

## مقاوم‌سازی تیرهای ساده پیش‌تنیده با استفاده از الیاف پلیمری تقویتی کربن

### و شیشه

سیدفتح اله ساجدی\*

دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

امین تولابی شیخی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

f\_sajedi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸

### چکیده

در این پژوهش بعد از سنجش توانایی نرم افزار آباکوس و اطمینان از نتایج، دو عدد تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی نشده به‌عنوان مدل‌های مرجع و ۲۴ عدد تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی کربن و شیشه و کاربرد بتن‌های با مقاومت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال و کابل‌های پیش‌تنیدگی به اقطار ۱۶، ۲۰ و ۲۲ میلی‌متر مدل‌سازی شدند. پس از تحلیل عددی تیرهای بتن مسلح پیش‌تنیده با و بدون الیاف تقویتی، ظرفیت باربری آنها بررسی شد. نتیجه شد که در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، ترک‌های حاصل از خسارت کششی در مقطع میانی تیرها با حداکثر تنش، به شکل پیوسته به سمت تکیه‌گاه‌ها با شیب ملایم کاهش یافته‌اند. در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، بیش‌ترین تنش‌ها در آرماتورهای کششی در پایین تیر ایجاد شدند و در آرماتورهای برشی نیز تنش در مقطع میانی تیرها شروع شده و در وجه پایین مقطع تیر بیشینه خود را نشان دادند. به‌علاوه، در تیرهای ساده بتنی پیش‌تنیده با افزایش تعداد کابل‌های پیش‌تنیدگی از ۱ به ۲ و ۳، ظرفیت افزایش یافت؛ ظرفیت تیرهای دارای ۳ کابل، نسبت به تیرهای دارای ۱ و ۲ کابل به ترتیب، ۷۹٪ و ۲۲٪ افزایش داشتند. ظرفیت تیرهای بتنی پیش‌تنیده با بتن ۵۰ مگاپاسکال به تیرهای بتنی پیش‌تنیده ساخته شده از بتن‌های با مقاومت ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب به میزان، ۶٪ و ۵٪ افزایش نشان دادند. با مقایسه مدل‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از الیاف کربن نسبت به شیشه، به‌طور میانگین ظرفیت در تیرهای حاوی الیاف کربن نسبت به تیرهای حاوی الیاف شیشه، حدود ۱۲٪ افزایش داشته است.

**کلید واژگان:** پیش‌تنیدگی، مقاوم‌سازی، تیر ساده پیش‌تنیده، الیاف کربن و شیشه، نرم‌افزار آباکوس

## ۱- مقدمه

امروزه بسیاری از سازه‌های بتن مسلح موجود بنا به دلایلی از قبیل تغییرات کاربری، تغییرات الزامات آیین‌نامه‌ای نسبت به گذشته، افزایش بارهای وارد بر سازه، عدم طراحی درست، و بی‌دقتی در اجراء دچار مشکل در ظرفیت باربری یا خدمات‌رسانی هستند. از آنجا که هزینه تخریب و ساخت ساختمان جدید بسیار سنگین و غیراقتصادی است، بحث مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری تقویتی، کاربردی‌ترین روش در جهان صنعتی تلقی می‌شود. استفاده از سازه‌های بتنی در ایران رو به افزایش است و به دلایل مختلف از جمله تغییر کاربری سازه‌ها و بازنگری آیین‌نامه‌های بارگذاری، تیرهای سراسری اغلب نیاز به ترمیم و مقاوم‌سازی دارند. با پیش‌تنیده کردن تیرهای بتنی باعث افزایش ظرفیت‌های خمشی و برشی این گونه تیرها شده و سبب ازدیاد مقاومت سازه و ازدیاد طول دهانه تیرها می‌شود. این عمل به منظور کاهش یا حذف اثر نیروهای کششی داخلی بتن و در راستای وارسی یا حذف ترک خوردگی آن و همچنین استفاده از کل ظرفیت فشاری مقطع بتنی، صورت می‌پذیرد که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ سازه‌ای مقرون به صرفه است. نیاز به ترمیم و تقویت اعضای بتنی را می‌توان با روش‌های استفاده از الیاف پلیمری تقویتی انجام داد. استفاده از الیاف پلیمری در ساختمان‌های بزرگ و تجاری و ابنیه‌های تاریخی که هزینه تخریب و بازسازی آنها زیاد است، مد توجه می‌باشد. با توجه به زلزله خیز بودن کشور، نیاز به تقویت سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد. این طرح این امکان را به وجود می‌آورد که بدون تخریب سازه با تقویت به وسیله مواد مرکب، مقاومت لازم را برای بهره‌برداری مجدد از سازه امکان‌پذیر سازد [۱]. پیش‌تنیدگی عبارت است از ایجاد یک تنش ثابت و دائمی در یک عضو بتنی به نحوه دلخواه و به اندازه لازم به نحوی که، در اثر این تنش میزانی از تنش‌های ناشی از بارهای مرده و زنده عضو خنثی شده و در نتیجه مقاومت و باربری آن افزایش پیدا می‌کند. [۲]. در ابتدای قرن بیستم یک مهندس فرانسوی به نام یوجین فریسینه با استفاده از برخورد منطقی با مساله، با استفاده از آرماتورهای فولادی با مقاومت بالا، روش پیش‌تنیدگی با موفقیت به کار برده شود. از این زمان به بعد، بتن پیش‌تنیده به عنوان یک روش ساخت قابل قبول استفاده شد و امروزه در بسیاری از کشورهای در حال توسعه در دسترس است. نکته کلیدی در اعضای پیش‌تنیده، استفاده از فولاد با مقاومت بالا است، طوری که اتلاف تنش‌ها درصد کمی از پیش‌تنیدگی اولیه

عضو را تشکیل می‌دهند [۳]. در روش پیش‌تنیده به جای آرماتورهای معمولی از یک سری کابل‌های با مقاومت کششی بالا استفاده می‌شود که این کابل‌ها تحت کشش زیادی قرار گرفته و در دو انتهای تیر توسط گره‌های مخصوص تثبیت می‌شوند. به این ترتیب کابل‌های پیش‌کشیده پس از رها شدن از کشش تمایل به جمع شدن و رسیدن به حالت اولیه داشته و لذا یک نیروی فشاری زیاد در قسمت زیرین تار خنثی در بتن ایجاد می‌کنند که به تبع این نیرو در مقابل نیروی کششی که به واسطه بارهای ثقلی در بتن ایجاد می‌شود، قرار می‌گیرد. بنابراین این کابل‌ها میزانی از نیروهای ناشی از بارهای ثقلی را خنثی نموده و مقطع قابلیت پذیرش بارهای بیشتری را خواهد داشت [۴]. یکی از مصالحی که اخیراً به خاطر خواص مقاومت مطلوب آن در مقاوم‌سازی و تقویت اعضای بتن مسلح مد نظر قرار گرفته است، الیاف پلیمری تقویتی است [۵]. استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف، به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه‌های موجود معرفی شده است [۶].

تحلیل غیرخطی تیرهای پیش‌تنیده با ورق الیاف شیشه به روش اجزای محدود، عنوان پژوهشی از ایزدی‌نیا و شریفی که به روش عددی برای تحلیل کامل تیرهای خمشی پیش‌تنیده، تقویت شده با ورق‌های پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه با تمرکز بر رفتار شکل‌پذیری و مقاومت خمشی بررسی کردند. پیش‌تنیده نمودن سازه‌های بتنی باعث افزایش ظرفیت خمشی این گونه سازه‌ها شده و سبب ازدیاد مقاومت سازه‌ها و طول دهانه و همین‌طور کاهش تغییر مکان تیرها را به دنبال دارد، که از لحاظ کارآمدی و سازه‌ای مقرون به صرفه است. بررسی شکل‌پذیری این سازه‌ها که امروزه بسیار استفاده می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا که بیانگر توان سازه در تغییر شکل غیرارتجاعی قبل از تخریب اعضا می‌باشد. در پژوهش حاضر سعی بر آن است که تاثیر استفاده از ورق الیاف شیشه پیش‌تنیده بر شکل‌پذیری و تغییر شکل، بر رفتار تیرهای مقاوم‌سازی شده به این روش بررسی شود. به طور خلاصه نتایج این پژوهش حاکی از آن است که استفاده از ورق الیاف شیشه مقاوم‌سازی شده باعث می‌شود تا میزان جابجایی تیر بر اثر نیرو دارای کم‌ترین میزان و استفاده از ورق تقویتی الیاف شیشه موجب افزایش ۱۰٪ و ۴٪ بر سختی خمشی و شکل‌پذیری گردد [۷]. یاپر و همکاران در پژوهشی مدل‌سازی دقیق تیرهای

<sup>3</sup> Yapar et al.

<sup>1</sup> Eugene Freyssinet

<sup>2</sup> Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP)

است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که شرایط اتصال کابل‌های پیش‌تنیده با الیاف پلیمری تقویتی تاثیر قابل توجهی بر پاسخ خمشی تیرهای پیش‌تنیده با استفاده از الیاف پلیمری تقویتی، از جمله حالت شکست دارد [۱۱].

ژنگ و همکاران<sup>۵</sup> در پژوهش خود مقایسه این تیرها را از منظر تاریخچه تغییرشکل بر اثر ضربه، کرنش‌های بتن و پیش‌تنیدگی کابل و فرآیند ترک‌خوردگی بررسی نمودند.

از نوآوری این پژوهش این است که ویژگی‌های اصلی تخریب و گسیختگی در سازه‌ها، از جمله تو سعه ترک‌خوردگی بتن و اثرات تسلیم آن را بررسی نموده است [۱۲]. بتن پیش‌تنیده با کابل‌های نچسبیده داخلی یک گزینه سازه‌ای عالی برای تیرها و دال‌های بتنی شناخته شده است. راه‌حل‌های عددی برای تحلیل چنین سازه‌هایی هنوز یک زمینه فعال پژوهشی هستند. این کار یک مدل المان محدود برای تحلیل غیرخطی هندسی تیرهای پیش‌تنیده با کابل‌های نچسبیده داخلی تحت بارگذاری کوتاه مدت ارائه می‌کند [۱۳]. بنابراین، هدف تحقیق این است که تیرهای ساده پیش‌تنیده با استفاده از الیاف پلیمری تقویتی کربن و شیشه و کاربرد نرم‌افزار آباکوس مقاوم‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردند.

## ۲- شبیه‌سازی نمونه آزمایشگاهی

شبیه‌سازی نمونه در نرم‌افزار با استفاده از مقاله لی و همکاران<sup>۴</sup> با موضوع تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح انجام شد [۱۴]. در این مقاله از مشخصات هندسی تیر بتن مسلح مطابق شکل ۱ استفاده شد. مشخصات مصالح فولادی مدل آزمایشگاهی مذکور مطابق جدول ۱ می‌باشند. مقاومت فشاری بتن مصرفی ۳۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد ۴۸۰ مگاپاسکال منظور شدند.

پیش‌تنیده به روش اجزاء محدود را انجام دادند. در این پژوهش یک مدل المان محدود به‌روش غیرخطی برای تیرهای پیش‌تنیده در نظر گرفته شد. پژوهش انجام شده در اینجا گام مهمی است، زیرا برای اولین بار است که یک تیر پیش‌تنیده به‌طور موفقیت‌آمیزی با تحلیل المان محدود غیرخطی مدل‌سازی شده و امکان ایجاد حالت خمیری، رفتار صحیح شکست بتن، خسارت اتصال و لغزش در چسبندگی را برای رشته‌ها (کابل) پیش‌تنیده فراهم می‌کند [۸]. موعواد و همکاران<sup>۶</sup> نشان دادند که افزایش خوردگی فولاد تقویت شده یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین علل تخریب سازه‌های بتنی است. این مطالعه نتایج پژوهش‌های تجربی عملکرد و رفتار تیرهای پیش‌تنیده، با مقاومت فشاری ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال در معرض خوردگی را نشان می‌دهد. نحوه شکست و کرنش آرماتور فولادی، ترک‌خوردگی، تسلیم، بار نهایی و خیز متناظر هر تیر و عرض ترک و توزیع ثبت شد. نتایج مقاله اشاره دارد به: ۱- افزایش مقاومت فشاری از فشار ۴۰ به ۸۰ مگاپاسکال برای تیرهای بتنی پیش‌تنیده منجر به افزایش اندکی در ظرفیت خمشی نهایی و سختی اولیه ناشی از خوردگی به ترتیب به میزان ۷٪ و ۱۱٪ شد. ۲- افزایش مقاومت فشاری از ۴۰ به ۸۰ مگاپاسکال برای تیرهای پیش‌تنیده منجر به کاهش شکل‌پذیری ناشی از خوردگی به میزان ۲۲٪ می‌شود. هدف از مقاله، بررسی رفتار فولاد در برابر خوردگی است که باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی، سختی و شکل‌پذیری گردید [۹]. نادرپور و همکاران در پژوهشی تحت عنوان طراحی بهینه عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> به بهینه‌سازی عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده جعبه‌ای پرداختند. هدف از پژوهش، کاهش وزن عرشه پل و صرفه‌جویی در مصالح مصرفی و کاهش نیروهای زلزله وارد بر پل است. در این بهینه‌سازی، متغیرهای گوناگون از جمله ابعاد اجزای مختلف سطح مقطع عرشه، تعداد کابل‌ها، آرایش کابل‌ها، نسبت آرماتور کششی دال بالا و دال طره و میزان نیروی کشش جک در نظر گرفته شده است [۱۰]. لو و همکاران<sup>۴</sup> طی پژوهشی نشان دادند که رابطه‌ای بین اثر پیوستگی کابل‌های پیش‌تنیده مرکب و بتن بر رفتار کوتاه مدت تیرهای پیش‌تنیده با الیاف پلیمری تقویتی وجود دارد. براساس یک مدل غیرخطی که کالیبره شده با استفاده از داده‌های تجربی، آزمایش‌های عددی بر روی هر دو مدل به صورت ساده انجام شده

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

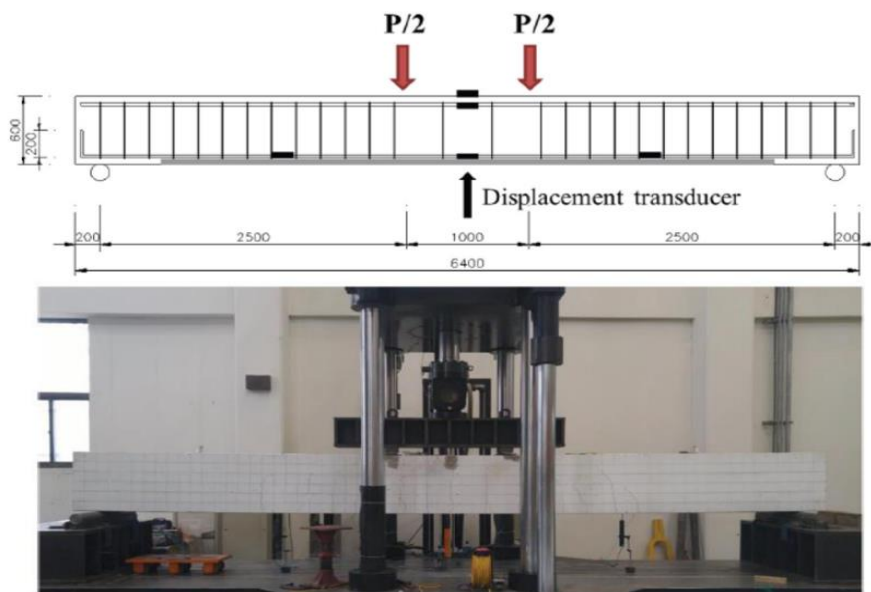
<sup>5</sup> Zhang et al.

<sup>6</sup> Lee et al.

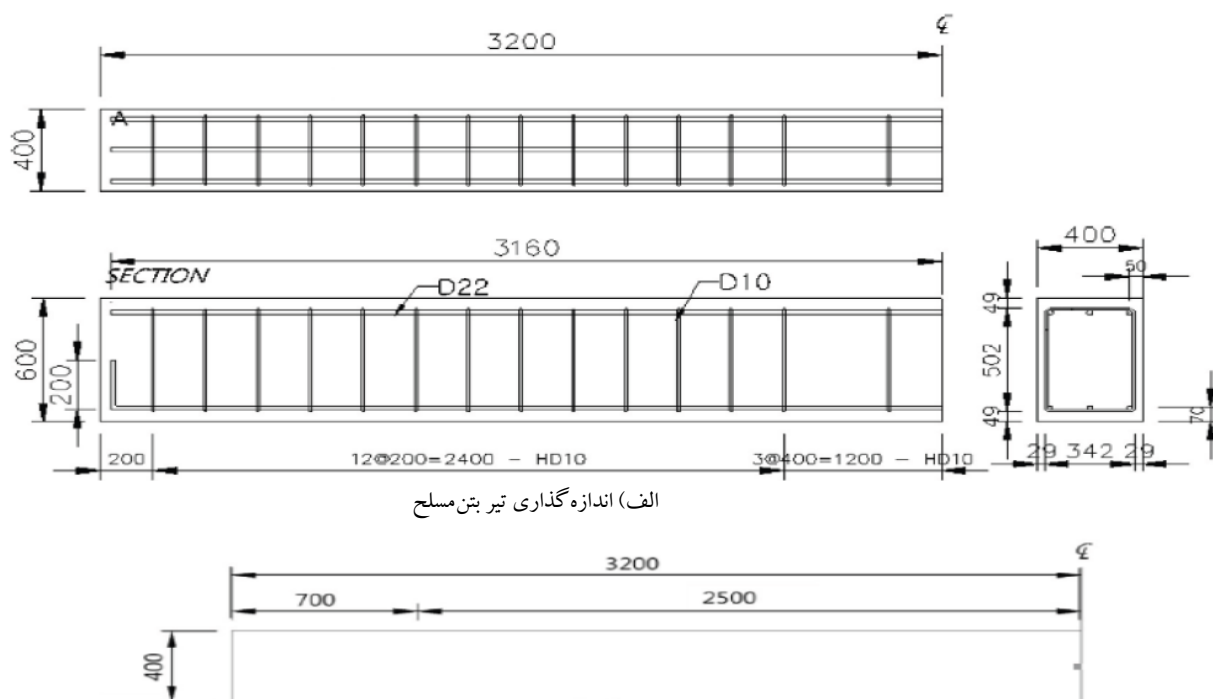
<sup>1</sup> Tendons

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

<sup>3</sup> Genetic Algorithm (GA)



شکل ۱- نمای کلی مدل آزمایشگاهی [۱۴]



الف) اندازه گذاری تیر بتن مسلح

شکل ۲- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی [۱۴]

جدول ۱- مشخصات مصالح فولادی مدل آزمایشگاهی [۱۴]

جرم مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	ضریب ارتجاعی استاتیکی (MPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)	کرنش تسلیم (%)
۷۸۵۰	۲۱۰۰۰۰	۰/۳	۴۸۰	۰/۲

## ۱-۲- فرآیند مدل سازی در نرم افزار آباکوس

### ۱) تعریف هندسه مدل

برای ترسیم المان های لازم در آباکوس، ابتدا در ماژول پارت سطح مقطع المان ترسیم و سپس عمق لازم اختصاص داده می شود. المان های مد نظر از نوع Solid، برای آرماتورها در نرم افزار آباکوس وجود دارد. این مدل ها وابسته به محصول انتخابی برای تحلیل می باشد. برای انجام این کار از ماژول خواص مصالح استفاده می شود.

### ۲) تعریف مشخصات مصالح قطعه مد نظر

سه مدل ساختاری مختلف برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح بتن و ترک خوردگی آن، تحت فشار محصورکنندگی کم، در می دهد. اما قیود تعریف شده در ماژول اندرکنش در واقع قیود اعمال شده بر درجات آزادی در یک تحلیل است که ناشی از تاثیر حرکت یک بخش از مدول بر بخش دیگر است. در این ماژول تماس بین قطعات اغلب از نوع Tie بوده و برای برقراری تماس بین آرماتورها و بتن از قید ناحیه محصور شده استفاده شده که همه آرماتورها را در داخل بتن مدفون می کند.

### ۳) سرهم بندی قطعات در ماژول پارت

المان هایی که در ماژول پارت ساخته شده اند لازم است در این قسمت به کمک ابزارهایی مانند دوران و جابجایی در موقعیت نهایی خود قرار بگیرند.

### ۴) تعریف مراحل تحلیل، نوع آن و خروجی های لازم

در ماژول گام نوع تحلیل عددی در نرم افزار تعریف می شود. مطابق مقاله مذکور با توجه به سرعت کم بارگذاری از تحلیل استاتیکی بهره گرفته شده است. اکثر فلزات در کرنش های پایین دارای رابطه تنش-کرنش نسبتاً خطی هستند، ولی در کرنش های بالاتر، ماده تسلیم شده و به ناحیه خمیری وارد می شود که در این حالت منحنی تنش-کرنش از نقطه تسلیم به بعد غیرخطی می شود. اثرات غیرخطی از نوع ماده ممکن است به عواملی غیر از کرنش مربوط باشد. موادی که تابع نرخ کرنش هستند از نمونه های اثرات غیرخطی ماده محسوب می شوند. مدل سازی تحقیق برای تحلیل از روش استاتیکی غیرخطی با زمان یک ثانیه استفاده شده است.

### ۵) مدل سازی نوع و نحوه تاثیر سطوح تماس قطعات

قیود موجود در ماژول سرهم بندی روی موقعیت های اولیه نمونه ها اعمال شده و چیدمان آن ها را در کنار یکدیگر شکل Wire استفاده می شود.

## ۶) بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

برای اعمال بارهای خارجی، مکانیکی، حرارتی، صوتی و الکتریکی و همچنین تعیین شرایط مرزی مسأله می توان از ماژول بار استفاده کرد. در ماژول بار می توان هر نوع بارگذاری را تابع زمان (در مسائل دینامیکی) یا تابع موقعیت تعریف نمود و همه شرایط مرزی در این قسمت تعریف می شوند. بنا به نوع تحلیل می توان بیشترین بار را به صورت تک مرحله ای یا چند مرحله ای به نمونه اعمال نمود که در نمونه مدل سازی شده از تحلیل چرخه ای استفاده شده است. در نرم افزار آباکوس شرایط مرزی و بارها وابسته به گام های تعریف شده می باشند، به این معنی که لازم است توسط کاربر تعیین شود بار وارده در چه گام یا گام هایی فعال یا غیرفعال باشد. در ادامه روند تعریف شرایط مرزی و اعمال جابجایی تشریح شده است.

## ۷) شبکه سازی و تخصیص نوع المان

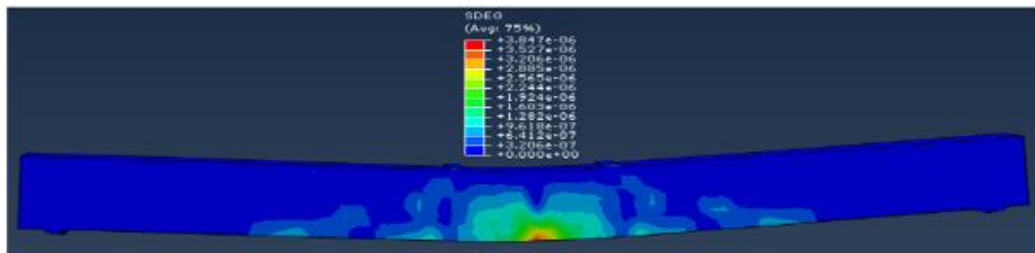
ماژول شبکه سازی است که گسسته سازی مدل هندسی قطعات در آن انجام می شود. در این ماژول متناسب با مسأله مد نظر برای هر بخش یک المان انتخاب شده و کل مدل هندسی با استفاده از المان های مناسب گسسته سازی می شود. در ادامه به مقایسه نیروی به دست آمده از پنج شبکه سازی مختلف در اندازه های ۷۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ میلی متر مطابق اشکال ۴ تا ۶ به همراه تحلیل همگرایی پرداخته می شود، تا مناسب ترین اندازه شبکه انتخاب شود. نحوه تخصیص خواص شبکه، مانند اندازه شبکه، روش های شبکه بندی و نوع المان ها در عملیات شبکه بندی، بسیار مهم هستند. نام شبکه استفاده شونده در این تحقیق C3D8R می باشد که یک المان ۸ گرهی با روش حل تحلیل کاهش یافته می باشد. در این نوع شبکه برای المان تیر بتنی اندازه شبکه برابر ۱۲۰ میلی متر انتخاب شده است.

## ۸) ساخت فایل ورودی و انجام تحلیل نوع شبکه

بعد از انجام تنظیمات لازم تا این مرحله، نوبت به تحلیل نمونه عددی می رسد. در شکل ۳ توزیع ترک در حالات عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. دیده می شود که توزیع ترک های کششی در تحلیل عددی بسیار نزدیک به مدل آزمایشگاهی می باشد.

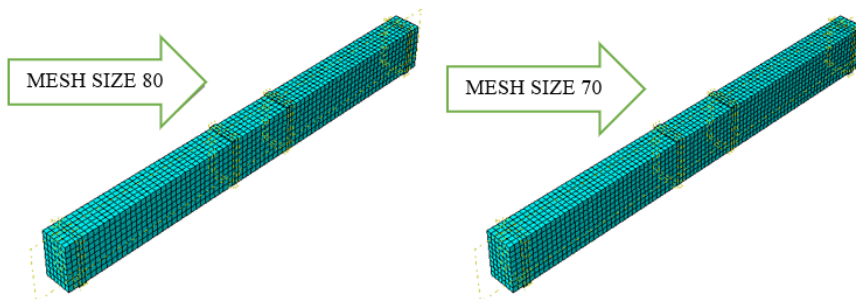


(الف) نمایش ترک در آزمایشگاه

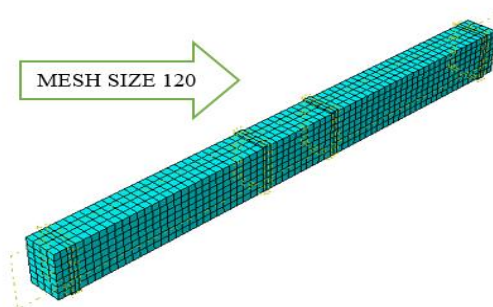


(ب) نمایش ترک در نرم افزار

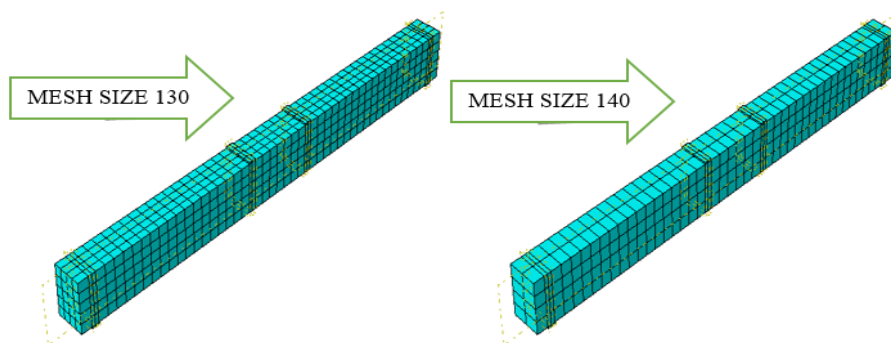
شکل ۳- توزیع ترک و منحنی‌های توزیع تنش فون مایسز در مدل‌های آزمایشگاهی (الف) و نرم‌افزاری (ب) با اندازه شبکه ۱۲۰ میلی‌متر



شکل ۴- مدل نهایی شبکه‌سازی با اندازه شبکه ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر

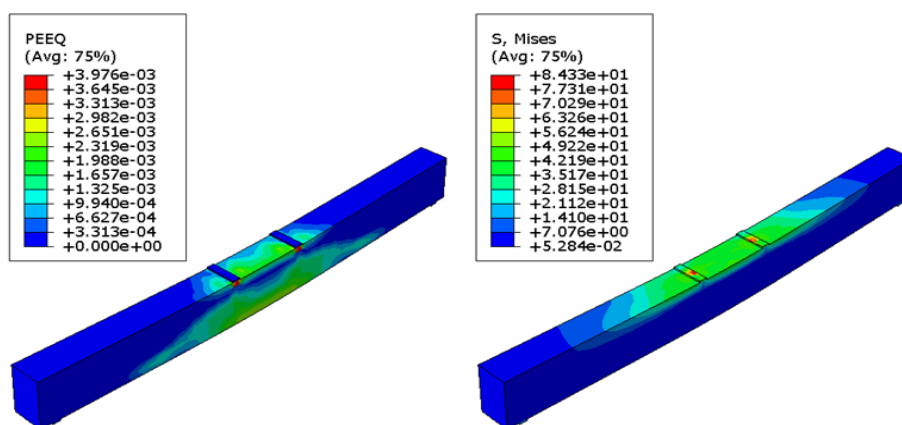


شکل ۵- مدل نهایی شبکه‌سازی با اندازه شبکه ۱۲۰ میلی‌متر

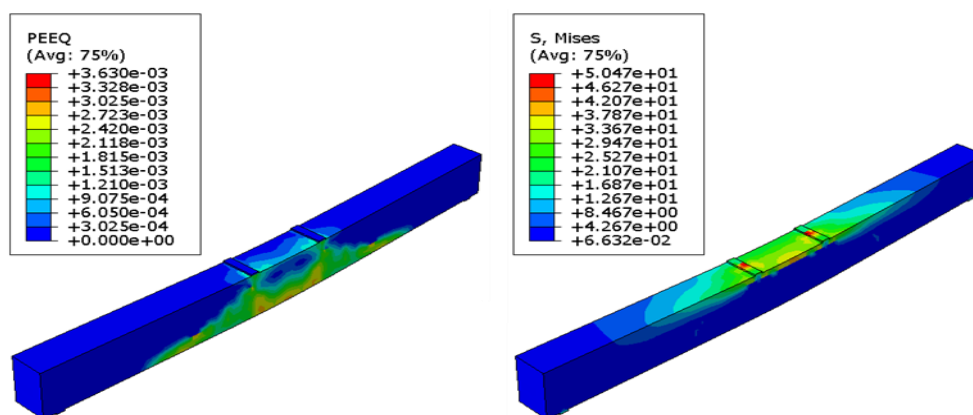


شکل ۶- مدل نهایی شبکه‌سازی با اندازه شبکه ۱۳۰ و ۱۴۰ میلی‌متر

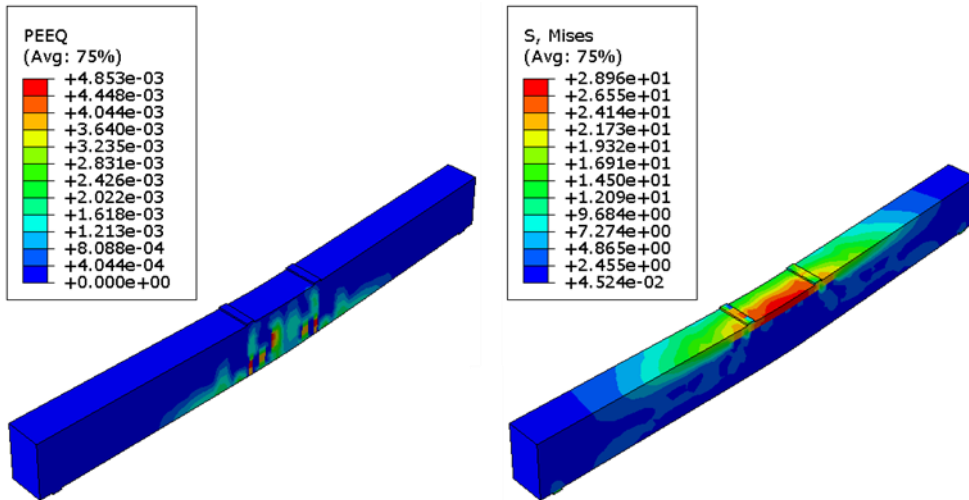
در اشکال ۷ تا ۱۱ منحنی تنش فون مایسز و کرنش خمیری ایجاد شده در نمونه‌های مدل شده در پنج اندازه شبکه مختلف نشان داده شده است.



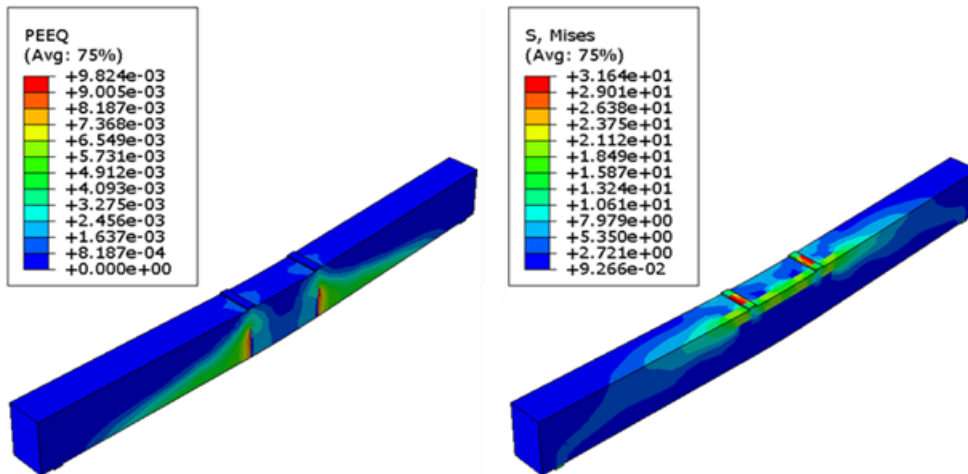
شکل ۷- توزیع تنش فون مایسز و کرنش خمیری در مدل با اندازه شبکه ۷۰ mm در نقطه حداکثر



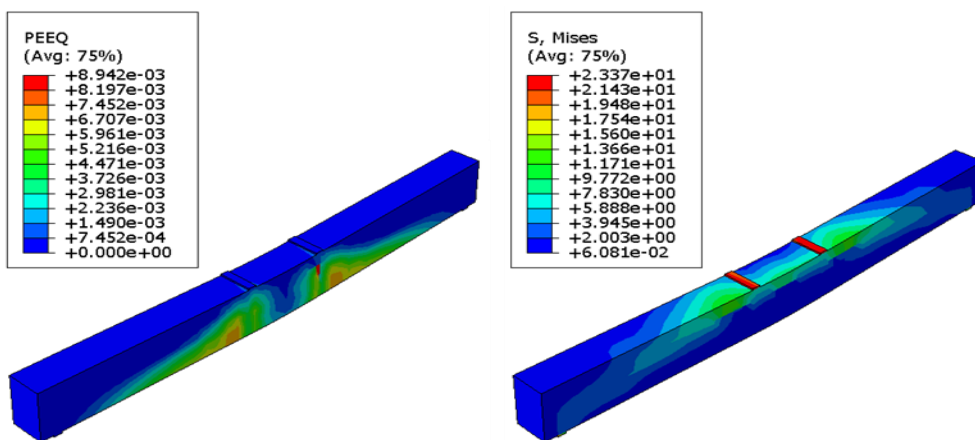
شکل ۸- توزیع تنش فون مایسز و کرنش خمیری در مدل با اندازه شبکه ۸۰ mm در نقطه حداکثر



شکل ۹- توزیع تنش فون مایسز و کرنش خمیری در مدل با اندازه شبکه **120 mm** در نقطه حداکثر



شکل ۱۰- توزیع تنش فون مایسز و کرنش خمیری در مدل با اندازه شبکه **130 mm** در نقطه حداکثر

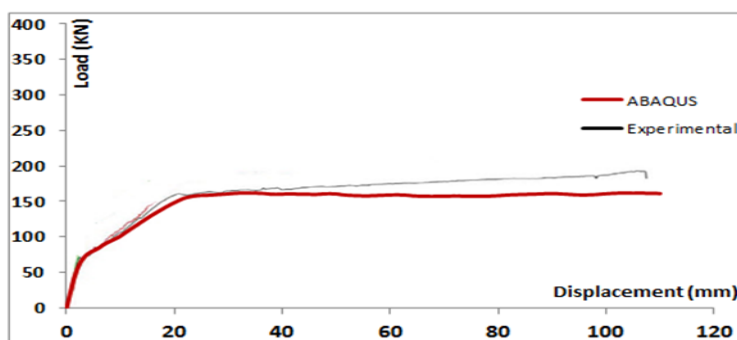


شکل ۱۱- توزیع تنش فون مایسز و کرنش خمیری در مدل با اندازه شبکه **140 mm** در نقطه حداکثر

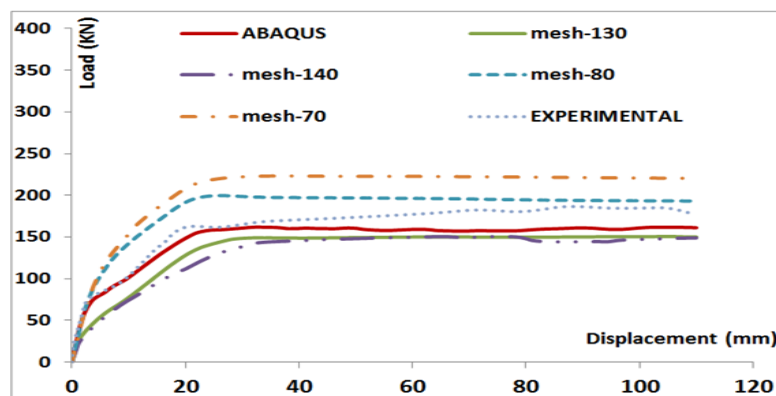


پیدا کرده است. برای در نظر گرفتن کمترین اختلاف بین مدل‌های ساخته شده با مدل آزمایشگاهی علاوه بر ظرفیت باربری نهایی انتهای منحنی باید سختی و نقاط تسلیم شدگی نیز از هماهنگی خوبی برخوردار باشد، که این نکته در منحنی‌های استخراج شده به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل ۱۲ منحنی نیرو-تغییر مکان حاصل از بارگذاری مونوتونیک نشان داده شده است. دیده می‌شود که در مدل با اندازه شبکه ۱۲۰ میلی‌متر تقریباً "همگرایی بهتری به دست آمده و نتیجه مدل‌سازی عددی به نتیجه مدل آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و این نشان می‌دهد که منطق شبیه‌سازی نرم‌افزار برای این مدل با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی



شکل ۱۲- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان مدل‌های عددی و آزمایشگاهی



شکل- مقایسه نتایج مدل‌های عددی با مدل آزمایشگاهی در پنج اندازه شبکه‌سازی مختلف

جدول ۲- درصد خطا بین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در شبکه‌سازی‌های مختلف

خطا (%)	نیروی تسلیم شدگی (kN)	خطا (%)	نیروی نهایی (kN)	اندازه شبکه در مدل‌های عددی (mm)
۴۰	۲۱۷	۲۵	۲۲۳	۷۰
۲۶	۱۹۶	۱۲	۲۰۰	۸۰
۲	۱۵۳	۷	۱۶۶	۱۲۰
۸	۱۴۴	۱۵	۱۵۱	۱۳۰
۹	۱۴۱	۱۶	۱۵۰	۱۴۰
-	۱۵۶	-	۱۷۹	مدل آزمایشگاهی

### ۳-مدل سازی

M13: مدل شماره ۱۳، PSB: تیر پیش تنیده، 2T: دارای دو کابل پیش تنیدگی، 7CFRP-U@10 cm: استفاده از هفت لایه ورق CFRP به صورت U شکل به فاصله ۱۰ سانتی متر از یکدیگر در طول تیر و در طرفین جان و عرض پایین مقطع تیر C30: بتن مصرفی رده ۳۰

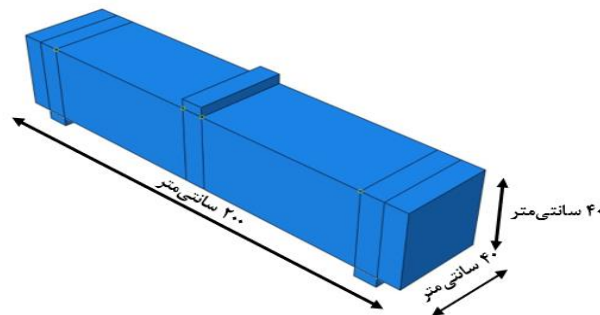
#### ۳-۲- هندسه مدل های اجزاء محدود

برای ایجاد هنسه مدل از ماژول پارت استفاده شده است. در شکل ۱۴ نحوه مدل سازی تیر در نرم افزار آباکوس نشان داده شده است. برای مدل سازی المان های بتنی تیر از المان سه بعدی C3D8R از دسته المان های بتن برای تحلیل رفتار غیرخطی بتن به عنوان یک مصالح ترد استفاده شده است، که یک المان ۸ گرهی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره و با انتگرال کاهش یافته می باشد. این المان از مقطع تیرهای در نظر گرفته شده در تمام مدل ها یکسان است. طول، عرض و ارتفاع مقاطع در مدل به ترتیب ۲۰۰، ۴۰ و ۴۰ سانتی متر می باشند

در این پژوهش بعد از انجام مرحله صحت سنجی و انطباق رضایت بخش نتایج نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی، به مدل سازی دو مدل از تیرهای بتن مسلح و پیش تنیده مقاوم سازی نشده به عنوان مدل های مرجع و ۲۴ مدل تیرهای پیش تنیده مقاوم سازی شده با الیاف CFRP و GFRP به ابعاد مقاطع عرضی ۲۰۰ × ۴۰ × ۴۰ سانتی متر، و با به کارگیری رده های بتن مصرفی C30، C40 و C50، و استفاده از کابل های پیش تنیدگی به اقطار ۲۰، ۱۶، ۲۲ و ۲۲ میلی متر اقدام گردید.

#### ۳-۱- نام گذاری مدل ها

شرح پارامترهای استفاده شده در نام گذاری مدل ها به صورت زیر است:  
 $M_n$ -PSB-nT-FRP- $C_m$   
 $M_n$ : شماره مدل تیر بتنی مدل سازی شده، PSB: تیر بتنی پیش تنیده، nT: تعداد کابل پیش تنیدگی، FRP: تعداد و نوع الیاف پلیمری تقویتی در اجزای مدل سازی شده،  $C_m$ : رده بتن مصرفی. به عنوان مثال تفسیر نام مدل شماره  $M_{13}$ -PSB-2T-7CFRP-U@10 Cm- $C_{30}$  به شرح زیر است:



شکل ۱۴- مدل تیر بتنی ساخته شده در نرم افزار آباکوس

تیرها به قطر ۱۶ میلی متر و خاموت ها برای محصور شدگی تیرها به قطر ۱۰ میلی متر فرض شده اند.

#### ۳-۳-۳- الیاف پلیمری تقویتی

الیاف پلیمری از نوع المان S4R در نرم افزار استفاده شدند. در جدول ۳ مشخصات مربوط به الیاف های CFRP و GFRP<sup>۱</sup> در مدل سازی های مقاطع تیرها داده شده اند.

#### ۳-۴- مدل سازی تیرهای ساده پیش تنیده

تیرهای پیش تنیده مطابق آیین نامه ACI 318-11 در نرم افزار آباکوس مدل سازی و بررسی شدند. تیرها تحت بارگذاری از نوع جابجایی قرار گرفته و میزان ظرفیت خمشی و هم چنین خیز آن ها تحت بار تعیین شدند.

### ۳-۳- مشخصات مصالح

#### ۳-۳-۱- بتن

بتن استفاده شده در مدل ها از رده های C30، C40 و C50 می باشند. در مدل ها از مقاومت فشاری ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال، و مقاومت کششی ۳/۷۵ MPa و ضریب ارتجاعی استاتیکی ۳۲/۶۲ GPa استفاده گردید.

#### ۳-۳-۲- فولاد

آرماتورهای استفاده شده از نوع A3 دارای نسبت پواسون ۰/۳، ضریب ارتجاعی استاتیکی ۲۰۵ × ۱۰<sup>۵</sup> GPa و تنش تسلیم ۴۰۰ MPa می باشند. آرماتورهای استفاده شده در نواحی کششی و فشاری مقاطع

<sup>1</sup> Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP)

<sup>1</sup> Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)

جدول ۳- مشخصات الیاف‌های کربن و شیشه استفاده شده در مدل‌های عددی

ضخامت ورق (mm)	ضریب ارتجاعی استاتیکی (GPa)	نسبت پواسون اصلی	مقاومت کششی (MPa)	درصد کشیدگی	مدول برشی (GPa)
الیاف کربن					
۰/۳۸۱	$E_X = ۷۴/۷$	$V_{XY} = ۰/۲۲$	۹۳۳	۱/۲۵	$G_{XY} = ۲/۹۰$
	$E_Y = ۴/۸۵$	$V_{XZ} = ۰/۲۲$			$G_{XZ} = ۲/۹۰$
	$E_Z = ۴/۸۵$	$V_{YZ} = ۰/۳$			$G_{YZ} = ۱/۸۶$
الیاف شیشه					
۰/۱۱۸	$E_X = ۳۶$	$V_{XY} = ۰/۱۵$	۷۶۰	۳/۳۶	$G_{XY} = ۳/۶۳$
	$E_Y = ۲/۵۰$	$V_{XZ} = ۰/۱۸$			$G_{XZ} = ۳/۶۳$
	$E_Z = ۲/۵۰$	$V_{YZ} = ۰/۳۱$			$G_{YZ} = ۳/۶۳$

### ۳-۵- مدل‌ها

مشخصات هندسی و ماده‌ای مدل‌های مرجع و همین‌طور مدل‌های تقویت شده با الیاف تقویتی کربن و شیشه در جداول ۴ و ۵ داده شده‌اند.

### ۱-۴-۳- تعریف گره‌ها و قیود تکیه‌گاهی

در نرم افزار آباکوس، شرایط مرزی محل اتصال تکیه‌گاه‌ها در تیرهای پیش‌تنیده به‌صورت تکیه‌گاه ساده فرض شدند. برای تعریف مقاطع در نرم‌افزار آباکوس، برای بتن از المان Solid، مقاطع فولادی المان Wire و برای مقاطع الیاف پلیمری تقویتی از المان Shell استفاده شده است. با استفاده از این دستور تقریباً "هر شکل از مقطع را می‌توان ایجاد کرد.

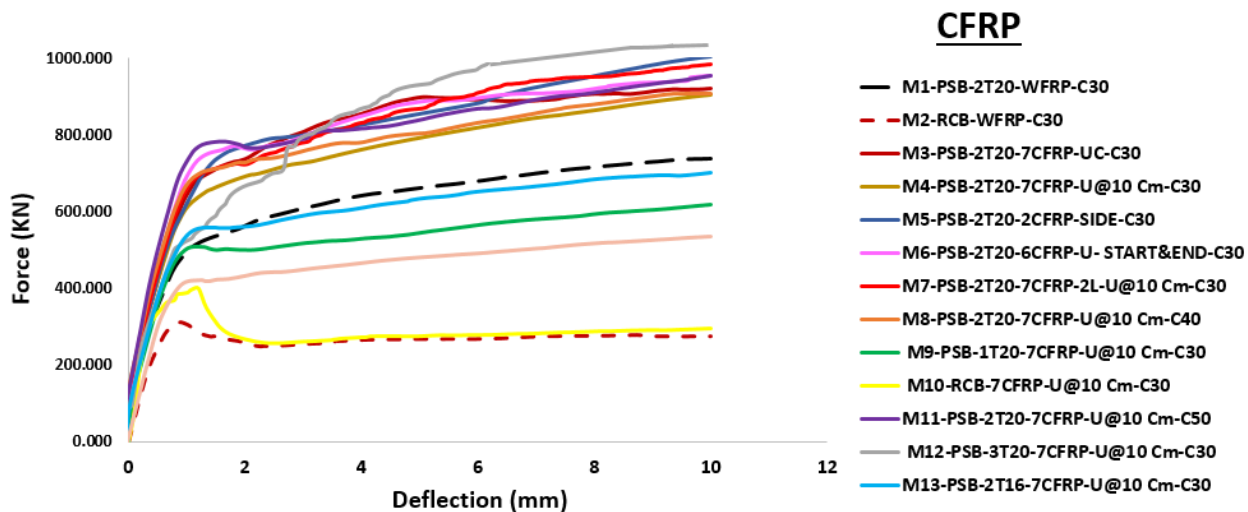
جدول ۴- مشخصات مدل مرجع و مدل‌های تقویت شده با الیاف کربن

شماره مدل	نوع تیر	رده بتن مصرفی	تعداد کابل پیش‌تنیدگی	قطر کابل پیش‌تنیدگی (mm)	سطح مقطع آراماتور پیش‌تنیدگی (mm <sup>2</sup> )	تعداد ورق CFRP	ابعاد الیاف در امتداد عرض تیر (متر)	سطح مقطع الیاف (m <sup>2</sup> )	ابعاد الیاف در امتداد طول تیر (m)	نام مدل	شرح مدل
M1	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	-	-	-	-	-	تیر پیش‌تنیده بدون مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری
M2	RCB	۳۰	-	-	-	-	-	-	-	-	تیر بتن مسلح بدون مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری
M3	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M4	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M5	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۲	۰/۴	۰/۸۴	۱/۰۵	SIDE	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر)
M6	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۶	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱۱۷	U-Start-End	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP در ابتدا و انتهای امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M7	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	2I-U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن ۲ لایه ورق CFRP روی هم به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M8	PSB	۴۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M9	PSB	۳۰	۱	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M10	RSB	۳۰	-	-	-	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر بتن مسلح با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M11	PSB	۵۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M12	PSB	۳۰	۳	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M13	PSB	۳۰	۲	۱۶	۲۰۱	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M14	PSB	۳۰	۱	۲۲	۳۸۰	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش‌تنیده با مقاوم‌سازی با الیاف کربن نحوه چسباندن CFRP به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)

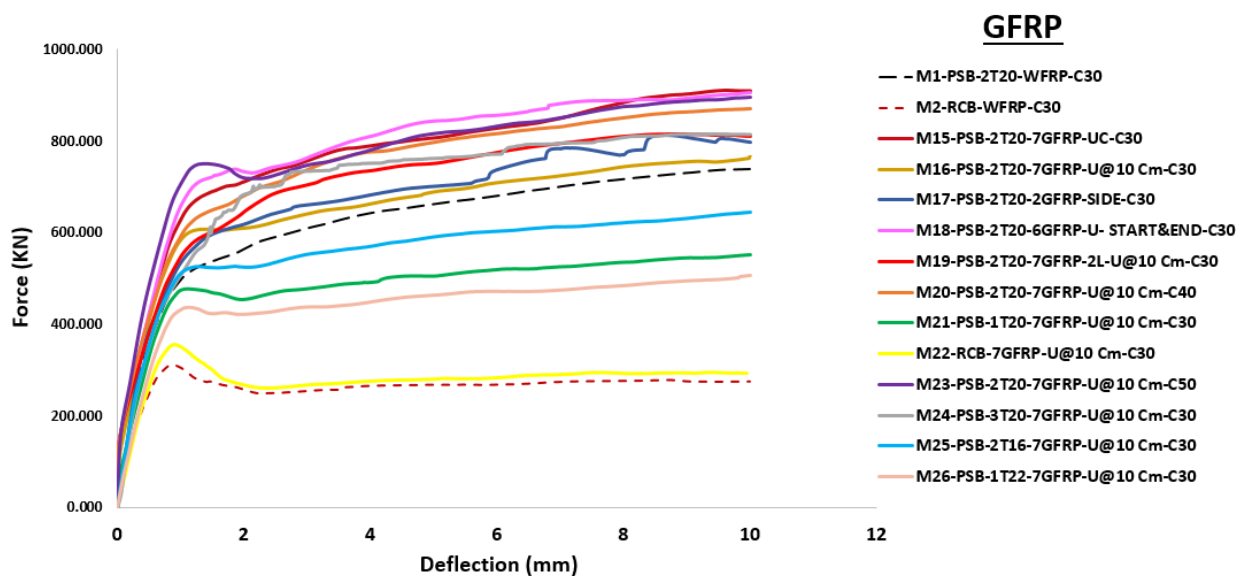
جدول ۵- مشخصات مدل تقویت شده با الیاف شیشه

شماره مدل	نوع تیر	رده بتن مصرفی	تعداد کابل پیش تنیدگی	قطر کابل پیش تنیدگی (mm)	سطح مقطع آرماتور پیش تنیدگی (mm <sup>2</sup> )	تعداد ورق GFRP	ابعاد الیاف در امتداد عرض تیر (متر)	سطح مقطع الیاف (m <sup>2</sup> )	ابعاد الیاف در امتداد طول تیر (m)	نام مدل	شرح مدل
M15	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M16	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M17	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۲	۰/۴	۰/۸۴	۱/۰۵	SIDE	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر)
M18	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۶	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱۱۷	U-Start-End	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP در ابتدا و انتهای امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M19	PSB	۳۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	2l-U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن ۲ لایه ورق GFRP روی هم به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M20	PSB	۴۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M21	PSB	۳۰	۱	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M22	RS B	۳۰	-	-	-	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر بتن مسلح با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M23	PSB	۵۰	۲	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M24	PSB	۳۰	۳	۲۰	۳۱۴	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M25	PSB	۳۰	۲	۱۶	۲۰۱	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)
M26	PSB	۳۰	۱	۲۲	۳۸۰	۷	۱/۲	۰/۸۴	۰/۱	U @ 10 Cm	تیر پیش تنیده با مقاوم سازی با الیاف شیشه نحوه چسباندن GFRP به فواصل ۱۰ سانتی متر در امتداد طول تیر (در طرفین جان تیر و عرض پایین مقطع تیر)

#### ۴- تحلیل منحنی‌های نیرو-تغییر مکان مدل‌ها



شکل ۱۵- منحنی‌های نیرو-تغییر مکان تیر بتن مسلح و تیرهای پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی کربن



شکل ۱۶- منحنی‌های نیرو-تغییر مکان تیر بتن مسلح و تیرهای پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی شیشه

برای تیرهای پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن و استفاده از رده بتن مصرفی C30 و استفاده از قطر کابل ۲۰ میلی‌متر و نحوه قرارگیری الیاف تقویتی یکسان می‌باشند (مدل  $M_{12}$ ) نسبت به (مدل‌های  $M_4$  و  $M_9$ ) برای مدل‌های فوق‌الذکر از شماره کوچک به بزرگ به ترتیب ۲۲٪ و ۷۹٪ افزایش داشته است. همچنین ظرفیت باربری تیر پیش‌تنیده (مدل  $M_{12}$ ) نسبت به تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی نشده (مدل  $M_1$ ) ۴۹٪ افزایش داشته است.

#### ۴-۱- جمع‌بندی

مشهود است که استفاده از پیش‌تنیدگی و مقاوم‌سازی با الیاف تقویتی کربن در تیر بتن مسلح سبب افزایش ظرفیت باربری و سختی در این اعضا می‌شود. همین‌طور پیش‌تنیدگی در سطوح بالاتر نیز منجر به استفاده کامل از تمام ظرفیت کششی الیاف تقویتی کربن شده که این نکته در نحوه گسیختگی ورق در مدل‌سازی‌ها کاملاً روشن است. پیش‌تنیدگی، وقوع اولین ترک خمشی را نیز به تاخیر انداخته و منجر به کاهش عرض ترک‌های نهایی در لحظه شکست شده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، ترک‌های حاصل از خسارت کششی در مقطع میانی تیرها ناشی از وقوع حداکثر شدت تنش بوده و به شکل پیوسته به سمت تکیه‌گاه‌ها با شیب ملایم کاهش یافته‌اند. در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، بیش‌ترین تنش‌ها در آرماتورهای کششی در پایین تیر ایجاد شدند و در آرماتورهای برشی نیز تنش در مقطع میانی تیر شروع شده و در همین وجه میزان بیشینه خود را دارند. در تیرهای ساده پیش‌تنیده با افزایش تعداد کابل‌های پیش‌تنیدگی از ۱ به ۲ و ۳، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. تیرهای دارای ۳ کابل، نسبت به تیرهای با ۱ و ۲ کابل به ترتیب ۷۹٪ و ۲۲٪ افزایش ظرفیت نشان دادند. ظرفیت تیرهای پیش‌تنیده با رده بتن مصرفی C50 نسبت به تیرهای پیش‌تنیده ساخته شده از رده‌های بتن C30 و C40 به ترتیب به میزان ۶٪ و ۵٪ افزایش نشان داده است. با مقایسه مدل‌های مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی کربن نسبت به نوع شیشه، به‌طور میانگین ظرفیت باربری حدود ۱۲٪ افزایش داشته است.

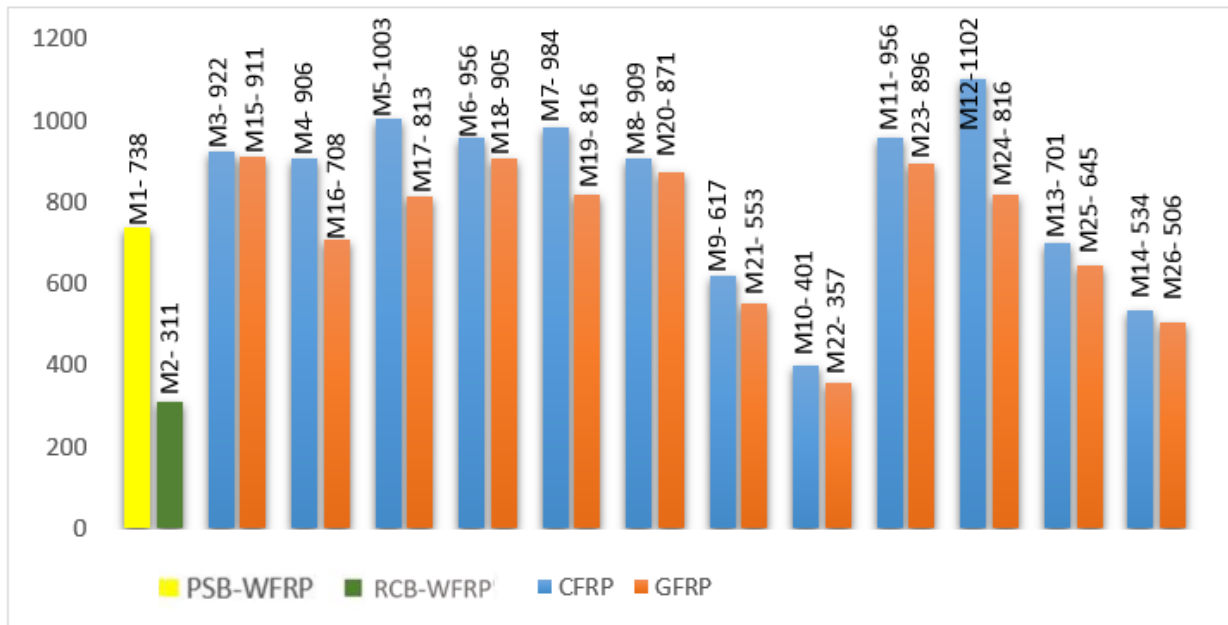
دیده می‌شود تیرهای مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن در مقایسه با انواع مقاوم‌سازی شده با الیاف شیشه، عموماً ظرفیت خمشی بیشتری را نشان داده‌اند. تحلیل منحنی‌های نیرو تغییرمکان در مدل‌های مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی کربن به شرح زیر می‌باشند.

۱- طبق شکل ۱۵ دیده می‌شود که مقایسه مدل‌های، تیر پیش‌تنیده بدون مقاوم‌سازی (مدل  $M_2$ ) و تیر بتن مسلح (مدل  $M_1$ ) به‌عنوان مدل‌های مرجع، (مدل  $M_2$ ) نسبت به (مدل  $M_1$ ) افزایش ظرفیت باربری نزدیک به ۱۳۷٪ داشته است.

۲- طبق شکل ۱۵ دیده می‌شود که با مقایسه (مدل‌های  $M_1$  تا  $M_6$ ) ظرفیت باربری تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن در مقایسه با انواع حالات اشکال قرارگیری و چسباندن الیاف پلیمری تقویتی (مدل  $M_5$ ) که با استفاده از رده بتن مصرفی C30 و دارای ۲ کابل پیش‌تنیدگی با قطر ۲۰ میلی‌متر که با ۲ لایه ورق تقویتی که در طرفین جان تیر مقاوم‌سازی شده است، باعث افزایش ظرفیت‌های خمشی و برشی به ترتیب در میانه مقطع و طرفین تکیه‌گاه‌ها منجر شده است. دیده می‌شود به دلیل ضعف بتن در ناحیه کشش و عملکرد لایه الیاف تقویتی کربن در طرفین جان تیر باعث افزایش رشد منحنی نیرو تغییرمکان نسبت به دیگر منحنی مدل‌های مذکور شده است. دیده می‌شود که ظرفیت باربری تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن (مدل  $M_5$ ) نسبت به تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی نشده مدل مرجع (مدل  $M_1$ ) ۳۶٪ افزایش داشته است.

۳- طبق شکل ۱۵ دیده می‌شود که مدل‌های استفاده شده از رده‌های بتن مصرفی C30، C40 و C50 برای تیرهای پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن که دارای ۲ کابل پیش‌تنیدگی و نحوه قرارگیری الیاف تقویتی یکسان می‌باشند، (مدل  $M_{11}$ ) نسبت به (مدل‌های  $M_4$  و  $M_8$ ) ظرفیت باربری به ترتیب از شماره کوچک به بزرگ ۵٪ و ۶٪ افزایش داشته است. دیده می‌شود که ظرفیت باربری تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن (مدل  $M_{11}$ ) نسبت به تیر پیش‌تنیده مقاوم‌سازی نشده مدل مرجع (مدل  $M_1$ ) ۳۰٪ افزایش داشته است.

۴- طبق شکل ۱۵ دیده می‌شود که مدل‌های استفاده شده از انواع تعداد کابل پیش‌تنیدگی دارای ۱، ۲ و ۳ کابل



شکل ۱۷: مقایسه ظرفیت خمشی مدل‌های پژوهش مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن و شیشه

۴- ظرفیت باربری تیرهای پیش‌تنیده با رده بتن مصرفی  $C_{50}$  نسبت به تیرهای پیش‌تنیده ساخته شده از رده‌های بتن  $C_{30}$  و  $C_{40}$  به ترتیب به میزان ۶٪ و ۵٪ افزایش نشان داده است.

۵- استفاده از ورق‌های تقویتی کربن در طرفین جان تیر پیش‌تنیده (مدل  $M_5$ ) منجر به افزایش ۳۵٪ ظرفیت باربری بیش‌تری نسبت به تیر مقاوم‌سازی نشده (مدل  $M_1$ ) شده است.

۶- با مقایسه مدل‌های مقاوم‌سازی شده، به‌طور میانگین ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده با الیاف کربن نسبت به انواع الیاف شیشه حدود ۱۲٪ افزایش داشته است.

۷- استفاده از دو لایه ورق تقویت شده با الیاف کربن نسبت به کاربرد یک لایه آن در مقاوم‌سازی تیرها، ظرفیت خمشی به‌میزان ۹٪ افزایش را نشان داده است.

طبق شکل ۱۷، با مقایسه مدل‌های  $M_1$  تا  $M_{26}$  مشهود است که تیرهای مقاوم‌سازی شده با الیاف تقویتی کربن در مقایسه با انواع مقاوم‌سازی شده با الیاف شیشه، عموماً "ظرفیت خمشی بیشتری دارند. میانگین این افزایش ظرفیت حدود ۱۲٪ برآورد شده است

## ۵- نتایج

نتایج کلیدی پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، ترک‌های حاصل از خسارت کششی در مقطع میانی تیرها ناشی از حداکثر تنش بوده و به شکل پیوسته به سمت تکیه‌گاه‌ها با شیب ملایم کاهش یافته‌اند.
- در تیرهای ساده پیش‌تنیده با افزایش تعداد کابل‌های پیش‌تنیدگی از ۱ به ۲ و ۳، ظرفیت افزایش می‌یابد. ظرفیت باربری تیرهای با ۳ کابل، نسبت به تیرهای با ۱ و ۲ کابل، به ترتیب ۷۹٪ و ۲۲٪ افزایش داشته است.
- در تیرهای ساده بتن مسلح و پیش‌تنیده، بیش‌ترین تنش‌ها در آرماتورهای کششی در پایین تیر ایجاد شدند و در آرماتورهای برشی نیز تنش در مقطع میانی تیر شروع شده و در وجه پایین مقطع تیر میزان بیشینه خود را دارند.



genetic algorithm. *Transportation Engineering Quarterly*. 2016; 2: 369-355 [In Persian].

[11] Lou T, Liu M, Lopes SMR, Lopes AV. Effect of Bond on Flexure of Concrete Beams Prestressed With FRP Tendons. *Journal of Composite Structures*, 2017; 21(4).

[12] Mingxin Wu A, Zhang Ch A, Zhenfu C. Drop-Weight Tests of Concrete Beams Prestressed With Unbonded Tendons and Meso-Scale Simulation. *International Journal of IMPact Engineering*, 2016; 93: 166-183.

[13] Moreirab LS, Batista M, Evandro Parent S.. Nonlinear Finite Element Simulation of Unbonded Prestressed Concrete Beams. *Journal of FRP Reinforcing Materials*, 2019; 3(6): 310- 345 [In Persian].

[14] Hee YL, Woo TJ, Wonseok C. (2016), Flexural strengthening of reinforced concrete beams with prestressed near surface mounted GFRP systems. *Journal of Composite Structures*. 2016; 163: 1-12.

## مراجع

۸- تیرهای مقاومسازی شده با الیاف کربن در مقایسه با انواع مقاومسازی شده با الیاف شیشه، عموماً "ظرفیت خمشی بیشتری را نشان داده‌اند.

[1] Mahmoudzadeh Kani I. Design of prestressed concrete structures. Tehran: University of Tehran Press 2006 [In Persian].

[2] Akbar H. Prestressed concrete. Knowledge TV Publications. 2014 [In Persian].

[3] Sajedi, SF. Prestressed concrete design. Rah-e-Danesh Researchers Publications. 2019 [In Persian].

[4] Behroyan M. Prestressed slabs by retracted method. Knowledge Look Publications. 2010 [In Persian].

[5] Habibi AR, Fathi H. Optimization of FRP-reinforced concrete beams. Third National Concrete Conference of Iran, (Tehran), 17 October, 2011 [In Persian].

[6] Deputy of Technical Affairs, Development of Technical Criteria and Criteria, Design Guide and Executive Criteria for Improvement of Existing Concrete Buildings Using of Engineering Structures. 2018; 170: 167-175.

[7] Izedinia M, Sharifi Ghaleh N. MS Thesis, Nonlinear analysis of prestressed concrete beams with GFRP sheet by finite element method. *Scientific-Research Journal of Structure and Construction*. 2020; 3(4): 5-17 [In Persian].

[8] Yapar O, Basu PK, Nordendale N. Accurate Finite Element Modeling of Pretensioned Prestressed Concrete Beams. *Journal of Engineering Structures*. 2015; 101(6): 163-178.

[9] Moawad M, Mahmoud A, El-karmoty H, El zanaty A. Behavior of Corroded Bonded Partially Prestressed Concrete Beams. *Journal of HBRC*. 2018; 14: 9-21.

[10] Naderpour H, Khairodin A, Arab Naeini M. Optimal design of box prestressed concrete bridge decks based on Iran Bridge loading regulations using

## Strengthening of Simple Prestressed Beams Using Carbon and Glass Reinforcing Polymer Fibers

Seyed Fathollah Sajedi

Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Amin Toolabi Sheikhi

Institute for Higher Education ACECR, Khuzestan, I.R.Iran

### Abstract:

In this study, after evaluating the capability of Abaqus software and ensuring the results, two non-reinforced prestressed beams as reference models and 24 reinforced prestressed beams with carbon and glass reinforcing fibers and application of concrete with strength of 30, 40 and 50 MPa and prestressed cables with diameters of 16, 20 and 22 mm were modeled. After numerical analysis of prestressed concrete beams with and without reinforcing fibers, their bearing capacity was investigated. After numerical analysis of prestressed concrete beams with and without reinforcing fibers, their bearing capacity was investigated. It was concluded that in the simple reinforced concrete and prestressed beams, cracks resulting from tensile damage in the middle cross section of the beams with maximum stress are continuously reduced with a gentle slope towards the supports. In simple reinforced concrete and prestressed beams, the highest stresses were created in the tensile reinforcements at the bottom of the beam and in shear reinforcements, the stress get started in the middle section of the beams and exhibited its maximum in the lower part of the beam section. In addition, in simple prestressed concrete beams, the capacity was increased by raising the number of prestressed tendons from 1 to 2 and 3. The capacity of beams with 3 tendons has increased by 79% and 22% compared to the beams with 1 and 2 tendons, respectively. The bearing capacity of prestressed concrete beams with C50 consumption category were increased by 6% and 5% contrasted to the prestressed concrete beams made of C30 and C40 concrete categories, respectively. By comparing the reinforced models using carbon reinforcement sheets in comparison with the glass type, the bearing capacity of beams containing carbon fibers are enhanced by about 12% (on average) compared to different types of glass fibers.

**Keywords:** Prestressing, Strengthening, Simple prestressed beam, Carbon and glass fibers, Abaqus software



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)