

# بهسازی لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح با نوارهای CFRP تحت بارهای رفت و برگشتی

محمد رضا آرم

استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای  
mharam@aeoi.org.ir

حسنا نوروزی‌گی

کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آل طه  
hosnacivil@gmail.com

چکیده:

در سالهای اخیر استفاده از مواد کامپوزیت در صنایع و رشته‌های مختلف توسعه یافته است. یکی از زمینه‌های جدید و پر کاربرد در مهندسی عمران، استفاده از مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف (*FRP*) به منظور تقویت و بهسازی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح توسط این مواد با هدف افزایش مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت خمشی صورت می‌گیرد.

در این مقاله، دو ستون مربعی شکل بتن مسلح محصور نشده و محصور شده با کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (*CFRP*) توسط نرم افزار اجزای محدود *ABAQUS* مدل سازی شده اند و تحت بار محوری ثابت و بار جانبی رفت و برگشتی قرار گرفته اند. به منظور بررسی صحت مدل سازی، نتایج حاصل از مدل سازی ها با نتایج بدست آمده از آزمایشهای تجربی و همچنین روابط آیین نامه ای مقایسه شده و تطابق بسیار خوب بین نتایج بدست آمده است.

مقاوم سازی ستون با نوارهای *FRP* تاثیر قابل توجهی در کاهش مقدار تغییر مکان ستون، در راستای جانبی و طولی در محل مفصل خمیری، به میزان ۵۰ درصد و افزایش ظرفیت خمشی مقطع تا ۵ برابر داشته است. همچنین بهسازی با این نوارها منجر به افزایش مقاومت فشاری ستون به میزان ۳۰ درصد و افزایش ظرفیت چرخشی در محل اتصالات تا ۶ برابر شده است.

مطابق با نتایج حاصله، تقویت ستون ها به این روش منجر به تغییر مود گسیختگی ستون از مود برشی زودرس به مود خمشی، کاهش تغییر مکان ستون در راستای طولی و جانبی در محل تشکیل مفصل خمیری، افزایش ظرفیت خمشی مقطع، افزایش شکل پذیری ستون، افزایش مقاومت فشاری و کرنش محوری ستون، افزایش ظرفیت چرخشی در محل اتصالات می‌گردد. همچنین بمنظور جلوگیری از مصرف غیر ضروری این مواد کامپوزیت توصیه می‌شود کاربرد آن در ناحیه مفصل پلاستیک ستون بهینه تر باشد.

کلمات کلیدی: بهسازی لرزه‌ای، *FRP*، محصور شدگی، ستون بتن مسلح، الیاف کربن، بار رفت و برگشتی.

## ۱. مقدمه

قرارگیری بتن تحت تنش های فشاری چند محوره باعث افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن می گردد که تنش های چند محوره به وسیله محصور کردن بتن توسط فولادهای عرضی، ورق های فولادی و یا کامپوزیت ها صورت می گیرد.

برای شناخت رفتار بتن تحت تنش های چند محوره، آزمایشهای زیادی انجام شده است. نخستین آزمایش در سال ۱۹۲۸ توسط ریچارت انجام گرفت [۱۳]. در این آزمایش فشارهای جانبی یکنواخت با مقادیر مختلف توسط سیال (فشار فعال) و دورپیچ های فولادی (فشار غیر فعال) به بتن وارد می شد. در سال ۱۹۸۲ فردیس و خلیلی با ایجاد محصورکنندگی توسط فایبر گلاس (الیاف شیشه) و انجام آزمایشهای مختلف روی نمونه ها مدلی برای منحنی تنش- کرنش بتن ارائه کردند که بر مبنای مدل ریچارت بود [۳]. در سال ۱۹۸۸، ماندر رابطه ای برای محصور شدگی توسط فولاد ارائه نمود که مبنای بسیاری از مدل های ارائه شده برای منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده توسط کامپوزیت ها می باشد [۱۱]. رابطه ارائه شده توسط ماندر و همکارانش اولین رابطه ای بود که برای مقاطع دایروی و مستطیلی قابل کاربرد بود که جهت هرچه دقیق تر نمودن این مدل برای محصورشدگی توسط کامپوزیت ها محققین سعی کردند روابط جدیدی را ارائه کنند [۱۲، ۱۵ و ۱۶].

هدف از اعمال روش تحلیل لرزه ای غیر ارتجاعی، پیش بینی واقعی رفتار سازه در برابر حرکات زلزله های آتی می باشد. همچنین گسترش روش عملکردی در بهسازی ساختمان های موجود و طراحی ساختمان های جدید سبب شده تا طراح جهت تشخیص سطح عملکردی از میزان آسیب به اجزاء سازه ای و غیر سازه ای اطلاع داشته باشد. آسیب عموماً ناشی از تجاوز تغییر شکل ها از مقادیر ظرفیت بوده و لذا کاربرد یک روش جایجایی با استفاده از فرآیند تحلیل غیر ارتجاعی می تواند برآورد دقیق تری از آن باشد.

بر این اساس در این مقاله، یک مدل سه بعدی از ستون مورد نظر توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS تهیه گردیده و سپس با اعمال بار محوری و تغییر مکان جانبی با دامنه بارگذاری رفت و برگشتی، به بررسی رفتار ستون پرداخته شده است [۵]. نرم افزار ABAQUS قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدلسازی غیر خطی را دارا می باشد. این نرم افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده ای است که هر نوع هندسه ای را می توان توسط این المان ها مدل کرد [۲]. از آنجا که در یک ستون تحت تغییر مکان جانبی، مفصل پلاستیک در پای ستون تشکیل می گردد، بنابراین در این ناحیه تاثیر محصور شدگی ستون بتنی با نوارهای CFRP بر رفتار ستون از جمله ظرفیت خمشی و چرخشی مقطع، مود گسیختگی، تغییر مکان در راستای طولی و جانبی، مقاومت برشی ستون، مقاومت فشاری محوری ستون و کرنش پلاستیک ایجاد شده در ستون بررسی شده است.

## ۲. مفهوم محصور شدگی

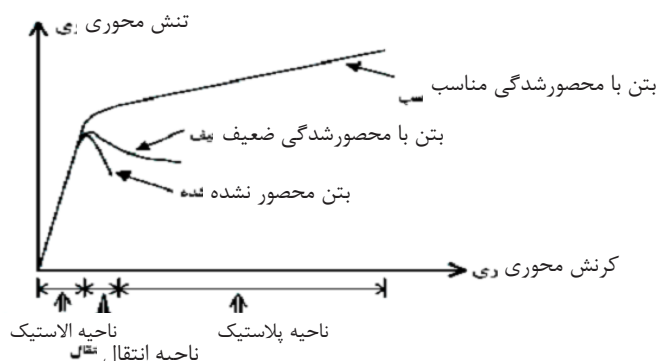
محصور شدگی جلوگیری از انبساط شعاعی بتن به وسیله اعمال فشار جانبی می باشد. در عمل این فشار حاصل عکس العمل اعضای محصور کننده ی عضو مورد نظر در اثر تمایل به افزایش تغییر شکل جانبی به علت اعمال کرنش محوری در عضو می باشد.

بتن در کشش به وسیله ترک های درون صفحه ای گسیخته شده و در فشار در جهت موازات امتداد نیرو ترک خورده و متلاشی می شود. بر خلاف رفتار غیر همسان بتن به جهت این ترک های درون صفحه ای، معمولاً بتن ماده ای همسان فرض می شود و برای ساده سازی مدل های رفتاری، ضریب پواسون ثابت فرض می شود. اگر در یک عضو بتنی تحت فشار، در جهت عمود بر ترک هایی که در ناحیه فشاری ایجاد می شوند، نیرویی وارد گردد، منجر به محدود شدن توسعه ترکها و افزایش مقاومت مقطع می گردد [۱۰].

### ۳. منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده به وسیله ی FRP

در تحقیقاتی که به منظور شناخت رفتار اعضای سازه ای صورت می گیرد، بیشتر توجهات روی اصول و مبانی سازه ای می باشد. به همین دلیل بخش بزرگی از کارهای تحقیقاتی انجام شده روی رفتار نمونه های کوچک بتن ساده تقویت شده به وسیله الیاف پلیمری تحت بارهای محوری می باشد.

در شکل (۱) منحنی های تنش - کرنش محوری بتن محصور شده توسط الیاف پلیمری در مقایسه با بتن ساده ی محصور نشده نشان داده شده است. منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده غیر فعال (قبل از شروع بارگذاری هیچگونه فشار جانبی به بتن وارد نمی شود) اساساً شامل دو بخش است، بخش اول منحنی مربوط به قسمت خطی و بخش دوم مربوط به منطقه پلاستیک می باشد. شیب قسمت خطی منحنی مشابه شیب قسمت خطی بتن محصور نشده می باشد.



شکل (۱): منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده غیر فعال بوسیله الیاف پلیمری [۳]

نوع پوشش محصور کننده بتن اثر کمتری روی بخش خطی منحنی داشته؛ به جز اینکه پوششهای سخت تر تمایل به افزایش مختصر تنش و کرنش در نقطه انتقال منحنی ها و شیب بیشتر ناحیه خمیری دارند. دلیل اینکه منحنی های تنش - کرنش بتن محصور شده و محصور نشده در منطقه ی خطی شبیه به یکدیگر می باشند این است که بتن در بارهای کم، انبساط جانبی کمتری داشته و در نتیجه پوشش محصور کننده فعال نمی شود. ناحیه خمیری بلافاصله پس از مقاومت حداکثر بتن محصور نشده تشکیل می شود. در این نقطه به علت رشد سریع کرنش های جانبی بتن و انبساط حجمی آن پوشش فعال می شود. در ناحیه ی پلاستیک با افزایش جزئی در تنش محوری، افزایش زیاد در انبساط جانبی مشاهده می شود که این انبساط به دلیل گسترش ترک ها و تخریب ساختار درونی بتن بوده و باعث افزایش فشار محصورکنندگی پوشش می باشد.

اگر بتن خوب محصور شده باشد شیب ناحیه ی خمیری مثبت و کاملاً خطی خواهد بود، که دلالت بر این دارد که فشار محصورکنندگی برای مهار اثرات انبساط جانبی بتن ناشی از رشد خرابی در آن مناسب بوده و ظرفیت باربری بیشتری را ایجاد می کند. اگر بتن خوب محصور نشده باشد، تنش محوری حداکثر، شبیه به حالت محصور نشده خواهد بود که دلالت بر ناکافی بودن فشار محصور شدگی برای شروع اثرات خرابی بتن که کرنش های بزرگتری را تحمل می کنند، دارد [۳].

### ۴. شکل پذیری و ضرورت افزایش آن در ستون های بتن آرمه

هرسازه ی پایدار یا مقاوم در برابر زلزله باید هم به صورت کلی و یک مجموعه ی کامل شکل پذیر باشد و هم اعضای آن به تفکیک شکل پذیر باشند. شکل پذیری هر عضو یعنی اینکه اولاً قادر باشد به قدر کافی تغییر شکل های غیر ارتجاعی نسبتاً زیادی را تحمل کند بدون اینکه مقاومتش به طور چشمگیری کاسته شود و ثانیاً قادر باشد

مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله را از طریق رفتار هیستریزیس (چرخه های رفتاری) پایدار، جذب و مستهلک نماید [۱۴].

امکان ایجاد نواحی مفصل پلاستیک در ستون های بتنی محصور شده برای جلوگیری از شکست های نامطلوب و اطمینان از ایجاد رفتار غیر الاستیک (شکل پذیر) در هنگام وقوع زلزله، مستلزم وجود تمهیداتی جهت محدود نمودن انبساط شعاعی بتن و نیل به رفتاری شکل پذیر در هنگام بروز تغییر شکل های جانبی زیاد می باشد [۹].

بر اساس آیین نامه های آبا و ACI، نسبت حجمی میلگردهای عرضی ( $\rho_s$ ) از رابطه ی (۱) تعیین می گردد که نباید از مقدار ارائه شده در رابطه (۲) کمتر باشد. این روابط برای بتن با مقاومت استوانه ای  $f'_c$  و میلگردهای باحد تسلیم  $f_{yh}$  در یک مقطع ستون با مساحت کلی  $A_g$  و مساحت هسته  $A_c$  استفاده می شوند. لازم به ذکر است که چنین روابطی هیچ یک از اثرات حرکت های متناوب و سیکلی حاصل از فعالیت های زمین لرزه ای را به حساب نمی آورند [۶].

$$\rho_s \geq 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (1)$$

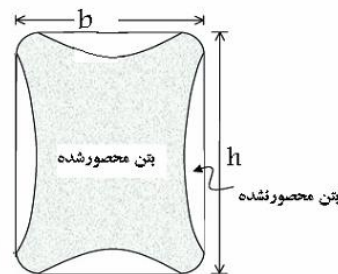
$$\rho_s \geq 0.12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (2)$$

به طور کلی یکی از راه های زایل نمودن انرژی مخرب حاصل از حرکات لرزه ای زمین قبل از اینکه سبب ایجاد یک مکانیزم شکست بحرانی در سازه گردد، افزایش شکل پذیری ستون های بتنی است؛ لذا ایجاد رفتاری شکل پذیر در ستون با استفاده از محصور نمودن بتن، حقیقتی غیر قابل انکار می باشد.

#### ۵. ساز و کار محصور شدگی ستون های مستطیلی توسط کامپوزیت FRP [۱]

هنگامی که ستون های محصور شده با FRP تحت نیروی محوری فشاری قرار می گیرند بتن در جهت عرضی منبسط می شود که در این انبساط، بتن توسط مواد FRP محصور می گردد. اثر محصور سازی ستون های بتنی مستطیلی توسط FRP کمتر از ستون های دایره ای می باشد. به این دلیل که فشار محصور شدگی در این ستون ها برخلاف ستون های دایره ای یکنواخت نیست و فقط قسمتی از سطح ستون توسط این مواد به طور موثر محصور می گردد. در ستون های مستطیلی به منظور کاهش تمرکز تنش در گوشه های مقطع، از روش گرد کردن گوشه ها قبل از نصب FRP استفاده می گردد.

در شکل (۲) مقطع مستطیلی با عرض  $b$  و عمق  $h$  و همچنین با فرض  $h \leq b$  نشان داده شده است و گوشه های این مقطع به شعاع  $R_c$  گرد شده است.



شکل (۲): سطح مقطع موثر محصور شده در ستون های بتنی با مقطع مستطیلی [۱]

در شکل فوق سطح مقطع ستون مستطیلی به وسیله ی چهار سهمی درجه دو به نواحی مختلفی تقسیم شده است و فقط ناحیه ی بین چهار سهمی، محصور شده فرض می گردد. زاویه برخورد سهمی ها با گوشه های مقطع ۴۵ درجه می باشد. فشار موثر محصور شدگی برای کل مقطع بر اساس رابطه (۳) بدست می آید:

$$f_l K_s = f_l \quad (3)$$

که در آن:

$f_l$ : فشار موثر محصور شدگی

$K_s$ : ضریب شکل

$f_l$ : فشار محصور شدگی ناشی از FRP برای مقطع دایره ای معادل با قطر  $D$  می باشد.

فشار محصور شدگی ناشی از FRP برای مقطع دایره ای معادل با قطر  $D$  از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$f_l' = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{D} \quad (4)$$

که در آن:

$f_{frp}$ : تنش در FRP

$t_{frp}$ : ضخامت FRP

مقدار ضریب شکل ( $K_s$ ) به صورت نسبت مساحت موثر محصورشدگی ( $A_e$ ) به سطح مقطع کلی بتن محصور شده با FRP تعریف می گردد که به صورت رابطه ی (۵) می باشد:

$$K_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - [(b - 2R_c)^2 + (h - 2R_c)^2] / (3A_g) - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $A_g$  سطح مقطع ستون می باشد که از رابطه ی (۶) محاسبه می گردد و  $\rho_{sc}$  بیانگر نسبت مساحت میلگردهای طولی به مساحت مقطع است.

$$A_g = bh - (4 - \pi)R_c^2 \quad (6)$$

جهت بدست آوردن قطر دایره معادل برای مقطع مستطیلی، از میانگین ابعاد ستون یعنی  $\frac{b+h}{2}$  استفاده می گردد.

## ۶. معرفی مدلسازی پیشنهادی ستون های بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP

### ۶-۱. مطالعات آزمایشگاهی

در مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط آرم و نصرالله زاده [۱]، مواد FRP به منظور بهسازی لرزه ای ستونهای بتن آرمه بکار برده شده است که محصورسازی مقطع نه در تمام ارتفاع بلکه در ناحیه مفصل پلاستیک انجام شده است. در این مطالعه، ۱۴ نمونه ستون بتنی با شرایط میلگردگذاری طولی و عرضی یکسان ساخته شد. نمونه ها در مقیاس ۱/۲ بوده و برای نمونه های بار محوری کم، مود غالب گسیختگی از نوع برشی و ترد می باشد. بنابراین هدف از بهسازی ستون ها افزایش شکل پذیری و احیانا (در مواردی که مود برشی است) تغییر مود برشی به نوع خمشی است.

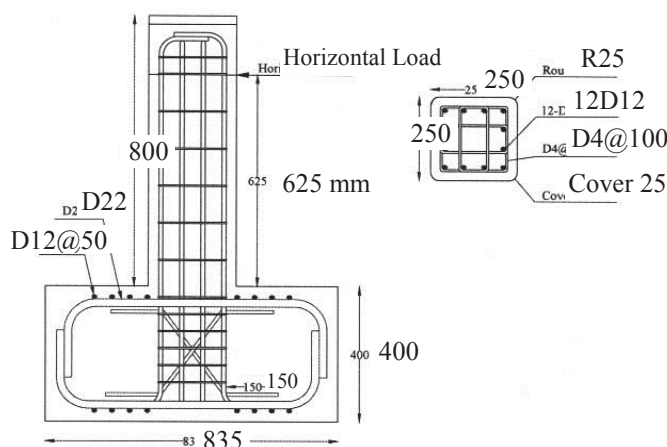
در این مقاله از نتایج آزمایش دو ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP از این مطالعه آزمایشگاهی به نام های R04M1-0 و R04M1-C/0 استفاده شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.

ابعاد مقطع این ستون ها  $250 \times 250$  میلیمتر و ارتفاع آنها برابر  $800$  میلیمتر در نظر گرفته شده است. میلگردهای طولی به تعداد ۱۲ عدد و به صورت یکنواخت در پیرامون مقطع توزیع شده اند. قطر میلگردهای طولی  $12$  میلیمتر با تنش جاری شدن  $f_y = 381$  MPa در نظر گرفته شده است. خاموت ها نیز به قطر  $4$  میلیمتر و در فواصل  $10$  سانتیمتری در طول ستون قرار گرفته اند. مدول الاستیسیته مصالح فولادی  $E_s = 210$  GPa و ضریب پواسون این مصالح  $\nu_s = 0/3$  در نظر گرفته شده است.

مصالح FRP مورد استفاده از نوع کربنی و با لایه بندی به صورت لایه (lamina) اورتوتروپیک با مدول الاستیسیته  $E_1 = 240$  GPa،  $E_2 = 15/79$  GPa، ضریب پواسون  $\nu_{12} = 0/3$  و مدول برشی  $G_{13} = G_{23} = 5/5$  GPa در نظر گرفته شده است. جهت تقویت ستون از  $5$  نوار دو لایه FRP که ضخامت هر لایه  $0/176$  میلیمتر می باشد در قسمت پایین ستون استفاده شده است. سایر خصوصیات مواد FRP مورد استفاده بر اساس مشخصات ارائه شده در مرجع [۱] می باشد.

مطابق با مرجع [۱] مقاومت فشاری بتن برابر  $f_c = 18 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته بتن نیز برابر  $E_c = 2.01 \times 10^4 \text{ MPa}$  می باشد. ضریب پواسون بتن نیز بین  $0.1$  تا  $0.2$  متغییر است که در این مدل ها  $\nu_c = 0.15$  در نظر گرفته شده است.

نمونه ستون ها تحت اثر بار محوری ثابت و بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش واقع شده اند. نیروی محوری ثابت ستون مقدار  $N = 0.2 \times A_g \times f_c$  در نظر گرفته شده است. اعمال بار جانبی با استفاده از دو جک در طرفین نمونه صورت پذیرفته و برنامه بارگذاری به صورت ۳ سیکل رفت و برگشت کامل در هر مقدار متناظر با نسبت تغییر مکان ستون (یعنی تغییر شکل جانبی ستون تقسیم بر ارتفاع ستون که با R نشان داده خواهد شد) برای  $0.3\%$  و  $0.25\%$  و  $0.2\%$  و  $0.15\%$  و  $0.1\%$  و  $0.05\%$  بوده است. نسبت تغییر مکانهای بالاتر گام افزایش  $0.1\%$  و در هر مقدار متناظر با نسبت تغییر مکان  $0.1$  سیکل کامل رفت و برگشت لحاظ شده است. بنابراین به ازای هر مقدار  $0.7\%$  و  $0.6\%$  و  $0.5\%$  و  $0.4\%$  (R) یک سیکل کامل رفت و برگشتی اعمال گردیده است. بدین ترتیب امکان بررسی عملکرد ستون در تغییر شکل های بالا و برآورد سطح خسارت متناظر با سطوح عملکردی پایین تر عضو فراهم می گردد.



شکل (۳): میلگردهای طولی و عرضی نمونه ها [۱]

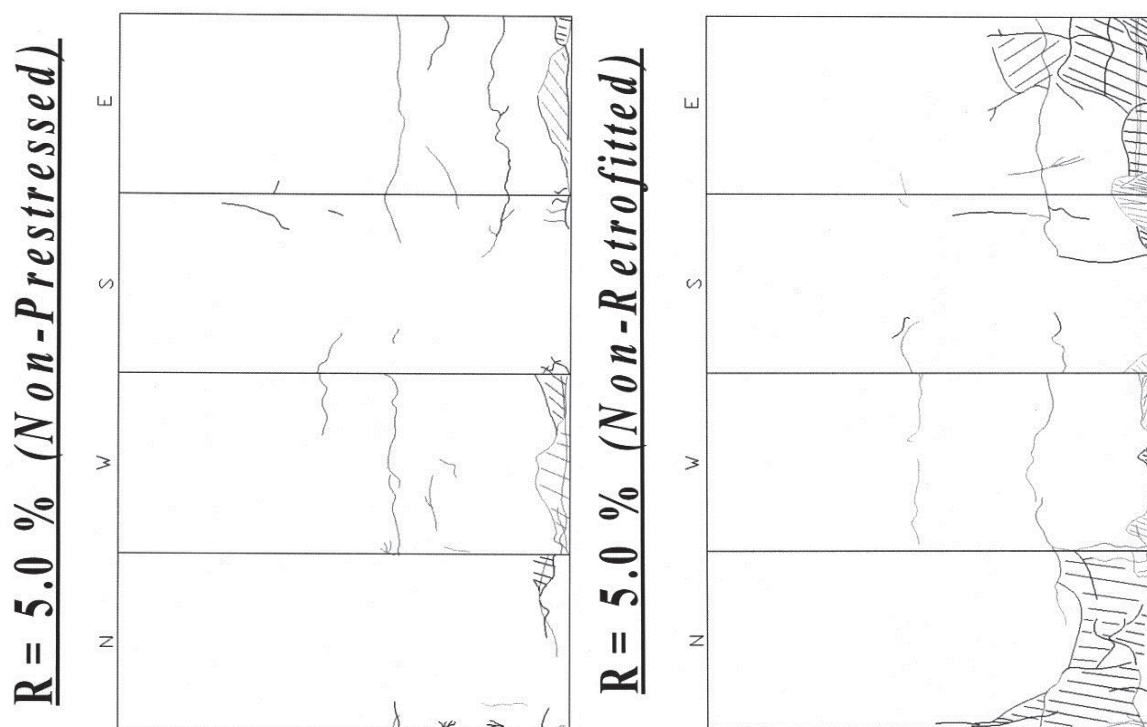
#### ۶-۱-۱. نتایج حاصل از آزمایش ستون R04M1-0 [۱]:

این ستون که بدون مقاوم سازی آزمایش شد، به دلیل توزیع کم میلگرد عرضی به ویژه در منطقه مفصل خمیری، به صورت برشی گسیخته شد و در نسبت تغییر مکانهای نسبتاً کم، مقاومت جانبی سریعاً افت کرد و رفتاری ترد مشاهده شد. در  $R = 0.05\%$  تقریباً ترکی مشاهده نشد. ولی ترک های قطری در نسبت تغییر مکانهای حدود  $R = 1\%$  شروع شدند. این ترک قطری در وجه شمالی و در حد فاصل تقریباً برابر با عمق مقطع از پایه ستون رخ داد که حکایت از رفتار برشی دارد. در  $R = 2.5\%$  بتن پوشش نزدیک پایه پوسته شد و ترک های قبلی عمیق تر شدند. ظرفیت جانبی این ستون در ادامه آزمایش به طور ناگهانی سقوط کرد و این زمانی بود که یکی از ترک های قطری در  $R = 3\%$  به مقدار زیادی باز شد. عرض این ترک در قسمت های میانی به حدود  $0.5$  سانتیمتر رسید. قسمت هایی از مقطع در گوشه ها دچار بیرون زدگی پوشش بتنی شدند. الگوی ترک ها تا پایان آزمایش و به ویژه در  $R = 3\%$  کاملاً مود غالب گسیختگی را از نوع ترد برشی تعریف می کند.

#### ۶-۱-۲. نتایج حاصل از آزمایش ستون R04M1-C/0 [۱]:

این ستون مشابه ستون قبلی بوده ولی در ناحیه مجاور با شالوده با استفاده از ۵ نوار کربنی (هر نوار با پهنای ۳ سانتیمتر) و با دو لایه در فواصل حدود  $7/5$  سانتیمتر بهسازی شد و مورد آزمایش قرار گرفت. شکل پذیری قابل توجه مهم ترین نتیجه بدست آمده از این ستون می باشد.

ترک های مشاهده شده در حین آزمایش به این صورت بوده است که در  $R = 1\%$  اولین ترک برشی در وجه شمالی ستون مشاهده شد هرچند که وجود نوارهای کربنی مانع گسترش و رشد این ترک گردید. در  $R = 3\%$  ترک های افقی به موازات امتداد نوارها در حد فاصل فونداسیون و اولین نوار ایجاد شد. به عبارت دیگر روش بهسازی از یک سو مانع گسترش ترک های برشی شد و از سوی دیگر امکان ظهور ترک های خمشی را فراهم ساخت. در نتیجه آزمایش تا  $R = 9\%$  که در آن یکی از نوارها گسیخته شد (به طور موضعی) ادامه یافت و افت مقاومت برشی ناچیز و یا به صورت تدریجی بود. بعد از این مرحله و در  $R = 10\%$ ، نوار دیگری پاره شد و میلگردهای طولی کمانه کردند. چراکه بتن پوششی میلگردها عملاً پوسته و کنده شده بود. نکته قابل اشاره آنکه اگرچه گوشه های مقطع گرد شده بود ولی گسیختگی موضعی نوارها در همین نقطه آغاز گردید. محل پارگی در گوشه ستون قابل پیش بینی بود. چرا که تمرکز تنش در گوشه های مقطع مستطیلی بیشتر است. پاره شدن نوارها و از دست رفتن پوشش بتنی منجر به افت شدید محصورسازی میلگردهای طولی گردید و کمانش آنها را باعث شد که البته کمبود میلگرد عرضی نیز این موضوع را تشدید می کرد. در این ستون به دلیل استفاده از ۵ نوار کربنی، مود برشی زودرس به مود خمشی تغییر یافت.



شکل (۴): مقایسه بین الگوی ترک ستونها [۱]

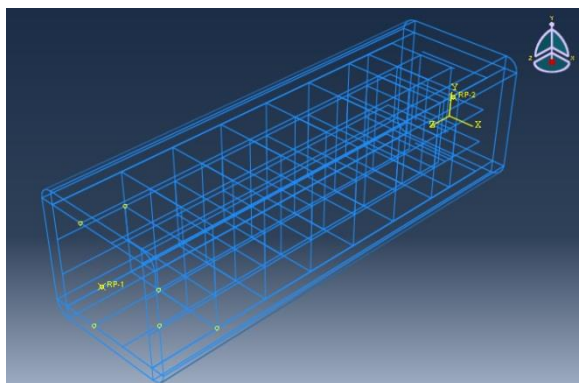
## ۲-۶. ساختار مدل سازی

با استفاده از نرم افزار ABAQUS، بتن توسط المان های حجمی ۸ گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته (C3D8R)، میلگردهای طولی و عرضی توسط المان های تیر سه بعدی با تابع شکل درجه یک (B31) و نوارهای FRP با المان های صفحه ای با تابع شکل درجه یک و انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) مدل شده اند [۵]. در ستون محصور نشده دوره تناوب بارگذاری ۴/۳۲ ثانیه و در ستون محصور شده با FRP این پارامتر ۵/۴ ثانیه می باشد.

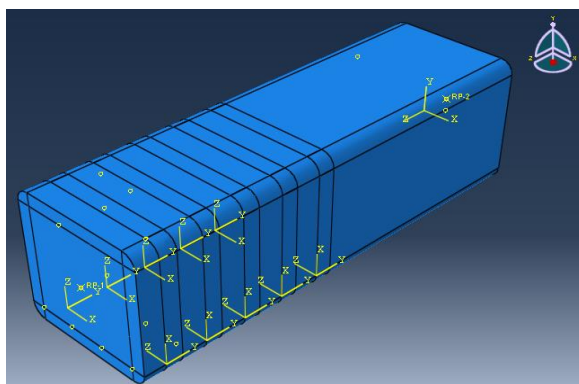
برای تعریف رفتار غیر خطی بتن از مدل ترکیبی پلاستیک خسارت بتن که پیچیده ترین و پرکاربرد ترین مدل رفتاری می باشد استفاده شده است. در این مدل رفتاری زاویه اتساع داخلی برای بتن بین ۲۰ درجه تا ۴۰ درجه (معمولا ۳۱ درجه) فرض می شود [۲].

جهت تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن غیر محصور از مدل Kent & Park استفاده می شود [۲]. جهت تعریف رفتار کششی مصالح از مدل های رفتاری استفاده نشده است و مطابق با مرجع [۲] مقدار مقاومت کششی بتن را می توان بین ۷ تا ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن در نظر گرفت که در مدلسازی پیشنهادی، این مقدار ۱۰ درصد مقاومت فشاری فرض شده است.

به منظور تعریف رفتار فشاری بتن محصور از مدل رفتاری مندر استفاده شده است [۱۱]. این مدل رفتاری، مقاومت فشاری بتن محصور را با استفاده از یک ضریب به مقاومت فشاری بتن غیر محصور مربوط می کند. رفتار کششی بتن محصور نیز مانند غیر محصور تعریف شده است و تغییری در خصوصیات آن ایجاد نمی شود. مدلسازی دو ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است. رفتار مصالح میلگردها و نوارهای FRP به صورت الاستیک مدلسازی شده است.



شکل (۵): ستون بتن مسلح محصور نشده (R04M1-0); نحوه ی چیدمان میلگردهای طولی و خاموت ها در مدل اجزای محدود



شکل (۶): ستون بتن مسلح محصور شده با CFRP (R04M1-C/0); محل قرارگیری نوارهای CFRP بر روی ستون

در مدلسازی جهت تعریف اندرکنش ها، دو نوع اندرکنش در مدل تعریف شده است که عبارتند از اندرکنش تماس بتنی و پوشش FRP و همچنین اندرکنش بین میلگردها و بتن اطراف. اندرکنش FRP و بتنی از نوع سطح به سطح تعریف شده و اتصال آنها به یکدیگر از نوع Tie یعنی کاملاً چسبانده می باشد. ستون بتنی به عنوان جزء اصلی (master) و پوشش FRP به عنوان عضو فرعی (slave) در نظر گرفته می شود. نوع تماس میلگردها و بتن از نوع محدوده جاسازی شده (embedded region) است که به مفهوم در بر گرفته شدن میلگردها توسط بتن می باشد.

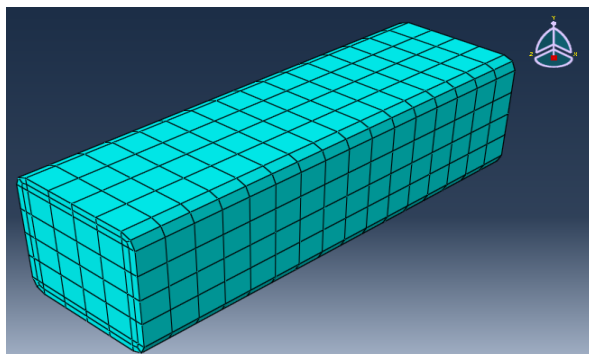


در مدلسازی پیشنهادی پس از تعریف ستون به صورت کاملاً گیردار، بارهای وارده شامل بار محوری ثابت و بار جانبی رفت و برگشتی معرفی شده اند. بار محوری ثابت مطابق با نام ستون ها در مرجع [۱] با نسبت ۰/۲ بوده که مقدار عددی آن به صورت زیر می باشد:

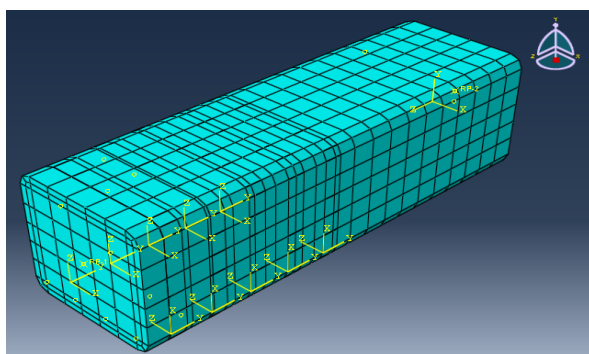
$$N = 0.2 \times A_g \times f_c = 223200 \text{ (نیوتن)}$$

با توجه به اینکه در بسیاری از مدلسازی ها سعی بر این است که تحریک از نوع تغییر مکان باشد تا نیرو، در مدلسازی پیشنهادی نیز بار جانبی رفت و برگشتی به صورت تغییر مکان افقی با دامنه بارگذاری چرخه ای در قسمت بالای ستون، تعریف شده است. به منظور اعمال تغییر مکان افقی مطابق با مرجع [۱]، حداکثر تغییر مکان افقی که متناظر با نسبت تغییر مکان ۱۲ درصد می باشد، در بالای ستون اعمال شد که این جابجایی نهایی با در نظر گرفتن ۲۷ سیکل برای نسبت تغییر مکانهای از ۰/۵ تا ۱۲ درصد در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از نسبت تغییر مکانهای ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱۵ و ۰/۱ و ۰/۰۵، سه سیکل رفت و برگشت کامل و برای هر کدام از نسبت تغییر مکانهای ۴ تا ۱۲ درصد یک سیکل رفت و برگشت کامل در نظر گرفته شد.

در شبیه سازی انجام شده نحوه شبکه بندی و ابعاد شبکه ها به گونه ای در نظر گرفته شد که به همگرایی جوابها کمک کند. ابعاد المان های ستون برابر ۴۰ میلیمتر و ابعاد المان های سایر قسمت های مدل شامل میلگردهای طولی و عرضی و همچنین نوارهای FRP برابر ۲۰ میلیمتر قرار داده شد. در شکل های (۷) و (۸) نحوه شبکه بندی دو ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP نشان داده شده است.



شکل (۷): ستون بتنی مسلح محصور نشده با FRP (R04M1-0); نحوه مش بندی ستون

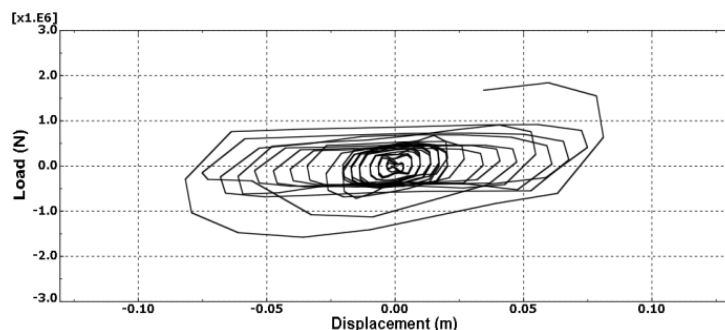


شکل (۸): ستون بتنی مسلح محصور شده با FRP (R04M1-C/0); نحوه مش بندی ستون

### ۳-۶. نتایج مدلسازی پیشنهادی ستون بتنی محصور نشده

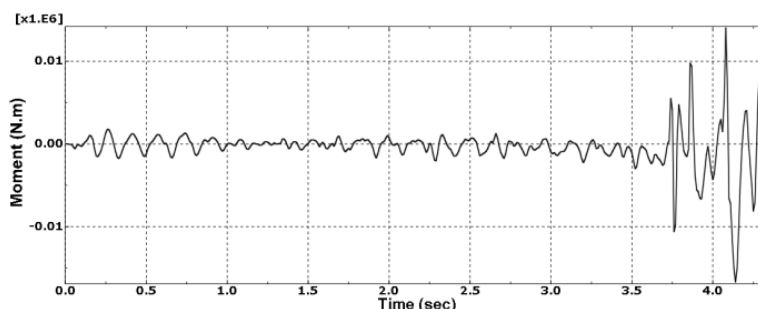
منحنی هیستریزیس این ستون بتنی در شکل (۹) نشان داده شده است. به دلیل عدم وجود تقارن در این منحنی، در بارهای رفت و برگشتی و مخصوصاً بار زلزله نمی توان از ستون رفتار یکنواختی را انتظار داشت. همچنین از آنجا

که سطح زیر این منحنی نشان دهنده میزان انرژی مستهلک شده در سیستم می باشد، به دلیل کوچک بودن سطح زیر منحنی میزان شکل پذیری ستون کم بوده و توان کمتری در مستهلک سازی بارهای وارده خواهد داشت.



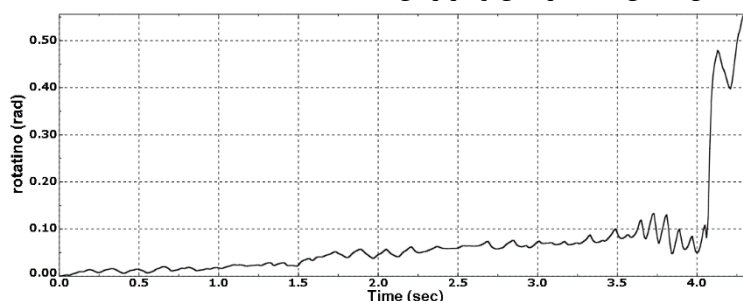
شکل (۹): منحنی هیستریزیس ستون بتنی محصور نشده؛ نیروی جانبی - تغییر مکان مکان جانبی

منحنی لنگر خمشی تکیه گاهی - زمان این ستون نیز در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود ظرفیت خمشی مقطع در مدل عددی برابر  $12/5237 \text{ kN.m}$  می باشد که در زمان  $4/14$  ثانیه اتفاق می افتد.



شکل (۱۰): منحنی لنگر خمشی تکیه گاهی - زمان ستون بتنی محصور نشده

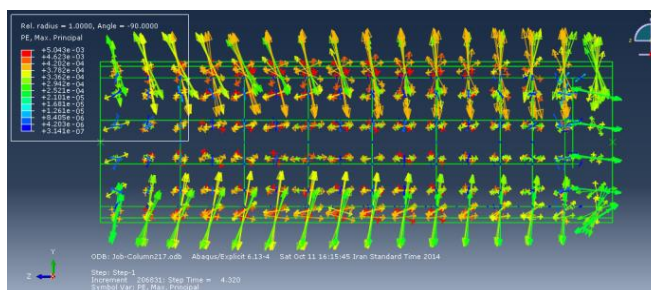
جهت تعیین مقدار ظرفیت چرخشی ستون، تغییرات دوران ستون در مدت زمان بارگذاری در شکل (۱۱) ارائه شده است. این نمودار خروجی نرم افزار ABAQUS برای مقدار چرخش در محل اتصال می باشد. با توجه به این نمودار ظرفیت چرخشی مقطع در محل اتصال  $0/55$  رادیان و در زمان  $4/29$  ثانیه محاسبه شده است.



شکل (۱۱): تغییرات دوران ستون بتنی محصور نشده

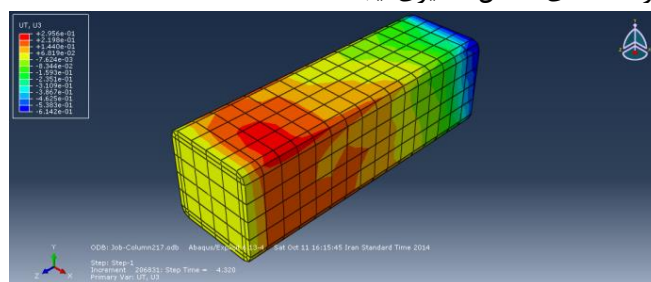
مکانیزم پخش ترک ها و خردشدگی ها، جهت گیری و شدت آنها، در انتهای زمان بارگذاری و در وجه شرقی ستون، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که بردارها بر روی سطح ستون (بتن محصور نشده)، موازی با صفحه ترک می باشند که این موضوع برشی بودن این ترک ها را نشان می دهد. ترک ها تقریباً در زمان  $0/216$  ثانیه که حدوداً متناظر با نسبت تغییر مکان  $0/5$  درصد می باشد، ایجاد شده و شروع به رشد کردند. در این زمان از بارگذاری ترک ها به صورت مایل و در منطقه مفصل پلاستیک ستون ظاهر شدند. با پیشرفت

بارگذاری و در نسبت تغییر مکانهای بالاتر، این ترکها بزرگتر شده و به صورت قطری ایجاد شدند و در انتهای بارگذاری نیز به بالای ستون گسترش پیدا کردند. الگوی این نوع از ترک ها، مود گسیختگی ستون را از نوع برشی تعریف می نماید.

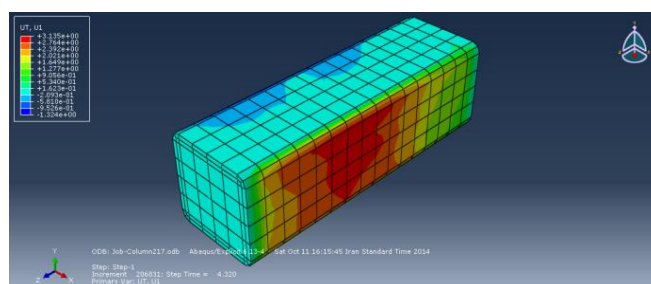


شکل (۱۲): راستای ترک ها در ستون بتنی محصور نشده

در شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب کانتور تغییر مکان محوری و جانبی (در راستای Z و X) ستون بتنی محصور نشده در پایان تحلیل، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود، بیشترین میزان تغییر مکان محوری و جانبی ستون در منطقه ی مفصل خمیری ایجاد شده است.

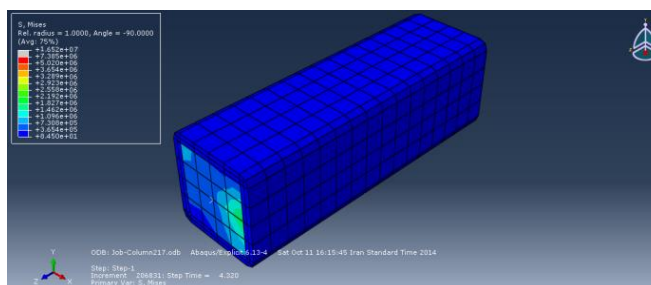


شکل (۱۳): تغییر مکان در راستای طولی (Z) به صورت طیف رنگ برای ستون بتنی محصور نشده



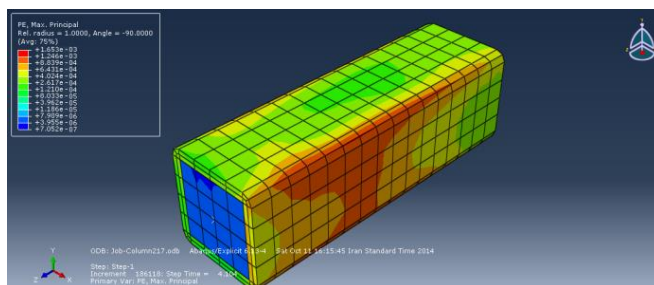
شکل (۱۴): تغییر مکان در راستای جانبی (X) به صورت طیف رنگ برای ستون بتنی محصور نشده

کانتور تنش در ستون بتنی محصور نشده در شکل (۱۵) مشاهده می شود. با توجه به این شکل می توان دریافت که برای بتن محصور نشده با اعمال بار فشاری، شرایط تنش در کل ستون به حالت بحرانی در می آید.



شکل (۱۵): تنش در ستون بتنی محصور نشده

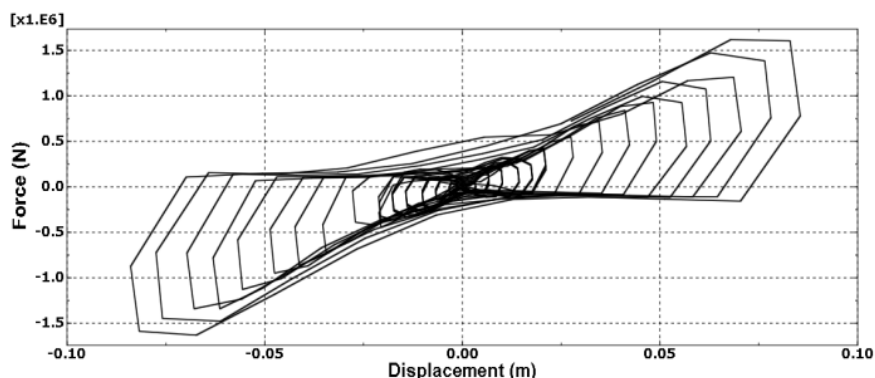
کانتور کرنش های پلاستیک بیشینه اصلی ایجاد شده در ستون بتنی نیز در شکل (۱۶) نشان داده شده است. این خروجی ها اندکی قبل از ناپایداری نمونه گرفته شده اند و از آنجا که ترک ها در محدوده ی مفصل پلاستیک ستون شروع به رشد کردند، در این ناحیه بیشترین کرنش پلاستیک وجود دارد و این امر حکایت از خسارت های کششی گسترده در بتن می باشد.



شکل (۱۶): کرنش پلاستیک بیشینه اصلی اندکی قبل از ناپایداری ستون بتنی محصور نشده

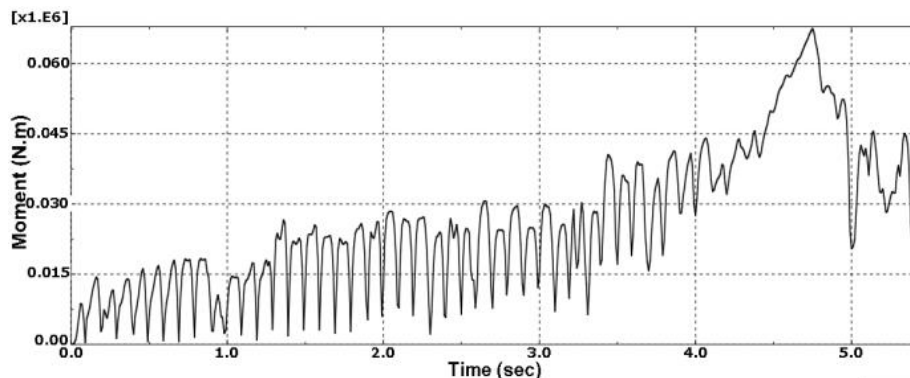
#### ۴-۶. نتایج مدلسازی پیشنهادی ستون بتنی محصور شده با FRP

در شکل (۱۷) منحنی هیستریزیس ستون بتنی محصور شده با FRP نشان داده شده است. تقارن موجود در این منحنی نشان دهنده رفتار یکنواخت ستون در هنگام اعمال بارهای رفت و برگشتی و مخصوصا بار زلزله می باشد. سطح زیر این منحنی نیز بزرگتر از ستون محصور نشده بوده و این موضوع بیانگر آن است که میزان شکل پذیری ستون بیشتر بوده و توان بیشتری در مستهلک سازی نیرو های اعمالی خواهد داشت.



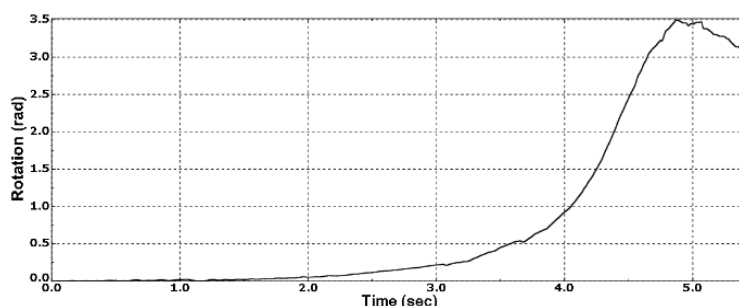
شکل (۱۷): منحنی هیستریزیس ستون بتنی محصور شده با FRP؛ نیروی جانبی- تغییر مکان جانبی

شکل (۱۸) نشان دهنده منحنی لنگر خمشی تکیه گاهی- زمان این ستون بتنی است. با توجه به این نمودار، ظرفیت خمشی مقطع در مدل عددی  $70/169 \text{ kN.m}$  می باشد که در زمان  $4/75$  ثانیه اتفاق می افتد.



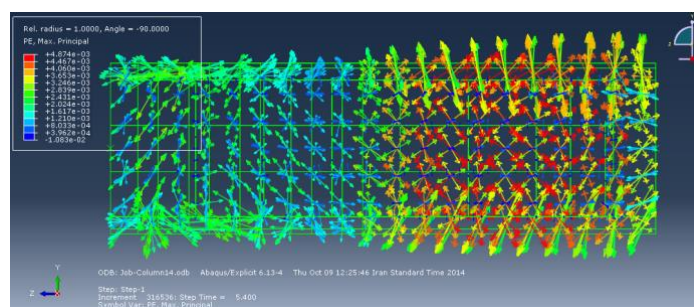
شکل (۱۸): منحنی لنگر خمشی تکیه گاهی- زمان ستون بتنی محصور شده با FRP

در شکل (۱۹) تغییرات دوران ستون در مدت زمان اعمال بار نشان داده شده است که با توجه به این شکل مقدار ظرفیت چرخشی مقطع در محل اتصال ۳/۵۰ رادیان می باشد و در زمان ۴/۸۸ ثانیه محاسبه شده است.



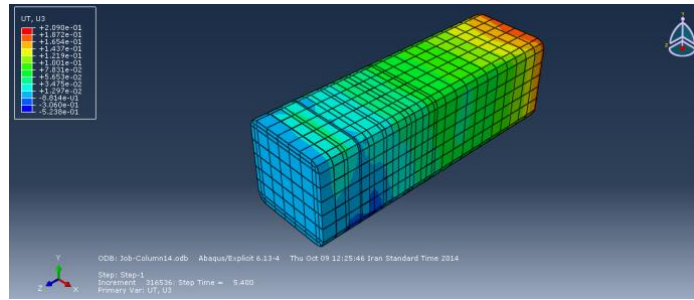
شکل (۱۹): تغییرات دوران ستون بتنی محصور شده با FRP

در شکل (۲۰) مکانیزم پخش ترک ها و خردشدگی ها، جهت گیری و شدت آنها، در انتهای زمان بارگذاری و در وجه شرقی ستون نشان داده شده است. در زمان ۰/۲۷ ثانیه که متناظر با نسبت تغییر مکان ۰/۵٪ می باشد اولین ترک ها به صورت قطری در پای ستون و قسمت بالای ستون ایجاد شد که وجود نوارهای FRP مانع از گسترش این ترک ها در طول ستون و مخصوصا در ناحیه مفصل خمیری گردید. در نسبت تغییر مکان ۱ درصد ترک های افقی و موازی با امتداد نوارها، در فواصل بین نوار اول و دوم و پای ستون ایجاد شد. در نسبت تغییر مکان ۲ درصد ترک های افقی در بالای ستون ایجاد شد و وجود نوارهای FRP مانع از ایجاد ترک های افقی در محل مفصل خمیری ستون گردید. زمانی که نوار اول پاره شد میلگردهای طولی شروع به کمانش کردند و در ادامه بارگذاری نوارهای بعدی نیز گسیخته شدند که کنده شده بتن پوششی میلگردها، موجب بیشتر شدن کمانش میلگردهای طولی گردید. همزمان با کمانش میلگردهای طولی، ترک های افقی در بالای ستون که با نوارهای FRP محصور نشده بود، گسترش یافتند و به تبدیل مود گسیختگی ستون از برشی به خمشی کمک کردند.

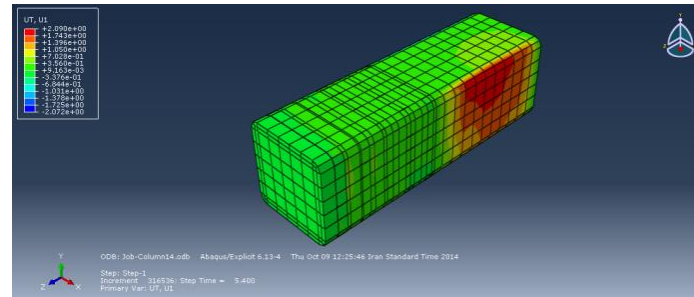


شکل (۲۰): راستای ترک ها در ستون بتنی محصور شده با FRP

کانتورهای تغییر مکان محوری و جانبی و جانبی (در راستای X و Z) ستون بتنی محصور شده با FRP در پایان تحلیل، به ترتیب در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقاوم نمودن ستون با FRP باعث کاهش تغییر مکان محوری و جانبی ستون در منطقه ی مفصل خمیری شده است.

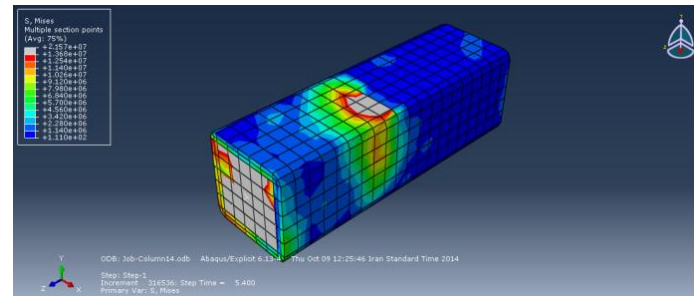


شکل (۲۱): تغییر مکان در راستای طولی ( $\sigma_z$ ) به صورت طیف رنگ برای ستون بتنی محصور شده با FRP



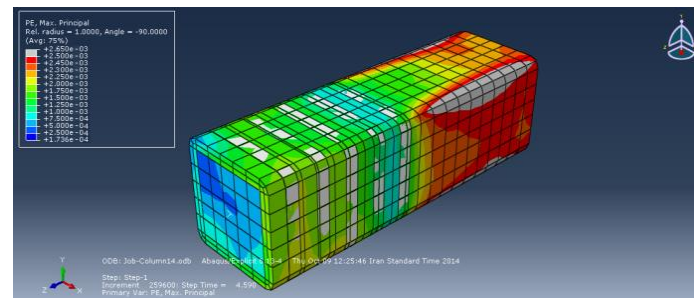
شکل (۲۲): تغییر مکان در راستای جانبی ( $\sigma_x$ ) به صورت طیف رنگ برای ستون بتنی محصور شده با FRP

در شکل (۲۳) کانتور تنش در ستون بتنی محصور شده با FRP نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که برای ستون محصور شده با اعمال بار فشاری، ژاکت محصور کننده و خصوصاً ناحیه میانی ژاکت کاملاً تحت تنش قرار می‌گیرد.



شکل (۲۳): تنش در ستون بتنی محصور شده با FRP

کانتور کرنش های پلاستیک بیشینه اصلی ایجاد شده در ستون بتنی محصور شده با FRP نیز در شکل (۲۴) نشان داده شده است. این خروجی اندکی قبل از ناپایداری نمونه گرفته شده است و همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل مقاوم سازی ستون با نوار های FRP کرنش های پلاستیک در ناحیه محصور شده (همان ناحیه مفصل خمیری)، کاهش یافته و کرنش محوری در ستون افزایش یافته است.



شکل (۲۴): کرنش پلاستیک بیشینه اصلی اندکی قبل از ناپایداری ستون بتنی محصور شده با FRP

## ۵-۶. مقایسه دو مدل‌سازی پیشنهادی ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP

جدول (۱) مقایسه ای را بین نتایج مدل‌سازی های پیشنهادی دو ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه نتایج مدل‌سازی های پیشنهادی دو ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با FRP

سختی	سختی	سختی
سختی	سختی	سختی
مُد گسیختگی	برشی	خمشی
ظرفیت خمشی مقطع	12.524 kN.m	70.169 kN.m
ظرفیت چرخشی مقطع	0.55 Rad	3.50 Rad
حداکثر تغییر مکان طولی	295.60 mm	209 mm
حداکثر تغییر مکان جانبی در راستای x	3135 mm	2090 mm
حداکثر تنش در ستون	16.52 MPa	21.57 MPa
محل ایجاد و مقدار کرنش پلاستیک بیشینه در ستون	در محل مفصل خمیری 0.0016	در ناحیه محصور نشده 0.0026

با توجه به جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که مقاوم نمودن ستون با نوارهای FRP تاثیر قابل توجهی در کاهش مقدار تغییر مکان ستون در راستای جانبی و طولی در محل مفصل خمیری به میزان ۵۰ درصد و افزایش ظرفیت خمشی مقطع تا ۵ برابر دارد. همچنین این نوارها منجر به افزایش مقاومت فشاری ستون به میزان ۳۰ درصد و همچنین افزایش ظرفیت چرخشی در محل اتصالات تا ۶ برابر شده‌اند. تغییر مود برشی زودرس به مود خمشی و افزایش شکل پذیری ستون از دیگر مزایای این روش مقاوم سازی می‌باشد. بنابراین استفاده از نوارهای FRP یکی از راه‌های موثر در بهسازی ستون‌های بتن آرمه می‌باشد و از آنجا که این نوارها فقط در ناحیه ای که مفصل پلاستیک در ستون ایجاد می‌گردد، بکار برده شده‌اند، این مطلب با توجه به گرانی FRP اهمیت فراوان دارد.

## ۶-۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشنهادی با طرح آزمایشگاهی مرجع

در جدول (۲) مقایسه ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشنهادی ستون بتنی محصور شده با FRP و نتایج بدست آمده از طرح آزمایشگاهی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی میان نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشنهادی و نتایج حاصل از طرح آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول (۲): مقایسه ی نتایج مدل‌سازی پیشنهادی ستون بتنی محصور شده با FRP با نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی [۱]	مدل‌سازی پیشنهادی	نتایج آزمایشگاهی
خمشی	خمشی	خمشی
70 kN.m	70.169 kN.m	70 kN.m
7000 $\mu$ m	7200 $\mu$ m	7000 $\mu$ m
21 MPa	21.57 MPa	21 MPa
0.0025	0.0026	0.0025
0.007 MPa	0.008252 MPa	0.007 MPa

## ۷-۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشنهادی با روابط آیین نامه ای

به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشنهادی با روابط آیین نامه ای، روابط موجود در مرجع [۴] به کار برده شده است. رابطه (۷) نشان دهنده حداکثر مقاومت فشاری بتن محصور شده می‌باشد.

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f 3.3 K_a f_l \quad (7)$$

$$f'_{cc} = f'_c$$

پارامترهای موجود در رابطه (۷) به شرح زیر می‌باشند:

$\psi_f$ : ضریب کاهش که مقدار آن ۰/۹۵ توصیه شده است.

$f_c'$ : مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن محصور نشده

$K_a$ : ضریب عملکرد مربوط به هندسه مقطع ستون است. این ضریب برای ستون های مستطیلی به نسبت ابعاد مقطع و مقدار سطح موثر محصور شده بستگی دارد و از رابطه (۸) محاسبه می گردد.

$$\left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (8)$$

$$K_a = \frac{A_e}{A_c}$$

نسبت  $\frac{A_e}{A_c}$  نیز طبق رابطه (۹) برابر است با:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{[(h/b)(h-2r_c)^2 + (h/b)(h-2r_c)^2]}{3Ag} \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (9)$$

در روابط فوق  $h$  و  $b$  به ترتیب طول و عرض مقطع مستطیل،  $r_c$  شعاع انحنای گوشه های مقطع مستطیل و  $\rho_g$  نسبت آرماتورهای طولی ستون می باشد.

$f_l$ : حداکثر فشار محصور کنندگی می باشد که از رابطه (۱۰) بدست می آید.

$$f_l = \frac{2E_{ft}f_{fe}}{D} \quad (10)$$

در رابطه فوق،  $E_{fe}$  کرنش موثر ایجاد شده در سیستم FRP در لحظه شکست بوده که از رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$\varepsilon_{fe} = K_\varepsilon \varepsilon_{fu} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)  $K_\varepsilon$  ضریب عملکرد مربوط به کرنش می باشد که اثر شکست ناگهانی سیستم FRP را لحاظ می کند. در مرجع [۴] این ضریب برابر با ۰/۵۵ پیشنهاد شده است.

جهت محاسبه  $f_l$  در ستون های با مقطع غیر دایره ای، مقطع مستطیلی با مقطع دایره ای معادل با قطر  $D$  جایگزین می شود که این پارامتر از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (12)$$

به منظور محاسبه حداکثر کرنش فشاری ایجاد شده در بتن محصور شده، از رابطه (۱۳) استفاده می شود.

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left( 1.50 + 12K_b \frac{f_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad (13)$$

برای جلوگیری از ایجاد ترک های بیش از اندازه و از بین رفتن یکپارچگی بتن، مقدار  $\varepsilon_{ccu}$  باید محدودیت رابطه (۱۴) را برآورده نماید.

$$\varepsilon_{ccu} \leq 0.01 \quad (14)$$

پارامترهای موجود در رابطه (۱۳) به شرح زیر می باشند:

$K_b$ : ضریب عملکرد مربوط به هندسه مقطع می باشد. این ضریب برای ستون های با مقطع مستطیلی به نسبت ابعاد مقطع و مقدار سطح مقطع موثر محصور شدگی بستگی دارد و از رابطه (۱۵) محاسبه می شود.

$$K_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad (15)$$

در رابطه فوق نسبت  $\frac{A_e}{A_c}$  از رابطه (۹) محاسبه می گردد.

مقاومت برشی عضو تقویت شده به منظور جلوگیری از شکست ترد برشی ارزیابی می شود. این مقاومت از حاصلضرب مقاومت برشی اسمی در ضریب کاهش مقاومت، طبق رابطه (۱۶) حاصل می گردد.

$$V_u \leq \phi V_n \quad (16)$$

مقاومت برشی اسمی عضو بتنی تقویت شده با مصالح FRP، مجموع مقاومت برشی ناشی از بتن، میلگرد (به صورت خاموت، تنگ و یا دورپیچ) و مصالح FRP، مطابق با رابطه (۱۷) می باشد. برای مقاومت برشی ناشی از مصالح FRP باید ضریب کاهش مقاومت  $\psi_f$  اعمال گردد.

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (17)$$



پارامتر های موجود در رابطه فوق به شرح زیر می باشند:

$V_c$ : مقاومت برشی اسمی حاصل از بتن می باشد که طبق رابطه (۱۸) تعیین می گردد.

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (18)$$

$V_s$ : مقاومت برشی اسمی حاصل از آرماتور که توسط رابطه (۱۹) بدست می آید.

$$V_s = A_v f_y \frac{d}{s} \quad (19)$$

$V_f$ : مقاومت برشی اسمی حاصل از مصالح FRP است که از رابطه (۲۰) محاسبه می شود و باید در ضریب کاهش  $\psi_f$  ضرب شود. ضریب کاهش برحسب شکل قرارگیری صفحات FRP بر روی عضو تعیین می گردد. در مرجع [۴] برای حالت دور پیچ تمام وجوه جانبی عضو، این ضریب برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (20)$$

$$A_{fv} = 2 n t_f w_f \quad (21)$$

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (22)$$

$\epsilon_{fe}$  کرنش موثر مصالح FRP می باشد که به حالت شکست مصالح FRP و عضو بتنی بستگی دارد. این کرنش با توجه به شکل پیچیدن یا چسباندن صفحات FRP بر وجوه عضو بتنی دارای مقادیر متفاوتی می باشد. در حالتی که صفحات FRP به طور کامل تمام مقطع را دور پیچ کنند، حداکثر کرنش موثر مصالح FRP در طراحی به ۰/۴ درصد محدود می شود که طبق رابطه (۲۳) می باشد.

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu} \quad (23)$$

جهت محاسبه ظرفیت خمشی مقطع از رابطه (۲۴) استفاده می شود.

$$M_n = b d^2 \rho f_y \left(1 - 0.5 \rho \frac{f_y}{0.85 f'_c}\right) \quad (24)$$

با توجه به جدول (۳)، نتایج حاصل از مدلسازی پیشنهادی ستون بتنی محصور شده با FRP، با مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه ای مطابقت دارد.

جدول (۳): مقایسه نتایج مدلسازی پیشنهادی ستون بتنی محصور شده با FRP با روابط آیین نامه ای

روابط آیین نامه ای مرجع [۴]	مدلسازی پیشنهادی	
21.562 MPa	21.57 MPa	حداکثر مقاومت فشاری ستون
70.0162 kN.m	70.169 kN.m	ظرفیت خمشی مقطع
0.0025	0.0026	حداکثر کرنش فشاری ستون
1589 kN	1600 kN	حداکثر مقاومت برشی ستون

## ۷. نتیجه گیری

مقاوم سازی ستون های بتنی به منظور افزایش ظرفیت خمشی، ظرفیت برشی، مقاومت فشاری محوری و شکل پذیری ستون با استفاده از روش هایی مانند ژاکت های فولادی و بتنی از گذشته انجام گرفته است. در چند سال اخیر روش محصور سازی ستون های بتنی با استفاده از مواد کامپوزیت FRP رواج یافته است که از جمله مزیت های عمده این کامپوزیت مقاومت کششی بالا، داشتن رفتار الاستیک تا گسیختگی، مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن کم و سهولت نصب می باشد.

در این مقاله ضمن ارائه روابط عددی و آیین نامه ای حاکم بر رفتار ستونهای تقویت شده با FRP، نحوه ی مدل سازی غیر خطی محصور شدگی جانبی ستون های بتن مسلح با نوارهای CFRP با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS ارائه گردید و تاثیر این محصور شدگی بر افزایش ظرفیت باربری لرزه ای ستون راستی آزمایی گردید.

مقاوم سازی ستون با نوارهای FRP تاثیر قابل توجهی در کاهش مقدار تغییر مکان ستون، در راستای جانبی و طولی در محل مفصل خمیری، به میزان ۵۰ درصد و افزایش ظرفیت خمشی مقطع تا ۵ برابر داشته است. همچنین به سازی با این نوارها منجر به افزایش مقاومت فشاری ستون به میزان ۳۰ درصد و افزایش ظرفیت چرخشی در محل اتصالات تا ۶ برابر شده است.

طبق نتایج بدست آمده از تحلیل مدل، کاربرد مواد FRP باعث افزایش مقاومت فشاری، کرنش محوری، ظرفیت خمشی مقطع، ظرفیت چرخشی در محل اتصال و همچنین افزایش شکل پذیری ستون های بتن آرمه می گردد. بر اساس مدل نرم افزاری ارائه شده ابزار قدرتمندی در اختیار مهندسان محاسب قرار خواهد گرفت که با استفاده از آن مدلسازی های با دقت بالا در رفتار اعضای بتنی تقویت شده با FRP امکان پذیر خواهد بود.

## ۸. مراجع

۱-آرم، محمد رضا؛ نصرالله زاده، کورش، (۱۳۹۱)، به سازی لرزه ای ستون های بتنی با استفاده از نوارهای پیش تنیده FRP (بررسی آزمایشگاهی)، چاپ اول، تهران، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

۲-شهبازی، رضا؛ یکرنگ نیا، محمد، (۱۳۹۳)، "راهنمای کاربردی Abaqus به همراه مسائل مهندسی عمران"، چاپ دوم، تهران، نشر علم عمران.

۳-فدایی، سعید، (۱۳۸۳)، تقویت ستون های بتن آرمه با استفاده از مواد پلیمری (FRP)، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱-۱۰.

۴-مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شورای راهبردی مقاوم سازی، (۱۳۹۲)، "دستورالعمل مقاوم سازی ساختمان ها با استفاده از FRP"، چاپ اول، تهران، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

5-*Abaqus Analysis User's Manual, ABAQUS 6.12, University of Cambridge, 2012.*

6-*ACI 440, (2008), Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement, American Concrete institute.*

7-*Abdel-Hay, A. S., (2014), Partial strengthening of R.C square columns using CFRP, HBRC Journal, pp. 1-8.*

8-*ISIS, (2007), Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, Isis Canada Research Network.*

9-*Khairallah, F., (2013), Mechanical behavior of confined self-compacting reinforced concrete circular columns under concentric axial loading, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 4, pp. 641-649.*

10-*Kwan, A. K. H.; He, X. G., (2001), Finite Element Analysis of Effect of Concrete Confinement on Behavior of Shear Walls, Computer and Structures, Vol. 79, pp. 1799-1810.*

11-*Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., (1988), Theoretical Stress- Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.*

12-*Raval, R., Dave, U., (2013), Behavior of GFRP Wrapped RC Columns of different shapes, Procedia Engineering, Vol. 51, pp. 240-249.*

13-*Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). "A study of failure of concrete under combined compressive stresses." Eng. Exp. Station Bull. No. 185, Univ. of Illinois.*

14-*Rousakis, T. C.; Karabinis, A. I.; Kioussis, P. D., (2006), FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modeling, Engineering Structures, Vol. 29, pp. 1343-1353.*

15-*Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., (1988), Model of Concrete Confined by Fiber Composites, Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031.*

16-*Sharma, S. S., Dave, U. V., Solanki, H., (2013), FRP wrapping for RC Columns with Varying Corner Radii, Procedia Engineering, Vol. 51, pp. 220-229.*

# Seismic retrofitting of reinforced concrete columns under cyclic loading by CFRP strips

**hammad Reza Aram**

Assistant Professor of Nuclear Science and Technology Research Institute  
Email: mharam@aeoi.org.ir

**Hosna Noroozbeigy**

Master of Science in Earthquake Engineering, Civil Engineering Department, Ale Taha Institute of Higher Education  
Email: hosnacivil@gmail.com

## **Abstract:**

*In recent years the use of composite materials in various industries has been developed. A new and useful field in civil engineering is to apply of fiber reinforced polymer composite materials for strengthening and retrofitting of the reinforced concrete structures. Retrofitting of reinforced concrete columns by these materials causes to increase strength, ductility and flexural capacity. In this paper, both unconfined and confined concrete columns with composite carbon fiber reinforced polymer (CFRP) have been modeled by ABAQUS finite element software under constant axial loading and cyclic lateral loading.*

*The FE results have been compared with the experimental results and analytical equations and a very good correlation has been obtained. Retrofitted columns in this way resulted in a change in early shear mode to the flexural mode, reducing of column displacement in longitudinal and lateral directions in the plastic hinge region of the column, increasing of flexural capacity, increasing of ductility, increasing of axial compressive strength, increasing of column axial strain and increasing of rotational capacity at the joints .*

**KEYWORDS:** Seismic Retrofitting, FRP, Confinement, Reinforced Concrete Columns, Carbon Fiber, Cyclic Loading.