نرم افزار مطابق جدول های ۵-۱ و ۵-۲ ارائه شده است.



شکل ۱۴- اعمال بارگذاری و شرایط مرزی مدل

جدول ۵-۱- مدل های در نظر گرفته شده برای بتن با مقاومت ۳۸ مگاپاسکال

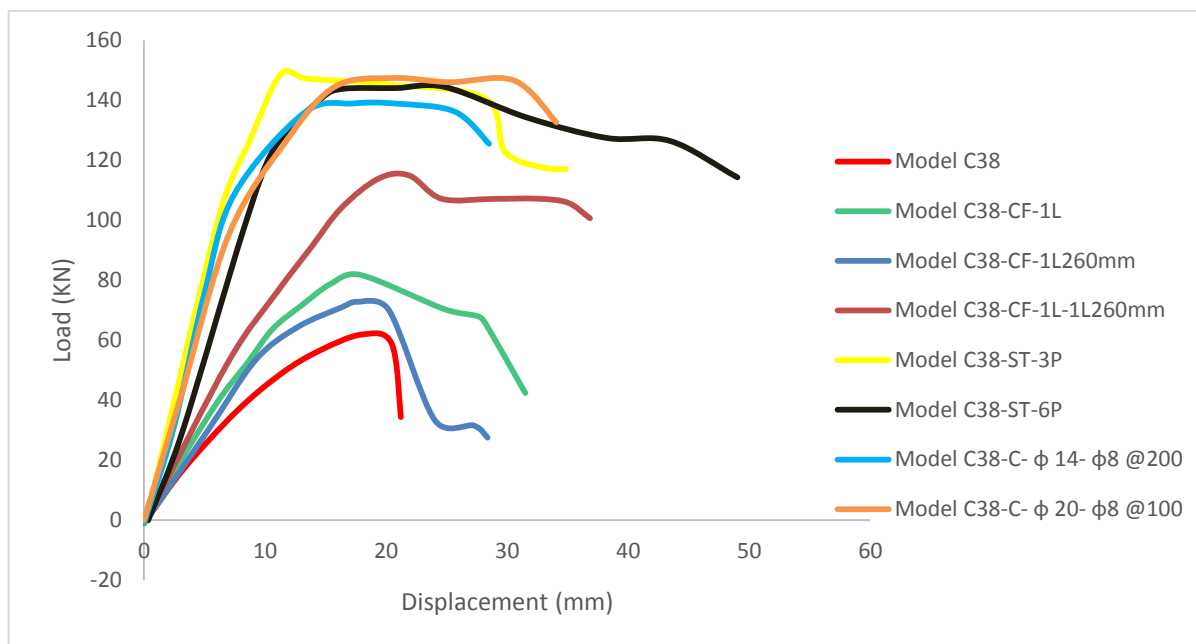
نام مدل	نوع تقویت	توضیحات
C38	-	نمونه بدون تقویت (ستون اصلی)
C38-CF-1L	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP سراسری
C38-CF-1L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C38-CF-2L	CFRP	مدل تقویت شده با دو لایه CFRP سراسری
C38-CF-2L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با دو لایه CFRP به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C38-CF-1L-1L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP سراسری و یک لایه به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C38-GF-1L	GFRP	مدل تقویت شده با یک لایه GFRP سراسری
C38-GF-2L	GFRP	مدل تقویت شده با دو لایه GFRP سراسری
C38-ST-3P	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با سه ورق در هر طرف ستون
C38-ST-6PLat12PLong	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با دوازده ورق در راستای بارگذاری چرخه ای و شش ورق در جهت عمود
C38-ST-6P	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با شش ورق در هر طرف ستون
C38-ST-12PLat6PLong	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با شش ورق در راستای بارگذاری چرخه ای و دوازده ورق در جهت عمود
C38-ST-1L	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با پوشش سراسری فولادی
C38-C-φ14-φ8@200	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ8 @ 200 mm
C38-C-φ14-φ8@100	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ8 @ 100 mm
C38-C-φ14-φ10@200	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ10 @ 200 mm
C38-C-φ20-φ8@100	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۲۰ و تنگ φ8 @ 100 mm

جدول ۲-۵- مدل‌های در نظر گرفته شده برای بتن با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال

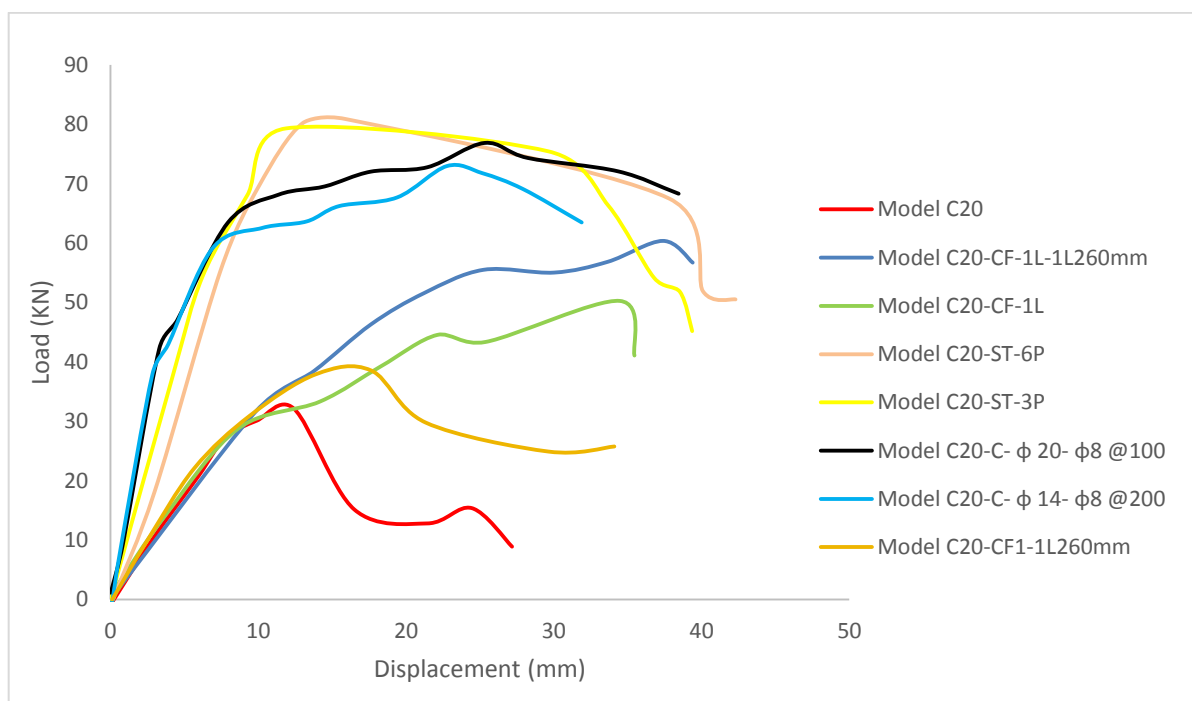
نام مدل	نوع تقویت	توضیحات
C20	-	نمونه بدون تقویت (ستون اصلی)
C20-CF-1L	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP سراسری
C20-CF-1L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C20-CF-2L	CFRP	مدل تقویت شده با دو لایه CFRP سراسری
C20-CF-2L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با دو لایه CFRP به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C20-CF-1L-1L260mm	CFRP	مدل تقویت شده با یک لایه CFRP سراسری و یک لایه به طول ۲۶۰ میلی متر در دو انتها
C20-GF-1L	GFRP	مدل تقویت شده با یک لایه GFRP سراسری
C20-GF-2L	GFRP	مدل تقویت شده با دو لایه GFRP سراسری
C20-ST-3P	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با سه ورق در هر طرف ستون
C20-ST-6PLat12PLong	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با دوازده ورق در راستای بارگذاری چرخه ای و شش ورق در جهت عمود
C20-ST-6P	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با شش ورق در هر طرف ستون
C20-ST-12PLat6PLong	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با شش ورق در راستای بارگذاری چرخه ای و دوازده ورق در جهت عمود
C20-ST-1L	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با پوشش سراسری فولادی
C20-C-φ14-φ8 @ 200	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ8 @ 200 mm
C20-C-φ14-φ8 @ 100	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ8 @ 100 mm
C20-C-φ14-φ10 @ 200	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ φ10 @ 200 mm
C20-C-φ20-φ8 @ 100	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۲۰ و تنگ φ8 @ 100 mm

#### ۴. نتایج تحلیل‌های انجام شده

پس از تحلیل مدل‌ها و بدست آوردن میزان جذب انرژی و پوش نمودارهای هیستریزیس را برای هر نمونه به صورت مجزا به دست آورده و همچنین برای مقایسه بهتر و با توجه به اینکه در کنارهم قرار گرفتن پوش نمودارهای هیستریزیس می‌تواند به درک بهتر از نتایج کمک کند لذا مطابق شکل ۱۵ و ۱۶ در یک نمودار ترسیم شده اند.



شکل ۱۵- پوشش نمودارهای هیستریزیس مدل‌ها گروه C38



شکل ۱۶- پوشش نمودارهای هیستریزیس گروه C20

برای هر مدل میزان حداکثر برش تحمل شده، حداکثر جابجایی که در واقع معیاری از شکل‌پذیری می‌باشد و جذب انرژی در پایان بارگذاری را بدست آوریم. به منظور مقایسه بهتر نمونه‌ها، نتایج حاصل از مدلسازی‌ها با نمونه‌های تقویت نشده مقایسه شد و خلاصه آن در جدول ۱-۶ و ۲-۶ آورده شده است. همانطور که در این جداول ملاحظه می‌شود، مقادیر بهبود در تحمل حداکثر برش، بهبود در تحمل حداکثر جابجایی و بهبود در جذب انرژی برای نمونه‌های تقویت شده، آورده شده است. لازم به ذکر است کلیه این مقادیر نسبت به نمونه‌های تقویت نشده یا مرجع سنجیده شده‌اند.

جدول ۱-۶- میزان بهبود در عملکرد مدلسازی گروه C38

مدل	بهبود در تحمل حداکثر برش	بهبود در تحمل حداکثر جابجایی	بهبود در جذب انرژی
C38-CF-1L	٪۷/۳۶	٪۹/۴۰	٪۸/۱۳۷
C38-CF-1L260mm	٪۳/۲۳	٪۳/۲۷	٪۹/۱۱۱
C38-CF-2L	٪۶/۱۲۶	٪۶/۱۱۳	٪۲/۲۱۴
C38-CF-2L260mm	٪۶/۲۶	٪۳/۲۷	٪۶/۱۱۶
C38-CF-1L-1L260mm	٪۶/۹۱	٪۲/۶۸	٪۹/۱۸۰
C38-GF-1L	٪۰/۲۰	٪۰/۵۰	٪۸/۱۱۷
C38-GF-2L	٪۶۷/۳۶	٪۲/۷۷	٪۸/۱۴۲
C38-ST-3P	٪۶/۱۴۱	٪۶/۶۳	٪۹/۲۳۰
C38-ST-6PLat12PLong	٪۳/۱۴۳	٪۳۶/۸۶	٪۱/۲۳۸
C38-ST-6P	٪۳/۱۴۳	٪۶/۱۱۳	٪۷/۲۵۴
C38-ST-12PLat6PLong	٪۶/۱۴۱	٪۱/۱۰۹	٪۲/۲۴۵
C38-ST-1L	٪۳/۱۳۸	٪۱/۱۰۹	٪۵/۲۲۸
C38-C- $\phi$ 14- $\phi$ 8 @200	٪۳/۱۲۸	٪۲/۲۷	٪۵/۱۵۹
C38-C- $\phi$ 14- $\phi$ 8 @100	٪۶/۱۴۶	٪۰/۵۰	٪۸۱/۱۷۳
C38-C- $\phi$ 14- $\phi$ 10 @200	٪۰/۱۳۰	٪۸/۳۱	٪۹/۱۶۱
@100 C38-C- $\phi$ 20- $\phi$ 8	٪۳/۱۴۸	٪۰/۵۰	٪۱/۱۷۶

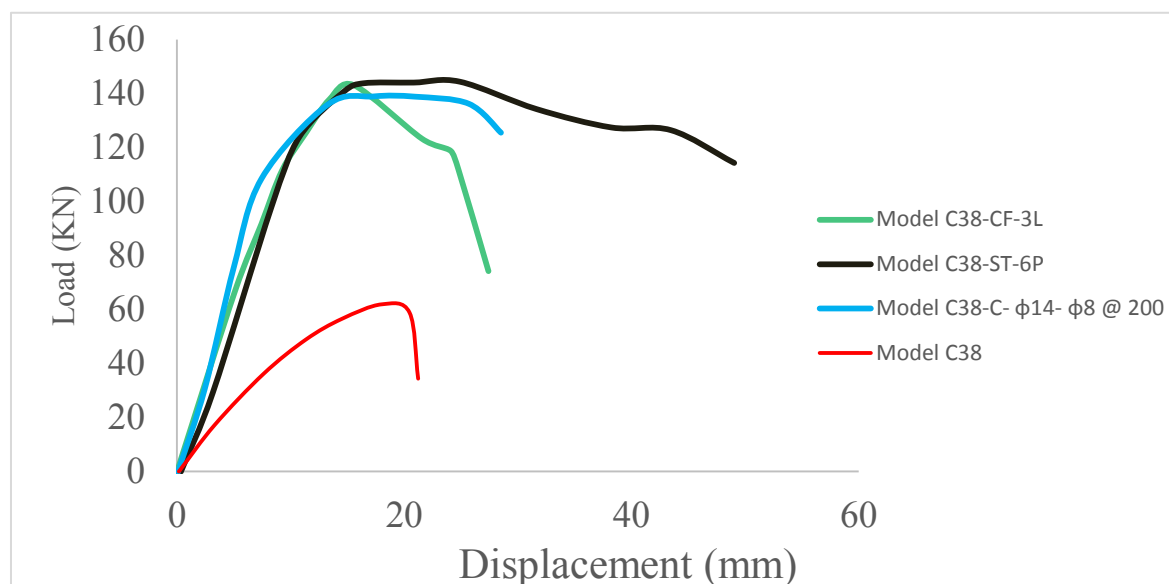
جدول ۲- نتایج حاصل از مدلسازی نمونه‌های گروه C20

مدل	بهبود در تحمل حداکثر برش	بهبود در تحمل حداکثر جابجایی	بهبود در جذب انرژی
C20-CF-1L	٪۰/۵۰	٪۰/۲۵	٪۴/۱۰۶
C20-CF-1L260mm	٪۷/۱۴	٪۸/۱۷	٪۵/۶۴
C20-CF-2L	٪۱/۹۷	٪۶/۵۳	٪۸/۲۲۵
C20-CF-2L260mm	٪۶/۱۷	٪۴/۲۱	٪۷/۶۷
C20-CF-1L-1L260mm	٪۴/۷۹	٪۸/۴۲	٪۶/۱۸۰
C20-GF-1L	٪۶/۱۷	٪۷/۳۵	٪۴/۷۷
C20-GF-2L	٪۸/۵۸	٪۴/۴۶	٪۵/۱۳۵
C20-ST-3P	٪۵/۱۲۳	٪۱/۳۲	٪۹/۲۱۲
C20-ST-6PLat12PLong	٪۳/۱۳۲	٪۰/۵۰	٪۳/۲۱۹
C20-ST-6P	٪۳/۱۳۵	٪۱/۵۷	٪۵/۲۳۵
C20-ST-12PLat6PLong	٪۴/۱۲۹	٪۵۷/۵۳	٪۶/۲۲۲
C20-ST-1L	٪۳/۱۳۲	٪۴/۴۶	٪۳/۲۱۹
$\phi$ 14- $\phi$ 8 @ 200 C20-C-	٪۸/۱۰۸	٪۷/۱۰	٪۵۸/۱۲۲
$\phi$ 14- $\phi$ 8 @ 100 C20-C-	٪۵/۱۲۶	٪۱/۳۲	٪۶/۱۲۲
$\phi$ 14- $\phi$ 10 @ 200 C20-C-	٪۷/۱۱۱	٪۸/۱۷	٪۲/۱۴۵
$\phi$ 20- $\phi$ 8 @ 100 C20-C-	٪۳/۱۳۲	٪۱/۳۲	٪۵/۱۶۴

با توجه به نمودار شکل ۱۷ پوش نمودارهای هیستریزیس مدل های  $C38-ST-6P$  (مدل تقویت شده با ژاکت فولادی شش ورق در هر طرف ستون) و  $C38-C-\phi14-\phi8 @200$  (مدل تقویت شده با ژاکت بتنی با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ  $\phi8 @ 200 \text{ mm}$ ) و  $C38-CF-3L$  (مدل تقویت شده با سه لایه  $CFRP$  سراسری) دارای یک ظرفیت باربری جانبی هستند، به این صورت که متغیرهای هر یک از سه نوع مقاوم سازی به نحوی تغییر داده شده است که هر سه ستون دارای ظرفیت باربری جانبی یکسانی برای مقایسه شوند. ستون بتنی برای تحمل بار افقی لرزه ای ۱۳۵ کیلونیوتن با اعمال تغییر مکان ۱۴ میلیمتر در انتهای ستون نیاز دارد که یا با ۶ ورق ژاکت فولادی با ابعاد مشخص شده در هر طرف ستون تقویت شود یا با ژاکت بتنی با ابعاد داخلی  $250 * 250$  میلی متر و ابعاد خارجی  $400 * 400$  میلی متر و میلگرد ۱۴ و تنگ  $\phi8 @ 200 \text{ mm}$  یا با سه لایه  $CFRP$  سراسری تقویت شود. همان طور که از شکل ۱۷ مشخص است نمونه ژاکت فولادی و ژاکت بتنی شکل پذیری بهتری نسبت به نمونه مقاوم سازی شده با  $FRP$  دارد. همچنین نمونه مقاوم سازی شده با ژاکت فولادی بیشترین جذب انرژی را دارد. نمونه مقاوم سازی شده با  $FRP$  بعد از رسیدن به ماکزیمم ظرفیت باربری افت نگرانی در ظرفیت باربری دارد. بسته به نوع نیاز و فاکتور هایی از جمله هزینه، بهبود در بیشینه برش و شکل پذیری و جذب انرژی و... روش تقویت مناسب انتخاب میگردد.

جدول ۷- سه نمونه با ظرفیت باربری جانبی یکسان

نام مدل	نوع تقویت	توضیحات
C38-ST-6P	ژاکت فولادی	مدل تقویت شده با شش ورق در هر طرف ستون
$\phi14-\phi8 @ 200-C-3AC$	ژاکت بتنی	مدل تقویت شده با مقطع با میلگرد ۱۴ و تنگ $\phi8 @ 200 \text{ mm}$
L3C38-CF-	CFRP	مدل تقویت شده با سه لایه $CFRP$ سراسری



شکل ۱۷- پوش نمودارهای هیستریزیس ۳ نمونه از هر سه روش مقاوم سازی با ظرفیت باربری جانبی یکسان



## ۵. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعه‌ی حاضر:

۱- در حالت کلی نمونه‌های تقویت شده با ژاکت فولادی، هم بهبود در بیشینه برش داشته‌اند و هم شکل‌پذیری مناسبی را از خود نشان داده‌اند. نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP، عمدتاً باعث بهبود در شکل‌پذیری شده‌اند و تقویت با استفاده از ژاکت‌های بتنی که جزء روش‌های کلاسیک مقاوم‌سازی نیز می‌باشد، باعث افزایش قابل ملاحظه در تحمل برش و بهبود کم در شکل‌پذیری شده است.

۲- در مورد بهبود در سختی الاستیک، در حالت کلی نمونه‌های تقویت شده با ژاکت فولادی و ژاکت بتنی نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP عملکرد بهتری داشته‌اند.

۳- با مقایسه کلی نمونه‌های گروه C38 و C20 می‌توان نتیجه گرفت مقاوم سازی انجام شده برای بتن با مقاومت بالاتر در حالت کلی جواب‌های بهتری را داشته است. در واقع اینطور می‌توان تفسیر کرد که در نمونه‌های با بتن مقاوم بالاتر، مقاوم‌سازی ستون باعث می‌شود از حداکثر ظرفیت بتن استفاده شود.

۴- با مقایسه‌ی نمونه‌های تقویت شده با CFRP و GFRP، می‌توان نتیجه‌گیری کرد نمونه‌های تقویت شده با CFRP مقاومت نهایی بیشتری را نسبت به نمونه‌های تقویت شده با GFRP نشان داده‌اند.

۵- بیشترین بهبود در تحمل حداکثر برش، مربوط به نمونه‌ی C38-C- $\phi 20$ - $\phi 8@100$  تقویت شده با ژاکت بتنی هست که به میزان ۱۴۸٪ بهبود داشته است. همچنین نمونه‌هایی که بیشترین بهبود را در تحمل جابجایی بیشینه را داشته‌اند، مربوط به نمونه‌های C38-CF-2L (نمونه‌ی تقویت شده با دو لایه FRP سراسری) و C38-ST-6P (نمونه‌ی تقویت شده با ژاکت فولادی با توزیع ورق‌های بیشتر در هر وجه) به میزان ۱۱۳٪ می‌باشد. نمونه‌ای که بیشترین جذب انرژی را داشته است، نمونه‌ی C38-ST-6P می‌باشد که با ژاکت فولادی تقویت شده است و نسبت به نمونه‌ی تقویت نشده ۲٪ بهبود در جذب انرژی داشته است. به لحاظ بهبود در سختی الاستیک، نمونه‌ی C38-CF-2L کمترین افزایش و نمونه‌ی C38-GF-1L بیشترین افزایش در سختی الاستیک را نشان می‌دهد.

۶- در بین نمونه‌های تقویت شده با ژاکت فولادی، نمونه‌ای که در آن ورقه‌های اتصال نبشی‌ها به تعداد بیشتری در طول ستون توزیع شده بود، نسبت به نمونه‌هایی که در آن از تعداد کمتر ورق اتصال استفاده شده بود، به دلیل ایجاد محصورشدگی بهتر، مقاومت و بخصوص شکل‌پذیری مناسب‌تری را نشان داد.

۷- در نمونه‌های تقویت شده با ژاکت بتنی، نمونه‌ای که در آن از تنگ با قطر کمتر و در فاصله‌ی طولی کمتر استفاده شد، نسبت به سایر نمونه‌ها رفتار بهتری به لحاظ مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی از خود نشان داد. در واقع می‌توان گفت کاهش فاصله‌ی تنگ‌ها از هم، بهبود رفتار نمونه را در بارهای چرخه‌ای به دنبال داشته است.

۸- اگرچه نمونه‌های تقویت شده با ژاکت بتنی بهبود قابل ملاحظه‌ای را در تحمل حداکثر برش داشته‌اند، لکن به دلیل تحمل بیشینه جابجایی کم و در نتیجه جذب انرژی کم، در برابر بارهای چرخه‌ای رفتار مناسبی از خود نشان نداده‌اند. در نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP، استفاده از ورق‌های FRP سراسری به جهت ایجاد یکپارچگی و محصوریت خارجی بهتر، نسبت به حالتی که فقط در دو انتها از ورق‌های FRP استفاده شود، ارجحیت دارد.

۹- در حالتی که متغیرهای سه روش مقاوم سازی با بار محوری ثابت را طوری تغییر دهیم که ظرفیت باربری جانبی یکسان داشته باشند. نمونه ژاکت فولادی و ژاکت بتنی شکل‌پذیری بهتری نسبت به نمونه مقاوم سازی شده با FRP نشان می‌دهند. همچنین نمونه مقاوم سازی شده با ژاکت فولادی بیشترین جذب انرژی را دارد و نمونه مقاوم سازی شده با FRP بعد از رسیدن به ماکزیمم ظرفیت باربری افت نگرانی در باربری دارد.

## ۶. قدردانی

از حمایت‌های قطب علمی سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شریف که در انجام این پروژه همکاری داشتند، قدردانی بعمل می‌آید.

- [1]. Katsumata, H., Kobatake, Y., & Takeda, T. (1988, August). A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns. In *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 517-522.
- [2]. Garzón-Roca, J., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Valente, I. B. (2012). Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. *Engineering Structures*, 40, 168-186.
- [3]. Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, 22(3), 264-276.
- [4]. Jankowiak, T., & Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), 53-69.
- [5]. Hosseini, A., Khaloo, A. R., & Fadaee, S. (2005). Seismic performance of high-strength concrete square columns confined with carbon fiber reinforced polymers (CFRPs). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3), 569-578.
- [6]. Chastre, C., & Silva, M. A. (2010). Monotonic axial behavior and modelling of RC circular columns confined with CFRP. *Engineering Structures*, 32(8), 2268-2277.
- [7]. Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, 22(3), 264-276.
- [8]. Kmiecik, P., & Kamiński, M. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(3), 623-636.
- [9]. Tahsiri, H., Sedehi, O., Khaloo, A., & Raisi, E. M. (2015). Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams. *Construction and Building Materials*, 95, 476-485.

# A Finite Element Study on Seismic Behavior of Various Concrete Column Retrofitting Methods

Atieh.daemi

M.Sc. Structural Engineering, Sharif University of Technology  
Atieh.daemi@gmail.com

Alireza khaloo

Distinguished Professor, Department Civil Engineering, Sharif University of Technology  
khaloo@sharif.edu

## Abstract

*In recent decades, concrete column retrofitting methods and their seismic behavior under cyclic loading, especially from ductility and energy absorption standpoints, have been extensively focused by researchers. Significant amount of this research has been allocated to confinement of concrete elements in order to advance the ductility and energy absorption capability of the concrete structures facing the forces induced by earthquake. In this study four methods of concrete column retrofitting methods, including FRP plates, steel jackets, and concrete jackets, have been assessed and thoroughly compared with each other in terms of seismic behavior advancement measurements.*

*To achieve this objective, different retrofitting methods were simulated in ABAQUS FEA software, based on prominent finite element analysis and numerical modeling. The modeling results were verified with equivalent experimental tests which further validates the accuracy of the modeling approach. In addition, the impact of the following variables were studied using sensitivity analysis on the replicated models: Core concrete strength, texture and number of layers of FRP plates, size and thickness of steel plates, and dimensions of concrete jacket, along with diameter and placing of stirrups and bars.*

*Strength, ductility, and energy absorption capacity of the simulated models were recorded in order to compare efficiency of each retrofitting method. Results have shown that retrofitting through FRP plates leads to increasing ductility. Retrofitting using concrete jackets, despite increasing the energy absorption capability and maximum shear strength, will not result in acceptable ductility. On the other hand steel jackets, along with improving a maximum shear strength and energy absorption ability of the element, shows promising improvement in ductility. Moreover, for the models with the same axial load and lateral load capacity, steel jacketing and concrete jacketing methods have proved to show better ductility, compared to FRP. Plus, steel jacketing resulted in the highest energy absorption capability among all the three methods under the aforementioned condition.*

**Keywords:** FRP, Steel Jacket, Concrete Jacket, Concrete Column Retrofitting, Finite Element Analysis