

## بررسی اثر تقویت کامپوزیت پارچه الیاف کربن بر روی کمانش ستون بتن آرمه توخالی در ارتفاع های مختلف

شکوفه بلبلی<sup>۱</sup>، مهدی سعید کیاست<sup>۲</sup>، مصباح سایبانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)؛ shokoufeb@aut.ac.ir

۲- دانشیار، هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)؛ kiasat@aut.ac.ir

۳- دانشیار، هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)؛ msaybani@aut.ac.ir

shokoofebll@gmail.com

### چکیده

ستون های بتن آرمه تو خالی در اغلب سازه های دریایی و خاکی مورد استفاده خواهد بود. این بخش از سازه ها همواره وظیفه تحمل وزن سازه های فوقانی به صورت بار مرده را بر عهده داشته و گاهی به دلیل عملیات اجرایی با توجه به کاربری سازه، بارگذاری موقتی را نیز می بایست تحمل نماید. از ظرفی به دلیل شرایط مختلف حاکم بر محیط، ممکن است ستون نسبت زمان ساخت ظرفیت تحمل بار خود را تا حدودی از دست داده باشد و یا مطمئن بوده که ظرفیت خود را به دلیل خوردگی، سایش و سایر موارد از دست خواهد داد. بنابراین می بایست با توجه به ابعاد ستون اقدام به تقویت آن نمود و وضعیت سازه را بهبود بخشید. یکی از روش های تقویت سازه های بتنی استفاده از کامپوزیت های الیاف پارچه کربنی است. در این مقاله ستون های بتن آرمه با سه ارتفاع ۱۰، ۲۵ و ۳۵ متری با قطر ثابت ۱ متر، با توجه به نوع شکست نمونه ها، با رویکرد دریایی و کاربرد در سازه های ساحلی و فراساحلی تحت بار محوری قرار گرفته و ظرفیت تحمل بار به ازای انواع مختلف تقویت با کامپوزیت الیاف پارچه کربنی از نقطه نظر ضخامت و زاویه لایه چینی ۴۵ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. و مشاهده شد که اثر افزایش ضخامت لایه های مقاوم در ستون های مرتفع تر با شدت بیشتری خود را نشان خواهد داد.

کلمات کلیدی: سازه بتنی، مواد کامپوزیتی الیاف پارچه کربنی، سازه های ساحلی

### ۱. مقدمه

به علت نیاز روزافزون به استفاده از مواد ترکیبی برای دستیابی به خواص و عملکردهای مطلوب استفاده از مصالح کامپوزیت به طور قابل توجهی در صنعت ساختمان رو به رشد بوده و با سرعت فوق العاده در حال توسعه است. اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شد، اما زلزله های سال ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن عامل مهم و مؤثری جهت بررسی همه جانبه کاربرد کامپوزیت های پلیمری جهت تقویت و مقاوم سازی بتن در مناطق زلزله خیز گردید. این مطالعات که دامنه و وسعت آن، روز به روز در حال افزایش است زمینه ای وسیع جهت استفاده از کامپوزیت ها را در سازه های نیازمند به تقویت، بهسازی یا ترمیم فراهم نموده است. هم اکنون تعداد زیادی از محققان و پژوهشگران صنعت سازه در سراسر جهان در حال بررسی، مطالعه و انجام آزمایش های تقویت سازه ها با کامپوزیت های الیافی می باشند [۱].

ماسیمیلیانو بوسیاریلی [۲] در سال ۲۰۱۵ به اصلاح روش نیروی در تحلیل غیرخطی تیر بتن های تقویت شده با کامپوزیت الیافی پرداخت. در این پژوهش یک روش عددی ارائه شده است که قادر به بررسی اثرات تعادلی تقویت کننده های خارجی با استفاده از صفحه های کامپوزیت الیافی بوده و این

<sup>1</sup>Massimiliano Bocciarelli

صفحات را به صورت مجزا مورد تحلیل قرار می دهد. اسماعیل بنی اسدی [۳] در سال ۲۰۱۴ به تحلیل تنش های بین سطحی سازه های آسیب دیده که با استفاده از صفحات کامپوزیت الیافی مختلف تقویت شده اند پرداخت. هادی باغی [۴] در سال ۲۰۱۷، یک رویکرد جدید برای پیش بینی ظرفیت برشی تیر بتون مسلح تقویت شده با تکنیک NSM بررسی نمود. انیسو دینکو [۵] در سال ۲۰۱۵ به بررسی ظرفیت محوری اعضای بتن مسلح با تقویت کننده های کامپوزیت الیافی تحت نیروی متمرکز یا غیرعادی پرداخت. میکائیل جزف گنجی [۶] بر روی مرمت و تعمیر ستون ها و پل های آسیب دیده پرداخته است. سه روش تعمیرات برای تقویت پل های آسیب دیده را مورد بررسی قرارداد است: اتصالات رشته ای، پلیمرهای تقویت شده (کامپوزیت الیافی) و ماتریس سیمانی تقویت شده با پارچه (FRCM). ماتیو هوساک [۷] بر روی عملکرد عمر خستگی تیرهای تقویت شده توسط کامپوزیت پارچه الیاف کربن مطالعاتی انجام داده است. هدف از این مطالعه بررسی اثرات معیارهای تیرهای مختلف بر روی عمر خستگی تیرهای تقویت شده است. آوش هاساک [۸] در سال ۲۰۱۵ عملکرد ستون های بتنی تقویت شده کامپوزیت الیافی تحت بارگذاری شبه سازی شده بالاست بررسی نمود و اثربخشی ورقه های کامپوزیت پارچه الیاف کربن به عنوان مواد خارجی اعمال شده روی ستون های جکت به صورت آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت. هو جین کیم [۹] در مارس ۲۰۱۱ به تجزیه و تحلیل گسیختگی پانل های بتن آرمه تقویت شده با کامپوزیت الیافی تحت بار انفجاری پرداخت. در این مطالعه تکنیک تجزیه و تحلیل گسیختگی تحت بار انفجار برای کامپوزیت الیافی با توجه به پارامترهای مواد به کار گرفته شده است.

در این پژوهش سه ستون بتن آرمه در ارتفاع ۱۰، ۲۵ و ۳۵ متری با قطر ثابت ۱ متر برای ستون ها، با توجه به نوع شکست نمونه ها، انتخاب شده اند و تحت بارگذاری محوری قرار گرفته اند و تغییر شکل های بوجود آمده در حالت های شکست مختلف در هر سه ستون بتن آرمه و همچنین ستون های با تقویت کامپوزیت پارچه پلیمر الیافی با ضخامت های مختلف و لایه چینی های مختلف در این ارتفاع ها، برای تشخیص عملکرد بهتر پوشش تقویتی در حالات مختلف شکست، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نمونه ی ۱۰ متری که در دسته ی ارتفاع هایی قرار دارد که نمونه قبل از شکست فشاری دچار تغییر شکل لحظه ای مشابه به کماتش می شود اما با توجه به اینکه این تغییر شکل تقریباً تاثیری در شکست نمونه ندارد در راستای محورهای جانبی نمونه جابه جایی بسیار اندک است، می توان گفت حالتی قبل از شکست نمونه است و از کماتش بودن این تغییر شکل صرف نظر کرد و شکست نهایی نمونه را تنها شکست فشاری در نظر گرفت. نمونه ی ۲۵ متری که در دسته ی ارتفاع هایی قرار دارد که نمونه ابتدا دچار کماتش شده و سپس شکست فشاری اتفاق می افتد با توجه به این که در راستای محورهای جانبی نمونه جابه جایی اندک نیست و بلکه مقدار قابل توجهی دارد و نیز در تعداد گام های قابل قبولی نمونه در حالت کماتش است، شکست نهایی نمونه ترکیبی از کماتش و شکست فشاری در نظر گرفته می شود. نمونه ی ۳۵ متری که در دسته ی ارتفاع هایی قرار دارد که نمونه ابتدا دچار کماتش شده و سپس شکست فشاری تنها در چند لحظه کوتاه اتفاق می افتد، در این دسته از ارتفاع ها با توجه به این که در راستای محورهای جانبی نمونه جابه جایی مقدار قابل توجه و بزرگی دارد، می توان گفت نمونه از شدت کماتش به شکست رسیده و از شکست فشاری بودن این تغییر شکل صرف نظر کرده و شکست نمونه تنها شکست در اثر کماتش در نظر گرفته می شود. همچنین جهت بررسی بار بحرانی وارد بر ستون و مشخص شدن بار بحرانی کماتش به ازای تک تک مودهای تغییر شکل از روش مقادیر ویژه استفاده شده است.

## ۲. محتوای مقاله

### مدل سازی رفتار بتن مسلح و کامپوزیت به صورت ارتوتروپیک

پراکندگی آماری خواص بتن و به ویژه خاک به طور مشخص بیشتر از فلزات، پلیمرها و سایر مواد دیگر است. بنابراین، با توجه به این خصوصیات تعجبی ندارد که تمایل زیادی به حفظ مدل های ریاضی ساده قطعاً توجیه شود. مدل های ارتوتروپیک اخیراً بسیار محبوب بوده اند و به طور گسترده ای در تجزیه و تحلیل عناصر محدود از سازه های بتنی استفاده می شوند. در این تحقیق نمونه ی مکعبی و استوانه ای بتنی به صورت ارتوتروپیک تحت بارگذاری

Enio Deneko

Axial Capacity of FRP-Confined Reinforced Concrete Members Under Concentric or Slightly Eccentric Force

Aws Hasak

PERFORMANCE OF FRP STRENGTHENED CONCRETE COLUMNS UNDER SIMULATED BLAST LOADING

Ho Jin Kim

محوری و جانبی با روش تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته‌اند و به این نتیجه دست یافته است که در صورت چرخش محور مرجع ماده بر روی محورهای مختصات در روش تحلیل المان محدود در بعضی از بارگذاری‌ها در پاسخ خطا ایجاد می‌شود و در این حالات مدل کردن ارتوتروپیک بتن برای برنامه‌های المان محدود در صورتی که محورهای ماده منطبق بر محورهای مختصات نباشند مناسب نیست. بنابراین در صورت منطبق نبودن محورهای ماده بر محورهای مختصات، مدل‌های ارتوتروپیک باید محدود به بارگذاری‌هایی باشند که در آن تنش‌های اصلی یا جهت‌های کرنش نسبت به ماده در طول فرایند بارگذاری چرخش نمی‌یابند و یا هنگامی که آن‌ها چرخش می‌کنند، این تنها با یک زاویه نامنظم کوچک است [۱۰].

### معادلات حاکم بر کمانش

اگر باری در یک ستون از مرکز سطح مقطع (مرکز گرانش) آن ستون اعمال شود، به آن نیروی محوری گویند، هر نیرویی که از نقطه‌ای غیر از این نقطه وارد شود به آن نیروی خارج از مرکز گویند. یک ستون کوتاه تحت نیروی محوری ممکن است قبل از اینکه در آن کمانشی ایجاد شود، شکست نماید، اما در یک ستون بلند تحت بار مشابه، به صورت جهش ناگهانی جانبی (کمانش) به حالت خمشی دچار شکست خواهد شد [۱۱]. مقدار بار بحرانی، بیشترین مقدار باری است که یک ستون می‌تواند تحمل کند تا زمانی که حالت ابتدایی و مستقیم خود را حفظ کند. مقدار این بار به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر مشخص می‌گردد [۱۱]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

که در آن:

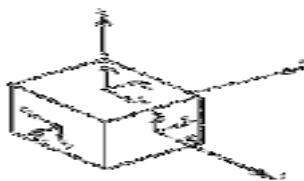
$P$ : بار بحرانی (بار فشاری در جهت طولی در ستون‌ها)

$K$ : ضریب طول مؤثر ستون

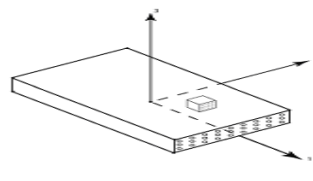
### معادلات حاکم بر مواد ارتوتروپیک

کامپوزیت‌های الیافی گرافیتی نمونه‌ای از مواد ارتوتروپیک با دو صفحه تقارن است. مزیت مواد ارتوتروپیک نسبت به مواد کاملاً ناهمسانگردی این است که مدول کشسانی‌شان بدون این که دچار کوپل کرنشی شوند، از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر متفاوت است. چنانچه مطابق شکل ۱ الف یک لایه ماده کامپوزیتی با الیاف تک جهته را در نظر بگیریم، جهت بررسی آن سیستم مختصات زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- محور ۱ در جهت موازی با الیاف، ۲- محور ۲ در صفحه لایه و عمود بر الیاف، ۳- محور ۳ عمود بر صفحه لایه و عمود بر الیاف



الف



ب

شکل ۱. الف) نمایش چندلایه‌ها با محورهای مختصات ۱-۲-۳ ب) تنش‌های اعمالی روی یک المان حجمی

جهت ۱ جهت الیاف نامیده می‌شود و جهات ۲ و ۳ جهات ماتریس و یا جهات عرضی نامیده می‌شود. تنش‌ها و کرنش‌ها در لایه به محورهای مختصات اصلی مواد بستگی دارد. ملاحظه می‌شود که این ماده خصوصیات یکنواختی در تمام جهات ندارد (ارتوتروپیک است). تنش‌ها بر یک المان در شکل ۲ ب نشان داده شده است. ۳ تنش عمودی  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  و ۳ تنش برشی  $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$  موجود است. این تنش‌ها با کرنش‌ها  $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{13}$  به وسیله روابط زیر به هم وابسته هستند [۱۴]:

با استفاده از ماتریس سازگاری شش در شش، رابطه تنش کرنش به صورت زیر است:

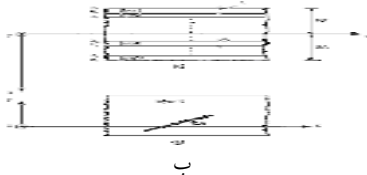
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

که  $\{ \sigma \}$ ،  $\{ \varepsilon \}$  بردارهای  $6 \times 1$  تنش و کرنش و  $\{ S \}$  ماتریس ضرایب است.  
این معادله را به شکل زیر می توان نوشت:  
 $\{ \varepsilon \} = [S] \{ \sigma \}$  (3)

که  $\{ \sigma \}$ ،  $\{ \varepsilon \}$  بردارهای  $6 \times 1$  تنش و کرنش و  $\{ S \}$  ماتریس ضرایب است.

### کامپوزیت های چندلایه

فرمول های لازم برای محاسبه تنش ها و کرنش ها در کل ضخامت و نیرو و گشتاور حاصله از کرنش ها و انحنای سطح مرجع در نقطه  $(X, Y)$  را به دست می آوریم. همچنین پروسه معکوس آن را انجام می دهیم یعنی با داشتن نیروها و گشتاورهای حاصله تنش ها و کرنش ها در سراسر ضخامت و کرنش ها و انحنای در سطح مرجع را محاسبه می کنیم. این کار به وسیله ماتریس سختی لمینیت محاسبه می شود.



شکل ۲. الف) شکل شمانیک یک کامپوزیت ۴ لایه ب) نمای شمانیک سطح مقطع و نمای از بالا

لایه نخست بین  $z_{n-1}$ ،  $z_n$ ، لایه دوم بین  $z_{k-1}$ ،  $z_k$ ، لایه K ام بین  $z_{k-1}$ ،  $z_k$ ، لایه N ام بین  $z_{n-1}$ ،  $z_n$  قرار دارد.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{1\phi} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{2\phi} \\ \bar{Q}_{1\phi} & \bar{Q}_{2\phi} & \bar{Q}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon'_x + z \kappa'_x \\ \varepsilon'_y + z \kappa'_y \\ \gamma'_x + z \kappa'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

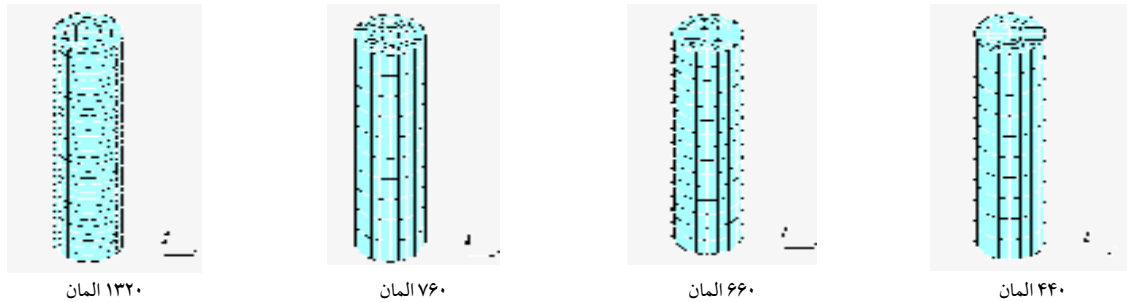
### مدل سازی کمانش

تحلیل عددی سازه های یکی از بهترین روش های پیش بینی رفتار سازه تحت بارگذاری های مختلف خواهد بود، اما با توجه به اینکه عوامل مختلفی همچون تعداد المان ها، نحوه صحیح شرایط مرزی و سایر موارد بر نتیجه این تحلیل ها اثرگذار خواهند بود، در این مقاله به بررسی ستون های تقویت شده با ارتفاع های مختلف پرداخته شده است. تقویت کننده مورد استفاده برای ستون ها از نوع کامپوزیت پارچه الیافی کربن بوده که در ۴ ضخامت متفاوت برای دولایه چینی در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است این نوع تقویت کننده ها می تواند برای مصارف مختلفی چون ستون های یک اسکله، پل ها و سایر موارد مورد استفاده قرار گیرد. نرم افزار مورد استفاده برای این امر کد تجاری marc در نظر گرفته شده است.

### عدم وابستگی به شبکه بندی

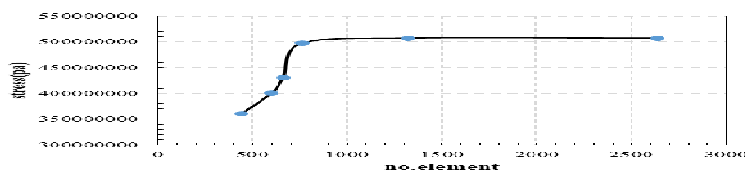
جهت انجام تحلیل ستون بتن آرمه بدون پوشش مقاوم، شبکه‌بندی انجام شده در محیط کد تجاری مارک از نوع المان ۲۱- المان سه‌بعدی و ۲۰ نقطه‌ای brick<sup>v</sup> استفاده شده است.

در شکل زیر نیز نمونه‌ای از این شبکه‌بندی بر روی هندسه نشان داده شده است. این تعداد مش برای سایر ستون‌ها با تعداد لایه چینی و ضخامت بیشتر شده است.



شکل ۳. نمونه شبکه‌بندی‌های مختلف ستون در محیط نرم‌افزار مارک

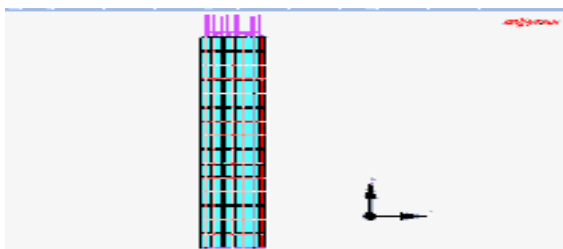
جهت اطمینان از وابسته نبودن تحلیل‌های صورت گرفته در نرم‌افزار، ستون بتن مسلح بدون پوشش تقویت‌کننده در تعداد شبکه‌های مختلف تحت بارگذاری محوری با ۷۰ درصد میزان بار بحرانی مورد بررسی قرار گرفته و اثرات تغییر تعداد شبکه‌ها بر درصد کرنش و تنش در نمودار شکل زیر نشان داده شده است. نحوه مشخص کردن بار بحرانی نیز در ادامه تشریح گردیده است.



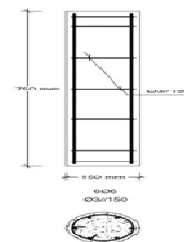
شکل ۴. استقلال از مش سازه نسبت به تغییرات تنش

### صحت سنجی

جهت اطمینان از خروجی نتایج نرم‌افزار مارک، نمونه تجربی آزمایش شده در رفرنس [۱۲] را که به صورت شکل زیر است در نرم‌افزار تحت بار و شرایط نشان داده شده تکرار گردید. مدل آزمایشگاهی برای بررسی ستون تقویت شده با کامپوزیت الیافی، ستونی با مقطع دایره شکل به قطر مشخص شده در شکل است که از بتن با مقاومت فشاری ۳۸ مگا پاسکال پر شده است. طول ستون به جهت سادگی انجام آزمایش ۷۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بارگذاری در این آزمایش بر اساس نمونه‌ی آزمایش شده در مقاله مرجع آورده شده است. ۱۵۰۰ کیلو نیوتن نیروی محوری به ستون به صورت خطی با روش کنترل نیرو وارد شده است. در شکل زیر نیز ستون مورد نظر در محیط نرم‌افزار مارک نشان داده شده است.



(ب)

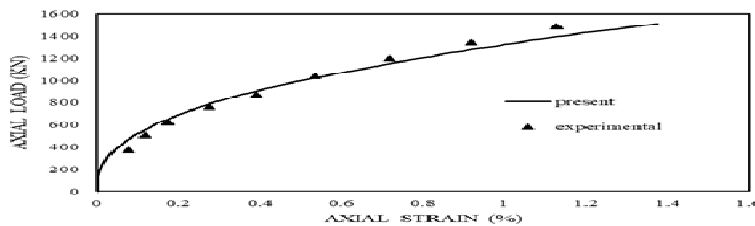


(الف)

<sup>v</sup>Three-dimensional 20-node Brick

شکل ۵. الف) ستون نمونه تجربی ب) ستون در محیط نرم افزار مارک و شرایط بارگذاری و تکیه گاهی

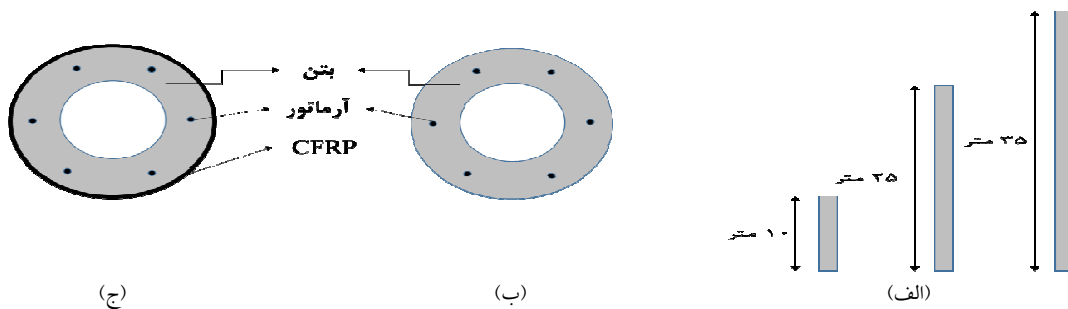
نتایج خروجی مطابق با مرجع [۱۲] استخراج گردید و نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده و آزمایش تجربی در نمودارهای شکل زیر با یکدیگر مقایسه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود این بخش دارای حداکثر تا ۷ درصد خطا بوده و با توجه به پایین بودن خطای ناشی از آزمایش و تحلیل عددی انجام شده در این پایان نامه، به صورت مشابه و با رعایت تعداد شبکه بندی و نحوه ایجاد شرایط بارگذاری و تکیه گاهی به شبیه سازی اسکله شمع و عرشه در نرم افزار پرداخته خواهد شد.



شکل ۶. نمودار مقایسه نتایج تحلیل عددی در نرم افزار مارک و آزمایش تجربی [۱۲]

### تعریف مسئله

همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، پایه اسکله شمع و عرشه بتن مسلح به قطر ۱m و ارتفاع های ۱۰m، ۲۵ و ۳۵ از کف دریا در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. برای در نظر گیری اثر شمع در رفتار سازه طبق آنچه در مرجع [۱۵] آمده و با توجه به اینکه اطلاعاتی از نوع خاک در دسترس نبود، شمع معادل از انتها گیردار، در نظر گرفته شده است. نسبت آرماتورهای طولی پایه فوق حدود ۲/۵٪ است. انتهای شمع معادل به صورت گیردار بوده و بار قائمی از ابتدای شمع به هر یک از گره ها وارد می شود که مجموع بار وارد بر گره ها به عنوان بار وارده به پایه تلقی خواهد شد. این بار تا لحظه گسیختگی پایه به آن وارد گردیده و به عنوان ظرفیت بار نهایی پایه تلقی گردیده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای استاندارد بتن ۳۵MPa، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بتن به ترتیب ۲۸GPa و ۰/۲ بود. مقاومت کششی بتن برای در نظر گیری قابلیت ترک خوردگی ۳/۳۹MPa در نظر گرفته شده است. تنش جاری شدن آرماتورهای ستون برابر ۳۲۰MPa با مدول الاستیسیته ۲۰۰GPa و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۷. الف) ستون های بتن آرمه تو خالی با ارتفاع ۱۰، ۲۵ و ۳۵ متری و قطر ۱ متر ب) مقطع ستون بدون پوشش مقاوم ج) مقطع ستون با پوشش CFRP

در این تحلیل جنس ستون از بتن آرمه با خواصی مطابق با جدول ۱ خواهد بود که تحت بارگذاری های مختلف قرار گرفته است. در تحلیل خمش تیر نیروی جانبی برابر با نیروی ناشی از برخورد یک شناور با ستون در نظر گرفته شده است. جهت انجام تحلیل نیز فرضیاتی در نظر گرفته شده اند که عبارت اند از:

- اثر تخریب ناشی از بار ضربه در محل ضربه به طور کل نادیده گرفته شده و نیروی ضربه به انتهای ستون وارد شده است.
- TM در ستون های تقویت شده با کامپوزیت پارچه الیاف کربن نیز اثرات چسب رزین لایه های بتن برسازه بتن مسلح صرف نظر شده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی بتن

نوع ماده	مدول	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب	استحکام نهایی	استحکام نهایی

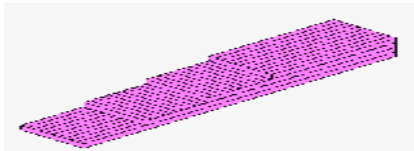
کششی (GPa)	فشاری (GPa)	پواسون	یانگ (GPa)	
	۴۰	۰/۲	۲۸	بتن
۳۲۰		۰/۳	۸۷۴۰	آرما تور

ماده مرکب به کار گرفته شده در این پژوهش جهت بررسی مقاومت سازی کامپوزیت پارچه الیاف کربن است. رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی و الیاف از جنس کربن T300 است و کامپوزیت پارچه الیاف کربن های مورد استفاده دارای رفتار کشسان خطی بوده و ویژگی های مکانیکی آنها در جدول زیر نیز ارائه شده است.

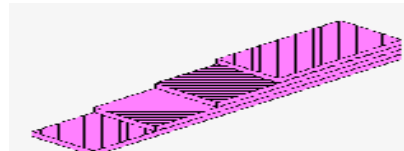
جدول ۲. خواص مکانیکی کامپوزیت پارچه الیاف کربن

Yt (M Pa)	Xt (M Pa)	G <sub>23</sub> (GPa)	G <sub>12</sub> (GPa)	V <sub>23</sub>	V <sub>12</sub>	E <sub>t</sub> (G Pa)	E <sub>1</sub> (GPa)	نوع ماده
115	1550	3.5	6	0.71	0.35	12	96	کامپوزیت الیافی کربن

در این پژوهش پوشش تقویت کننده بتن، دو نوع لایه چینی با زاویه [۴۵-۴۵] و [۰/۹۰] درجه مطابق با شکل زیر انجام شده است که برای هر لایه ۴ ضخامت مختلف نیز در نظر گرفته شده است. ضخامت های مورد نظر ۱/۸، ۲/۴، ۳ و ۳/۶ سانتی متر در نظر گرفته شده است، بنابراین برای انجام تحلیل ۱ نمونه بدون تقویت کامپوزیت پارچه الیاف کربن و ۸ نمونه تقویت شده با کامپوزیت پارچه الیاف کربن با زوایا و ضخامت های مختلف پوشش تقویت به وجود خواهد آمد که مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



(ب)

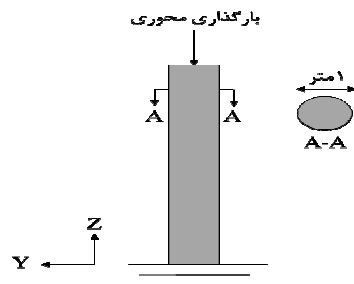


(الف)

شکل ۸. زاویه لایه چینی الف) ۴۵ درجه ب) ۹۰ درجه

### شرایط مرزی

جهت انجام فرآیند تحلیل ابتدا می بایست شرایط مرزی ستون ها را مشخص نمود. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود ستون ها از انتها دارای تکیه گاه گیردار بوده و تحت بارگذاری محوری از بالا قرار گرفته اند.



شکل ۹. شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ستون

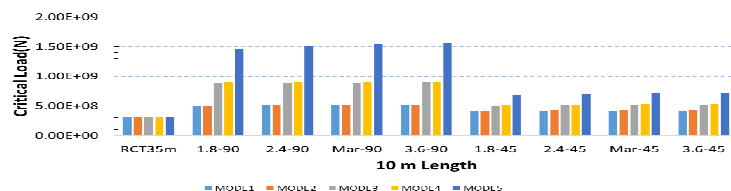
بارگذاری اعمال شده بر سازه ستون به صورت بارگذاری شماره ۱ در تصویر ۹ بوده و در راستای محوری بر سازه اعمال شده است.

### کمانش

ستون‌های تقویت شده و تقویت نشده، جهت بررسی کمانش در ستون‌ها و اثرات زاویه لایه چینی و ضخامت لایه‌های کامپوزیت پارچه الیاف کربن، تحت بار محوری تا رسیدن به شکست نهایی قرار گرفته‌اند. با استفاده از تکنیک مقادیر ویژه برای هر یک از نمونه‌ها بار بحرانی (کمانش خطی) برای مودهای مختلف تغییر شکل ستون‌های ۱۰، ۲۵ و ۳۵ متری محاسبه شده‌اند.

### • ستون ۱۰ متری

نیروهای بحرانی برای ۵ مود اول تغییر شکل ستون ۱۰ متری با توجه به تکنیک مقادیر ویژه مطابق با شکل زیر نتیجه خواهد شد.

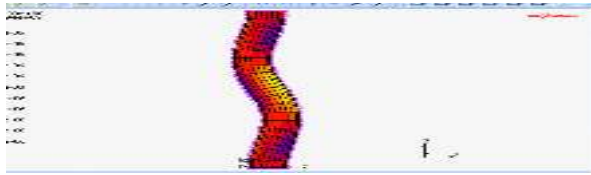


شکل ۱۰. مودهای مختلف تغییر شکل ستون ۱۰ متری تحت بار محوری ستون ۱۰ متری

در شکل‌های زیر نیز کانتورهای تغییر شکل برای ۳ مود اول تغییر شکل ستون ۱۰ متری در لایه چینی‌ها و ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است.

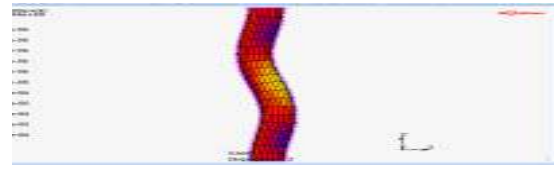






مود ۳

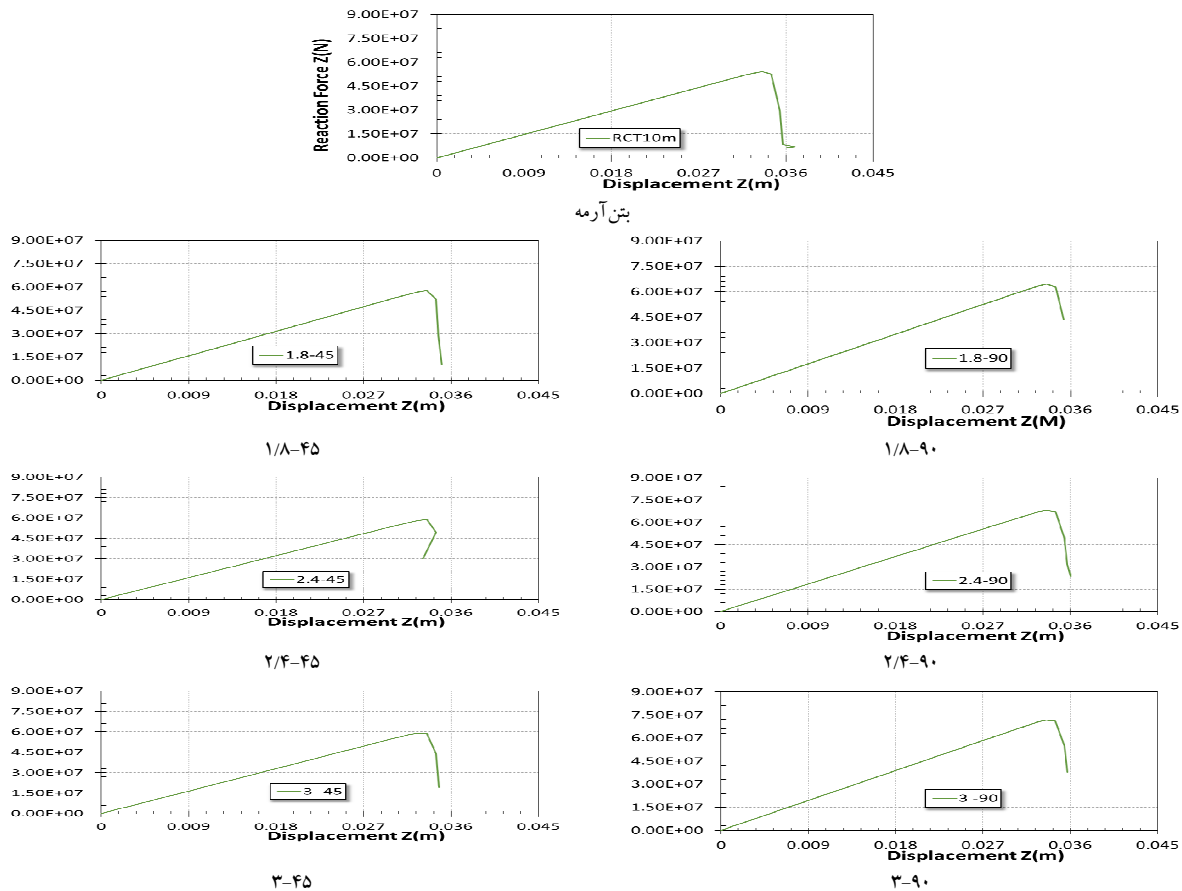
(ب)

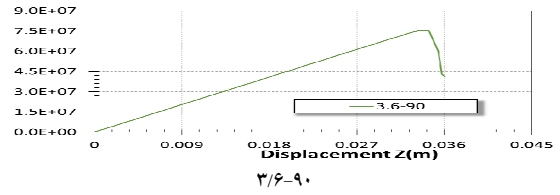
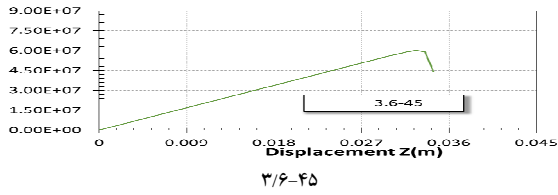


(الف)

شکل ۱۱. سه مود اول کمانش برای ستون ۱۰ متری (الف) بتن آرمه (ب) ستون تقویت شده با کامپوزیت الیافی ضخامت ۱/۸ و لایه چینی ۹۰ درجه

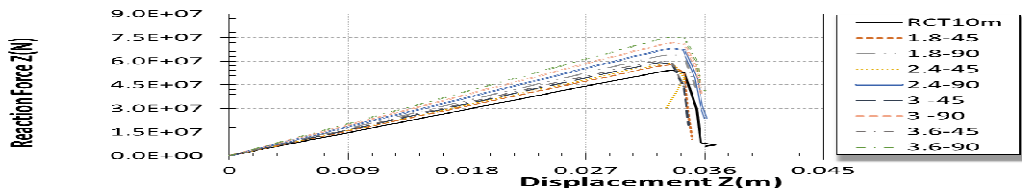
در نمودارهای شکل زیر نیز بار بحرانی مود اول و منحنی نیرو-جابجایی هر یک از نمونه‌های ستون ۱۰ متری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه ستون‌های تقویت شده، میزان تحمل ستون در برابر بار فشاری افزایش یافته است. با توجه به نمودارها در زاویه لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳/۶، ۳، ۲/۴، ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 40، 33، 26، 19 درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳/۶، ۳، ۲/۴، ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 12، 10، 9، 7 درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به میزان بار بحرانی مشاهده می‌شود که ستون با طول ۱۰ متر و قطر ۱ متر قبل از رسیدن به نیروی مود اول کمانش تحت بار فشاری دچار شکست خواهد شد. به دلیل فاصله زیاد مودهای اول کمانش (بار بحرانی) با قله نمودار تحلیل غیرخطی، برای نمایش و مقایسه این دو تحلیل با یکدیگر مقدار بار مود اول کمانش در ستون ۱۰ متری به صورت مضرب  $E-1$  نشان داده شده است.





شکل ۱۲. بار بحرانی و منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف ستون ۱۰ متری

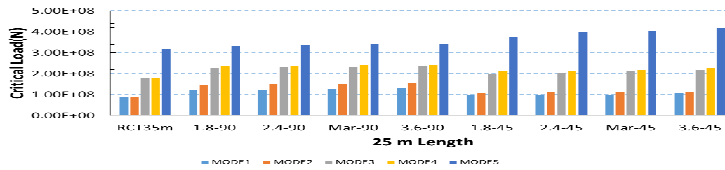
همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است کلیه نمونه‌های تقویت شده ستون ۱۰ متری قبل از رسیدن به اولین مود کمانش دچار شکست شده‌اند.



شکل ۱۳. منحنی نیرو-جابجایی برای همه نمونه‌های ستون ۱۰ متری

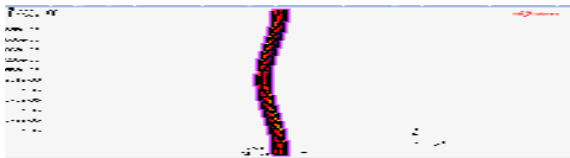
### • ستون ۲۵ متری

نیروهای بحرانی برای ۵ مود اول تغییر شکل ستون ۲۵ متری با توجه به تکنیک مقادیر ویژه مطابق با شکل زیر نتیجه خواهد شد.

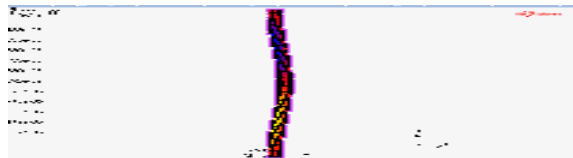


شکل ۱۴. مدهای مختلف تغییر شکل ستون ۲۵ متری تحت بار محوری ستون ۲۵ متری

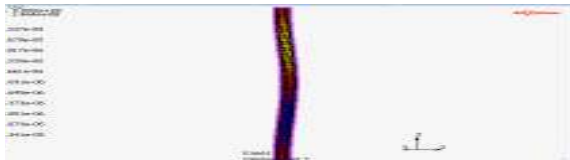
در شکل‌های زیر نیز کانتورهای تغییر شکل برای ۳ مود اول تغییر شکل ستون ۲۵ متری در لایه چینی‌ها و ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است.



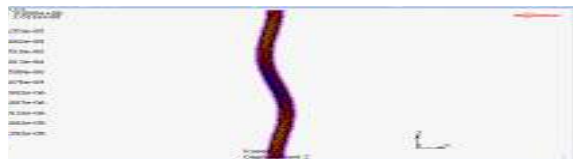
مود ۱



مود ۲



مود ۳

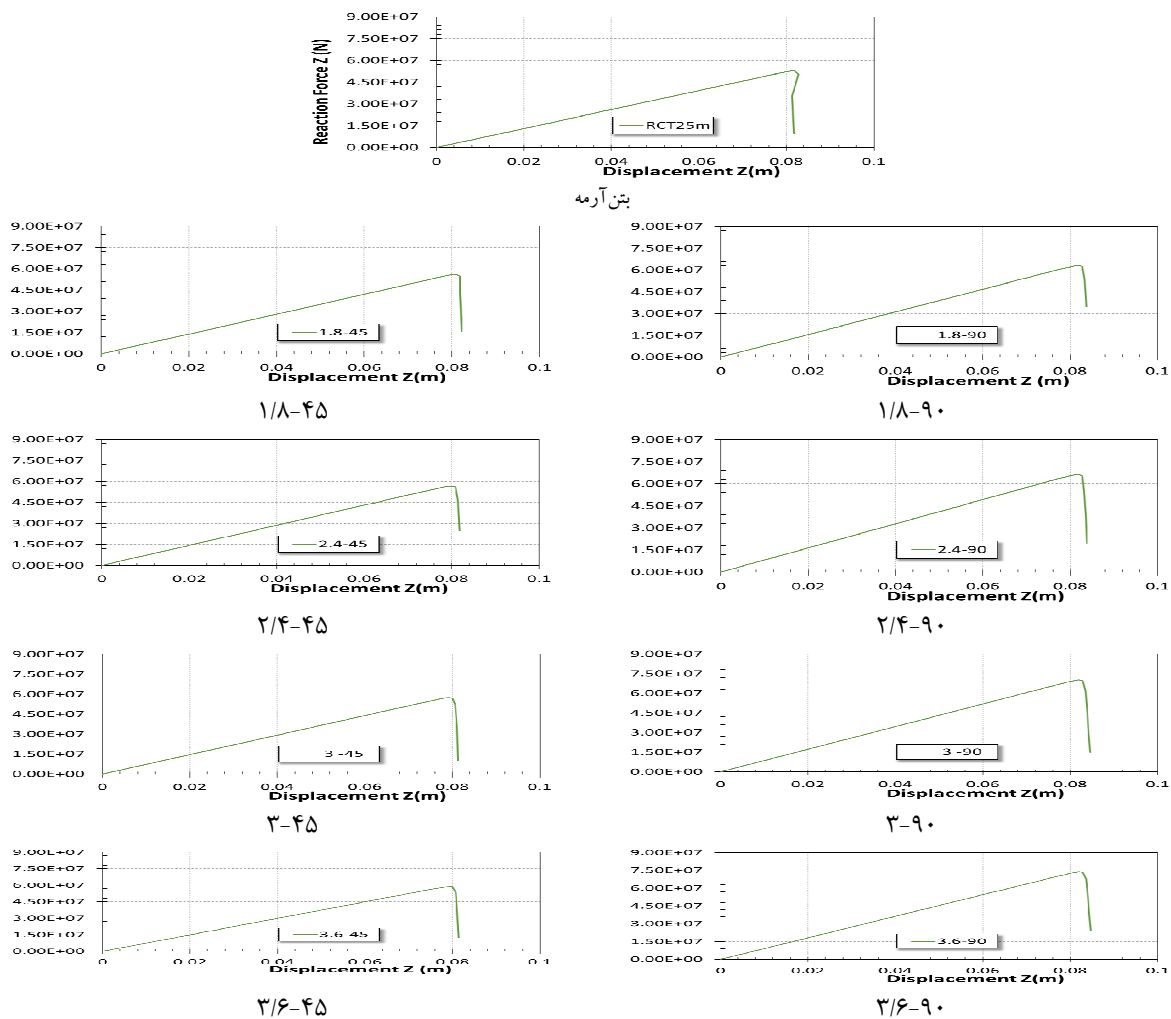


(ب)

(الف)

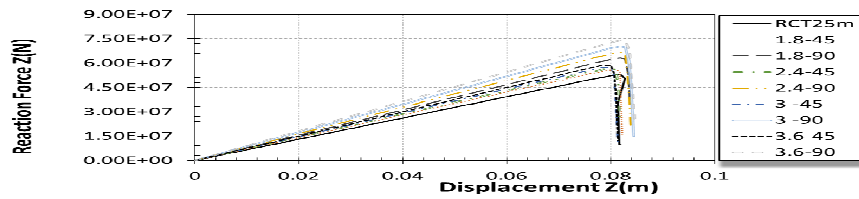
شکل ۱۵. سه مود اول کمانش برای ستون ۲۵ متری (الف) بتن آرمه (ب) ستون تقویت شده با کامپوزیت الیافی ضخامت ۱/۸ و لایه چینی ۹۰ درجه

در نمودارهای شکل زیر نیز بار بحرانی مود اول و منحنی نیرو-جابجایی هر یک از نمونه‌های ستون ۲۵ متری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه ستون‌های تقویت شده، میزان تحمل ستون در برابر بار فشاری افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه‌های تقویتی ظرفیت تحمل ستون افزایش یافته است. با توجه به نمودارها در لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳/۶، ۲/۴ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب ۴۰، ۲۶، ۳۳ و ۲۰ درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳/۶، ۲/۴ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب ۱۲، ۹ و ۸ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به میزان بار بحرانی مشاهده می‌شود که ستون‌ها با طول ۲۵ متر و قطر ۱ متر تحت بار فشاری در همه‌ی نمونه‌ها قبل از رسیدن به مود اول کمانش خود یعنی میزان بار بحرانی نمونه دچار شکسته شده‌اند، اما نسبت به نمونه‌های ۱۰ متری فاصله‌ی خیلی کمتری با مود اول کمانش خود دارند.



شکل ۱۶. بار بحرانی و منحنی نیرو جابجایی نمونه‌های مختلف ستون ۲۵ متری

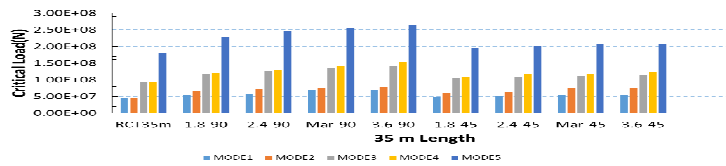
همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است نمونه‌های تقویت شده با ضخامت ۲/۴ تا ۳/۶ سانتی‌متر و زاویه لایه چینی ۹۰ درجه، ظرفیت تحمل بار بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها را داشته‌اند که این مهم نتیجه تقویت ستون با پوشش مقاوم خواهد بود و نشان دهنده این مطلب است که در این حالت شکست و بارگذاری زاویه لایه چینی ۹۰ درجه استحکام بیشتری نسبت به لایه چینی با زاویه ۴۵ درجه دربر خواهد داشت.



شکل ۱۷. منحنی نیرو-جابجایی برای همه نمونه‌های ستون ۲۵ متری

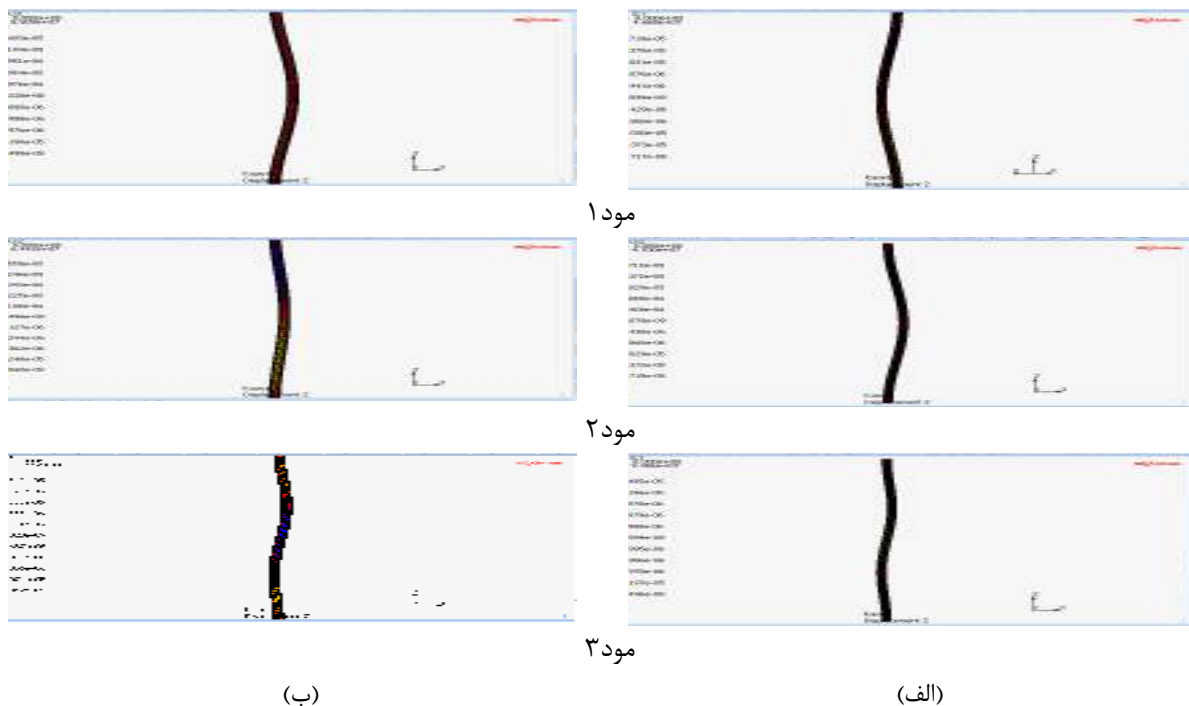
### • ستون ۳۵ متری

نیروهای بحرانی برای ۵ مود اول تغییر شکل ستون ۳۵ متری با توجه به تکنیک مقادیر ویژه مطابق با شکل زیر نتیجه خواهد شد.



شکل ۱۸. مودهای مختلف تغییر شکل ستون ۳۵ متری تحت بارمحوری

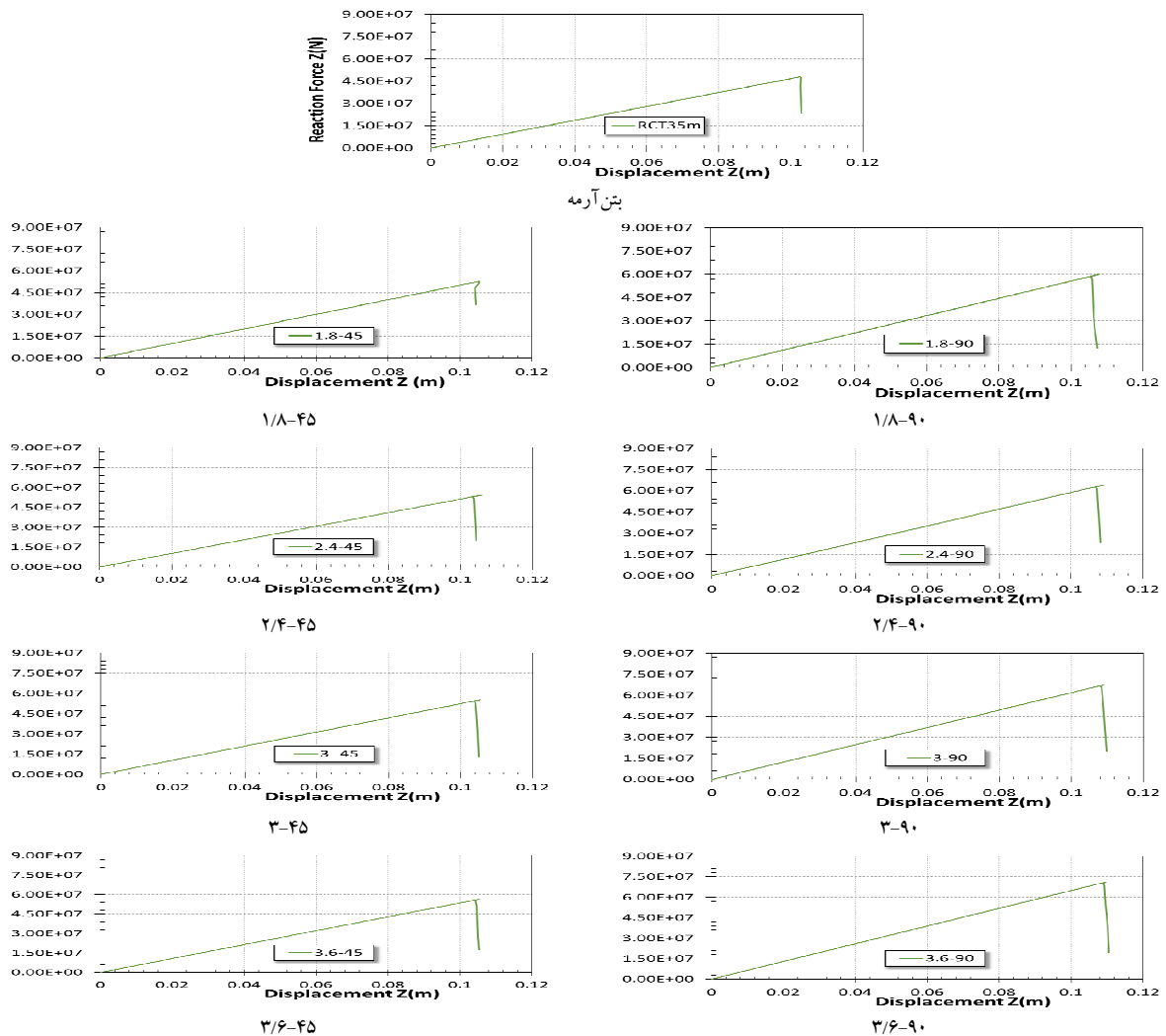
در شکل‌های زیر نیز کانتورهای تغییر شکل برای ۳ مود اول تغییر شکل ستون ۳۵ متری در لایه چینی‌های مختلف و همچنین ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۹. سه مود اول کمانش برای ستون ۳۵ متری (الف) بتن آرمه (ب) ستون تقویت شده با کامپوزیت الیافی ضخامت ۱/۸ و لایه چینی ۹۰ درجه

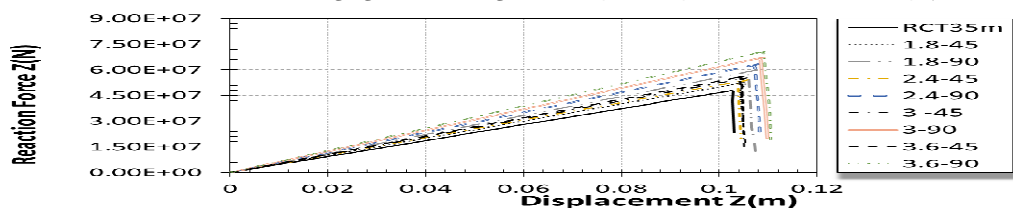
در نمودارهای شکل زیر بار بحرانی مود اول و منحنی نیرو-جابجایی هر یک از نمونه‌های ستون ۳۵ متری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه ستون‌های تقویت شده، میزان تحمل ستون در برابر بار فشاری افزایش یافته و با افزایش ضخامت لایه‌های تقویتی نیز ظرفیت بیشتری را تحمل کرده است. با توجه به نمودارها در لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳/۶، ۲/۴، ۳ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب ۱۸، ۲۶، ۳۳، ۴۰ و ۲۰ درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳/۶، ۲/۴، ۳ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۱۱ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به میزان بار بحرانی مشاهده می‌شود که ستون با طول ۳۵ متر و قطر ۳۵ سانتی‌متر تحت بار فشاری به دلیل

طول زیاد ستون وارد مود کمانش شده و سپس به شکست نهایی می‌رسد و همچنین قله‌ی نمودار تحلیل غیرخطی از میزان بار بحرانی (بار مود اول کمانش) می‌گذرد.



شکل ۲۰. بار بحرانی و منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف ستون ۳۵ متری

همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است حتی مقاوم‌ترین ستون که ستون تقویت شده با لایه کامپوزیت فیبری به ضخامت ۳/۶ سانتی متر و زاویه لایه چینی ۹۰ درجه است نیز پس از رسیدن به مود اول کمانش و گذشتن از بار بحرانی به شکست نهایی می‌رسد.



شکل ۲۱. منحنی نیرو-جابجایی برای همه نمونه‌های ستون ۳۵ متری

### ۳. نتیجه‌گیری

پوشش‌های کامپوزیت الیافی کربن علاوه بر مقاومتشان در برابر خوردگی، بر روی ستون‌های نصب‌شده در رودخانه و دریا، ظرفیت و توان تحمل ستون را افزایش می‌دهند. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش مشاهده شد که ضخامت و نحوه لایه چینی پوشش‌های مقاوم تحت بارگذاری محوری، تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت سازه بتن آرمه در مقابل کماتش دارد. با توجه به نتایج حاصل‌شده از تحلیل ستون بتن آرمه و ستون‌های تقویت‌شده نتایج زیر حاصل می‌شود.

- به طور کلی محصور نمودن بتن باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت محوری و شکل‌پذیری ستون می‌گردد. زمانی که ستون تحت اثر نیروی محوری قرار دارد با افزایش نیروی محوری بر ستون و به تناسب آن افزایش کرنش محوری و سپس کرنش‌های عرضی در ستون ایجاد می‌گردد. بنابراین زمانی که ستون به وسیله‌ی کامپوزیت پارچه الیاف کربن محصور می‌گردد کرنش‌های عرضی کنترل می‌گردد و از گسترش بارهای خارج از محور در ستون جلوگیری می‌شود، همین امر سبب افزایش ظرفیت تحمل بار محوری و نیز افزایش شکل‌پذیری ستون می‌گردد.
- با توجه به نمودارهای ستون بتنی محصور نشده و محصور شده با کامپوزیت پارچه الیاف کربن با ضخامت لایه‌های مختلف، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌های کامپوزیت پارچه الیاف کربن مقاومت نهایی و شکل‌پذیری ستون افزایش می‌یابد.
- همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارها دارای دو قسمت هستند، در ابتدای نمودارها، دیده می‌شود که اثر پوشش‌های تقویتی کامپوزیت الیافی قبل از شروع گسیختگی بتن ناچیز است و ناحیه اول نمودارها تقریباً برهم منطبق است و در ناحیه دوم، بتن از قسمتی از پایه شروع به ترک برداشتن و خرد شدن کرده و آرماتورهای آن قسمت به حداکثر کرنش خود می‌رسند، در این هنگام پوشش تقویتی کامپوزیت الیافی کاملاً فعال می‌شود، باری که در آن شیب نمودار تغییر می‌کند، نقطه‌ای است که بتن شروع به گسیخته شدن می‌کند و زمانی که پوشش تقویتی کامپوزیت الیافی کاملاً فعال می‌شود، اثر سختی لایه‌های کامپوزیت الیافی در رفتار بار و کرنش اهمیت پیدا می‌کند.
- در نمونه‌های ۱۰ متری با توجه به نمودارها در زاویه لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 33، 40، 26 و 19 درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 12، 10، 9 و 7 درصد افزایش داشته است.
- در نمونه‌های ۲۵ متری با توجه به نمودارها در لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 33، 40، 26 و 20 درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 12، 9، 8 و 7 درصد افزایش داشته است.
- در نمونه‌های ۳۵ متری با توجه به نمودارها در لایه چینی ۹۰ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 41، 49، 34 و 26 درصد و در زاویه لایه چینی ۴۵ درجه با ضخامت ۳، ۴، ۳/۶ و ۱/۸ سانتی‌متر، ظرفیت تحمل ستون در برابر بار فشاری به ترتیب 18، 16، 14 و 11 درصد افزایش داشته است.
- تقویت ستون بتن آرمه با کامپوزیت پلیمر الیافی کربن در این نوع بارگذاری، در همه‌ی ضخامت‌ها و زاویه‌ها، از بین سه حالت شکست در حالت سوم، یعنی در نمونه‌های ۳۵ متری که حالت شکست را تقریباً کماتش خالص در نظر گرفتیم، بیشترین تأثیر را داشته است.
- از بین زاویه‌های لایه چینی بررسی شده، زاویه لایه چینی ۹۰ درجه در کلیه حالات شکست بیشترین تأثیر را نسبت به زاویه ۴۵ درجه داشت و با افزایش ضخامت، در هر دو زاویه لایه چینی، در هر یک از سه نوع حالت شکست، ظرفیت تحمل ستون نیز افزایش داشته است.

### ۴. مراجع

[۱] Engineering Structures ۲۴ (۲۰۰۲) ۳۸۵-۳۹۵.

- [۲] Massimiliano Bocciarelli, Marco Andrea Pisani. "Modified force method for the nonlinear analysis of FRP reinforced concrete beams". Composite Structures ۱۳۱ (۲۰۱۵) ۶۴۵-۶۵۳.
- [۳] Bensaïd, Ismail. Kerboua, Bachir. Cheikh Abdelmajid, "Interfacial stresses analysis of damaged structures strengthened with bonded prestressed FRP plate having variable fiber spacing", International Journal of Structural Integrity, Vol. ۶ Iss ۲ pp. ۱۵۹ – ۱۷۵. (2015).
- [۴] Hadi Baghi, Joaquim A.O. Barros. "New Approach to Predict Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM Technique".
- [۵] Enio Deneko, Esmerald Filaj, Erdit Leka, Anjeza Gjini Altin Bidaj. "AXIAL CAPACITY OF FRP -CONFINED REINFORCED CONCRETE MEMBERS UNDER CONCENTRIC OR SLIGHTLY ECCENTRIC FORCE" The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, ۲۰۱۵, Issue ۴۸.
- [۶] Erki, M. A. , and Rizkalla, S. H. , "Anchorage for FRP Reinforcement," Concrete International, 1993, pp. 54-59.
- [۷] MATTHEW HUSSAK. "FATIGUE LIFE PERFORMANCE OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH C FRP ". HUNTSVILLE, ALABAMA . ۲۰۱۵.
- [۸] Aws Hasak. "PERFORMANCE OF FRP STRENGTHENED CONCRETE COLUMNS UNDER SIMULATED BLAST LOADING". Department of Civil Engineering Faculty of Engineering University of Ottawa Aws Hasak, Ottawa, Canada, ۲۰۱۵.
- [۹] Debonding failure analysis of FRP-retrofitted concrete panel under blast loading ". Structural Engineering and Mechanics, Vol. ۳۸, No. ۴ (۲۰۱۱) ۴۷۹-۵۰۱
- [۱۰] S. Timoshenko. Strength of Materials, Part ۱ and Part ۲ (۳th ed.). R. E. Krieger Publishing Company. ISBN ۹۷۸-۰-۸۹۸۷۴-621-1 (1983)
- [۱۱] Jijin V., Preetha Prabhakaran. "COMPARATIVE STUDY ON G FRP JACKETED RC COLUMNS AND C FRP JACKETED RC COLUMNS OF DIFFERENT SHAPES". International Journal of Engineering Research and General Science Volume ۳, Issue ۵, September-October, 2015 ISSN 2091-2730.
- [۱۲] Rodríguez-Castellanos, A., Rodríguez-Sánchez, J.E., Núñez-Farfán, J., Olivera-Villaseñor, R.E. (۲۰۰۶). "Crack effects on the propagation of elastic waves in structural elements". Revista mexicana de física, vol. ۵۲, pp. ۱۰۴-۱۱۰.
- [۱۳] Hamada, H. , Fukute, T. , and Yamamoto, K. , "Bending Behavior of Unbounded Prestressed Concrete Beams Prestressed with C FRP Rods," Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, Sheffield, ۱۹۹۲, pp. ۱۰۱۵-۱۰۲۶.
- [۱۴] Erki, M. A. , and Rizkalla, S. H. , "Anchorage for FRP Reinforcement," Concrete International, 1993, pp. 54-59.
- [۱۵] صادقی، کبیر. "مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی". نشر دانشکده صنعت آب و برق (شهید عباسپور). ۱۳۸۰.
- [۱۶] Rubio-Gonzalez, C., Mason, j. (۲۰۰۲). "Dynamic stress intensity factor due to concentrated loads on a propagating semi-infinite crack in orthotropic materials". International journal of fracture, vol. 118, pp. 77-96