



## ارزیابی عملکرد چرخه ای قاب های بتن مسلح مقاوم سازی شده با الگوهای مختلف FRP

اسماعیل رام<sup>۱</sup>، وحید صابری<sup>۲\*</sup>، حمید صابری<sup>۳</sup>، امیر محمد رام<sup>۴</sup>، امیر حسین رام<sup>۵</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران

<sup>۲\*</sup> استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران (saberi.vahid@gmail.com)

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران.

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایوان کی، سمنان، ایران.

<sup>۵</sup> دانشجوی کارشناسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گرمسار، سمنان، ایران.

<sup>۶</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۲۸)

### چکیده

در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده موضعی و کلی با FRP، تحت بارهای چرخه‌ای و پوش آور مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا یک قاب بتنی سه طبقه دو دهانه طراحی شده مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شد. سپس با کاهش سازه‌های آرماتورهای قاب بتنی، به نحوی که قاب در برابر بارهای ثقلی مقاوم و در برابر بارهای جانبی ضعیف باشد، قاب جدید ضعیف شده‌ای مدل‌سازی شد. در نهایت قاب بهسازی شده‌ای از تقویت قاب ضعیف با الیاف‌های FRP کربن، آرامید، شیشه و به دو روش تقویت موضعی و کلی، مدل‌سازی شد. هر سه قاب تحت بارهای چرخه‌ای و پوش آور قرار گرفتند و نتایج حاصله حاکی از تأثیر بسیار خوب الیاف کربن در تقویت موضعی و تأثیر بسیار بالای کلیه الیاف‌ها در تقویت کلی قاب‌های بتن‌آرمه می‌باشد. علاوه بر این، تقویت موضعی شکل‌پذیری مناسب‌تری را در سیستم تقویت‌شده ایجاد می‌کند. در بین الیاف‌های مختلف، شیشه شکل‌پذیری بیشتری به سیستم می‌دهد و کربن ظرفیت باربری را بیشتر افزایش می‌دهد. آرامید نیز رفتاری بین کربن و شیشه دارد ولی بیشتر شبیه به کربن عمل می‌کند. همچنین به‌طور کلی تقویت کلی بهینه نبوده و به‌جز در موارد خاص توصیه نمی‌شود.

### کلمات کلیدی

قاب بتن‌آرمه، تقویت و بهسازی، الیاف پلیمری تقویت‌شده (FRP)، رفتار چرخه‌ای، نرم افزار آباکوس.



# Cyclic Performance Assessment of Rehabilitated Concrete Frames with Different Arrangement of FRP

Esmail Ram<sup>1</sup>, Vahid Saberi<sup>2\*</sup>, Hamid Saberi<sup>3</sup>, Amirmohamad Ram<sup>4</sup>, Amirhossein Ram<sup>5</sup>, Abbasali Sadeghi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Msc, Faculty of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>2\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

(saberi.vahid@gmail.com)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>4</sup> Bachelor Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>5</sup> Bachelor Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Garmsar, Semnan, Iran.

<sup>6</sup> Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

(Date of received: 10/05/2020, Date of accepted: 18/08/2020)

## ABSTRACT

*In this study, FRP effects on cyclic and push over behavior of locally and globally rehabilitated concrete frames were investigated. ABAQUS software used for modeling of frames. At first a 3 story-2 bay concrete building was modeled under gravity and earthquake loadings and then one of its frames was chosen as the base frame of this research. In the second step the base frame was weakened and rehabilitation carried out using three kinds of FRP named carbon, glass and aramid to compensate the lack of capacity. Strengthening of frames was done in two types of local and global manner and in each type three kinds of FRP were used. Force-displacement curve and stress-strain counter were determined for all of the models. Results showed positive effects of FRP using in rehabilitation of concrete frames. In local rehabilitation, all FRP improved the both of loading capacity and ductility but carbon FRP compensated all lack of capacity that was imposed to the model. In global rehabilitation, all kinds of FRPs showed satisfying performance in improving capacity of concrete frames. At the end, local strengthening by carbon FRP showed the best performance among the others and glass FRP was presented the optimum behavior in global strengthening.*

## Keywords:

*Concrete Frame, Rehabilitation, Fiber Reinforced Polymer (FRP), Cyclic Behavior, Abaqus Software.*



## ۱- مقدمه

قاب‌های خمشی بتنی از جمله سیستم‌های ساختمانی می‌باشند که به علت انعطاف‌پذیری در طرح‌های معماری، مصالح در دسترس و اقتصادی و ... در ایران به صورت قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه تعداد زیادی از این سازه‌ها در سطح کشور وجود دارند که یا منطبق با روش‌های لرزه‌ای طرح نشده و یا طرح آن‌ها سازگار با آیین‌نامه‌های روز نمی‌باشد و همچنین به علت افزایش عمر بهره‌برداری، معمولاً به طرح‌های تقویتی نیاز خواهند داشت [۱]. مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود و یا مرمت آن‌ها به منظور تحمل بارهای مضاعف طراحی، بهبود نارسایی‌های ناشی از فرسایش، افزایش شکل‌پذیری سازه‌ها با استفاده از مصالح مناسب و شیوه‌های اجرایی صحیح به طور متعارف انجام می‌گردد. مسئله مهم در برخورد با چنین سازه‌هایی افزایش سختی، مقاومت و شکل‌پذیری در برابر اثرات لرزه‌ای وارده بر آن‌ها است. استفاده از صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی، غلاف‌های بتنی یا فولادی و پس کشیدگی خارجی، تعدادی از روش‌های متعارف موجود هستند. مواد کامپوزیت ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف<sup>۱</sup> نیز یکی از مصالح پرمصرف در زمینه تقویت و بهسازی ترویج پیدا کرده است [۱، ۲]. به طور کلی می‌توان گفت الیاف FRP می‌توانند به منظور بازسازی یا حفظ استحکام یک عضو سازه‌ای فرسوده، مرمت یا مقاوم‌سازی عضو سازه‌ای سالم به منظور تحمل بارهای افزایش یافته به سبب تغییر در کاربری سازه‌ها و یا جبران خطاهای طراحی و اجرا به کار روند. با این حال کاهش یا از بین رفتن سیستم FRP نباید باعث گسیختگی عضو تحت اثر بارهای ثقلی شود. الیاف پلیمری مسلح به عنوان یکی از مصالح نوین پرکاربرد شناخته می‌شود که این امر به دلیل مزایا و برتری آن‌ها نسبت به مصالح قدیمی می‌باشد. وزن کم، نسبت مقاومت بالا به وزن، نصب و استفاده آسان، عدم نیاز به تجهیزات فراوان و ... از جمله مزایای این مصالح نوین می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده، استفاده از الیاف پلیمری به عنوان روشی جهت تقویت و برطرف کردن ضعف موجود در سازه‌های بتنی بسیار رایج شده است. از ویژگی‌های اصلی کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان مقاومت مناسب در برابر خوردگی، سادگی روند اجرا در محل نصب و سبکی آن‌ها را بر شمرد [۲]. همچنین مقاومت کششی بالا نیز از جمله قابلیت‌های بارز این مواد کامپوزیتی می‌باشد. عامل دیگر در گسترش استفاده از مصالح FRP مقرون به صرفه بودن این مصالح است. در قاب‌های خمشی نواحی انتهایی تیرها مستعد ورود به نواحی غیرخطی به منظور جذب انرژی ورودی ناشی از زلزله می‌باشد و با توجه به این که وقوع تسلیم در این نواحی مترادف با خسارت و تحمیل خرابی به سازه می‌باشد شکل‌پذیر کردن این نواحی هدف مهمی است که آیین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای و همچنین دستورالعمل‌های بهسازی با تعریف الزامات متعدد به دنبال دستیابی به آن می‌باشند. همچنین در ستون‌ها، در قسمت‌های انتهایی مقدار نیروی برشی زیادی در بارگذاری‌های جانبی ایجاد می‌شود و توجه به این قسمت‌ها نیز حائز اهمیت است. از شاخصه‌های رفتاری مورد نیاز دیگر قاب‌های خمشی، می‌توان به وجود شکل‌پذیری و ظرفیت باربری لازم اشاره کرد. با توجه به کاربرد الیاف پلیمری جهت تقویت و بهسازی سازه‌ها، می‌توان به منظور برطرف کردن ضعف گفته شده در قاب‌های خمشی بتنی از این مصالح استفاده کرد [۳]. هدف از این تحقیق بررسی امکان برطرف کردن ضعف‌های قاب‌های خمشی ذکر شده در بخش‌های پیشین، از طریق تقویت سازه‌های بتنی توسط الیاف پلیمری مسلح و نیز ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح تقویت شده موضعی و کلی با FRP، تحت بارهای چرخه‌ای و پوش آور است. هدف دیگر بررسی دقیق تاثیر الیاف FRP در رفتار کلی قاب خمشی (شامل میزان جذب انرژی، سختی الاستیک، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری آن تحت اثر بارهای جانبی) است.

<sup>۱</sup> Fiber Reinforced Polymer (FRP)



## ۲- پیشینه‌ی تحقیق

الیاف FRP به صورت پوشش‌های بیرونی و به‌منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. روکش‌های پلیمری FRP به‌منظور بهسازی سازه‌های بتنی اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در اروپا و ژاپن توسعه یافت. در اروپا نیز الیاف FRP به‌عنوان جایگزینی برای صفحات فولادی مورد استفاده قرار گرفتند [۳]. از آن زمان به بعد، اتصال ورقه‌های فولادی به قسمت کششی اعضای بتنی توسط رزین‌های اپوکسی به‌منظور افزایش مقاومت خمشی این اعضا مرسوم شد. تنگ و همکاران (۲۰۰۲) مطالعات ارزشمندی در زمینه مدهای گسیختگی ممکن در مصالح FRP انجام دادند. همچنین مدهای گسیختگی به صورت مختلف ناشی از عدم چسبندگی مصالح FRP به تیر بتنی توسط محققینی از جمله ریچی و همکاران (۱۹۹۰)، سعادت منش و احسانی (۱۹۹۱)، تاکدا و همکاران (۱۹۹۶)، گاردن و همکاران (۱۹۹۷)، و رز و همکاران (۱۹۹۹)، مشاهده بیان شد. در زمینه استفاده از الیاف پلیمری روش‌های ساده شده برای طراحی توسط محققان مختلفی از جمله ویلنای (۱۹۸۸)، رابرت (۱۹۸۹) و رابرت و حاجی کاظمی (۱۹۸۹)، فرموله و ارائه شده است [۳، ۴]. نتایج برخی مطالعات انجام‌شده از جمله بالینگر و همکاران (۱۹۹۳)، دمر و نیال (۱۹۹۴) و نانی و نوریس (۱۹۹۵)، نشان می‌دهد که دورپیچی ستون‌های بتنی با مصالح FRP به ویژه در ستون‌های مدور، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت عضو بتنی خواهد داشت [۵]. در سال ۱۹۹۴، سعادت‌منش و احسانی، در پژوهشی به بررسی تقویت ستون‌های بتنی توسط الیاف پلیمری کربن و شیشه پرداختند. در این پژوهش تعدادی ستون بتنی با لایه‌ها و چینش‌های مختلفی تقویت شدند و تحت بارهای محوری قرار گرفتند. در نهایت نتایج حاصله نشان دهنده‌ی افزایش شکل‌پذیری و مقاومت فشاری و بطور کلی بهبود رفتار لرزه‌ای و ثقلی ستون بودند [۵، ۶]. برخی محققین از جمله اریک و هفرنان (۱۹۹۵)، تأثیرات FRP را بر روی تقویت دال‌های دو طرفه بتن‌آرمه مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. همچنین تحقیقات اخیر بر روی دال‌های طره‌ای توسط تنگ و همکاران (۲۰۰۰)، و لام و تنگ (۲۰۰۱)، نشان می‌دهد که گسیختگی خمشی به وسیله گسیختگی مصالح FRP یا قلوه کن شدن بتن و از بین رفتن چسبندگی روی سطح تماس به وقوع می‌پیوندد [۷]. پاول گراناتا و آزاده پروین (۲۰۰۱)، در پژوهشی به بررسی تقویت اتصالات بتنی تضعیف‌شده توسط الیاف پلیمری از جنس کولار پرداختند. در این پژوهش تعدادی اتصال در مقیاس کوچک ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفتند. نوع تقویت‌های انجام‌شده به صورت تقویت ظرفیت خمشی و در تعدادی از موارد ظرفیت خمشی و برشی به صورت هم‌زمان بودند. در نهایت نتایج حاصله بیانگر افزایش ظرفیت خمشی اتصالات بودند [۳، ۸]. در سال ۲۰۰۳، دی و همکاران، در پژوهشی به تقویت اتصالات توسط الیاف کربنی پرداختند. در این پژوهش آزمایشگاهی تعدادی اتصال تیر و ستون که با الیاف تقویت‌شده بودند تحت بار چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان دهنده تبدیل شکست ترد در ناحیه اتصال به شکست نرم در تیر بودند. همچنین استفاده از چینش‌های ضربدری رفتار مناسب‌تری نسبت به چینش‌های افقی و قائم از خود نشان دادند [۸]. در سال ۲۰۰۷، پامپانین و همکاران، در پژوهشی به بررسی استفاده از CFRP در ناحیه بحرانی اتصالات پرداختند. این پژوهش در مقیاس بسیار بزرگ و به صورت آزمایشگاهی بر روی اتصالات داخلی و خارجی و همچنین بر روی یک قاب سه طبقه تقویت‌شده انجام گرفت. نتایج حاصله حاکی از رضایت کامل در بهبود رفتار قاب و اتصالات بتنی تقویت‌شده توسط CFRP بود. در سال ۱۹۹۸، سامان و همکاران مطالعاتی در زمینه رفتار تنش و کرنش بتن محصور شده با FRP انجام دادند. پس از آن و در ادامه تلاش‌های ایشان، در سال ۱۹۹۹ تواننجی مطالعاتی مشابه انجام داد [۸، ۹].



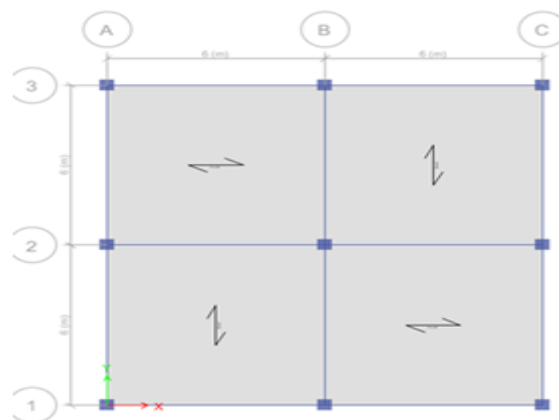
### ۳- مدلسازی

روش کار در این پژوهش به این صورت است که در ابتدا یک ساختمان بتنی سه طبقه به طور همزمان تحت بار ثقلی و لرزه‌ای طراحی شده است. طبق نتایج طراحی، یکی از قاب‌های این ساختمان به منظور تحلیل دینامیکی غیرخطی انتخاب شده است. سپس قاب مذکور به گونه‌ای که قابلیت تحمل بارگذاری ثقلی را داشته باشد تضعیف شده است. در ادامه قاب تضعیف شده به عنوان مدل مورد نظر جهت تقویت و بهسازی، به دو صورت موضعی و کلی با استفاده از الیاف پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته بر روی این قاب شامل بررسی رفتار چرخه‌ای و پوش آور برای انواع مختلف الیاف پلیمری می‌باشد. ساختمان بتنی سه طبقه مورد نظر در شهر تهران واقع شده است و مشخصات کلی آن در جدول ۱ بیان شده است [۱۰].

جدول ۱: مشخصات کلی ساختمان طراحی شده

نوع ساختمان	بتنی
تعداد طبقات	۳
ارتفاع طبقات	۳/۲ متر
محل احداث	تهران (خطر پذیری لرزه‌ای بسیار زیاد)
سیستم مقاوم لرزه‌ای	قاب خمشی
سیستم سقف	تیرچه بلوک
نوع خاک	تیپ دو

پلان طبقات بصورت یکسان است. طول دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقات نیز ۵/۴ متر است. آیین نامه‌های مورد استفاده جهت تحلیل و طراحی در این تحقیق، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۲، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۲ و آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم بودند. بار مرده کف طبقات  $500 \text{ Kg/m}^2$  و بار زنده  $200 \text{ Kg/m}^2$  در نظر گرفته شدند. با توجه به قرارگیری سازه در منطقه با خطر پذیری بسیار زیاد مولفه قائم زلزله نیز در نظر گرفته شد. شکل ۱ نمای پلان ساختمان سه طبقه بتنی مسلح مورد استفاده در تمامی تحلیل‌های این تحقیق را نشان می‌دهد که یکی از قاب‌های میانی جهت مدل‌سازی در آباکوس در نظر گرفته شد. تحلیل‌ها به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شدند و اثرات P- $\Delta$  بزرگ نیز در تمامی تحلیل‌ها در نظر گرفته شدند [۱۰، ۱].



شکل ۱: نمای پلان ساختمان سه طبقه بتنی مسلح مورد استفاده در تمامی تحلیل‌های این تحقیق.



جدول ۲، جزییات مقاطع در نظر گرفته شده و نحوه آرماتورگذاری اعضای تیر و ستون در طبقات مختلف را نشان می‌دهد [۱۰].

جدول ۲: مقاطع در نظر گرفته شده و نحوه آرماتورگذاری اعضای تیر و ستون در طبقات مختلف.

اجزاء		تیرها		ستونها	
طبقات	ابعاد (سانتیمتر)	جزئیات آرماتورگذاری	ابعاد (سانتیمتر)	جزئیات آرماتورگذاری	ابعاد (سانتیمتر)
اول	۴۵ × ۴۵	۲۰φ۵Top ۲۰φ۳Bottom	۴۵ × ۴۵	۲۲φ۱۶	
دوم	۴۰ × ۴۰	۲۰φ۵Top ۲۰φ۳ Bottom	۴۰ × ۴۰	۲۲φ۱۲	
سوم	۴۰ × ۴۰	۲۰φ۳Top ۲۰φ۳ Bottom	۴۰ × ۴۰	۲۲φ۱۲	

شبیه‌سازی‌های انجام‌شده شامل مراحل مدل‌سازی قاب بتنی طبق طراحی صورت گرفته برای ساختمان بتنی مذکور در نرم‌افزار آباکوس، تضعیف قاب بتنی مدل شده در مرحله قبل و مدل‌سازی دوباره آن و در نهایت تقویت قاب بتنی تضعیف‌شده به کمک انواع مختلف FRP و مدل‌سازی آن می‌باشند. در این پژوهش از رفتار (Concrete Damage Plasticity) (CPD) برای مدل‌سازی بتن استفاده شده است. مقادیر پیشنهادی پارامترهای مدل CPD مطابق دستورالعمل استفاده از آباکوس (۲۰۱۱) فرض شدند. برای مدل‌سازی آرماتورهای فولادی از رفتار دو خطی با مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است که دقت مناسبی در مدل‌سازی‌های مهندسی از خود نشان داده است [۲]. مدل رفتاری الیاف پلیمری به صورت الاستیک خطی می‌باشد با این تفاوت که پس از رسیدن آن‌ها به ظرفیت حداکثر خود به صورت ترد گسیخته می‌شوند. برای مدل‌سازی گسیختگی از مدل شکست هاشین استفاده شده است. رفتاری که از آن برای مدل بتن در فشار استفاده شده است، رفتار پیشنهادی نرم‌افزار آباکوس و مدل رفتاری ونگ است که مطابقت خوبی با رفتار بتن معمولی دارد است [۲، ۵]. رفتاری که از آن برای مدل بتن در کشش استفاده شده است، رفتار پیشنهادی نرم‌افزار آباکوس است. در این رفتار بتن بصورت خطی به حداکثر تنش کششی رسیده و پس از آن مقاومت کششی بصورت خطی کاهش پیدا کرده و در کرنشی معادل با  $10\epsilon_{t0}^{el}$  به مقاومت به صفر می‌رسد. مقدار مقاومت کششی بتن تقریباً یک دهم مقاومت فشاری آن در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی بتن از المان‌های توپر و ۸ گرهی استفاده شده است. ابعاد این المان‌ها با توجه به شرایط همگرایی ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و به گونه‌ای هستند که علاوه بر تامین دقت محاسبات از نظر هزینه زمانی تحلیل‌ها نیز مناسب هستند. لازم به ذکر است برای بتن رفتار خستگی و بینچینگ در نظر گرفته نشده است که با توجه به اینکه نتیجه‌گیری نهایی بر پایه مقایسه حالت‌های مختلف است در روند کار مشکلی رخ نخواهد داد [۵].



## ۳-۱- رفتار الیاف پلیمری

جهت مدل‌سازی پارگی در FRP از مدل خرابی هاشین استفاده شده است. مدل خرابی هاشین، مدلی است که در آن برای به دست آوردن مودهای خرابی، بیشتر از یک مولفه تنش به کار گرفته می‌شود. خرابی به دست آمده از طریق مدل هاشین ناشی از خرابی در فیبرها و یا ماتریس رزین می‌باشد و شامل چهار مود خرابی است. این مدل برای مسائل سه بعدی هم تعمیم داده شده است [۱۱].

## ۳-۲- مدل‌سازی اجزای محدود الیاف پلیمری

برای مدل‌سازی FRP از المان پوسته استفاده شده است. المان پوسته برای مواقعی که ضخامت عضو نسبت به طول و عرض آن کم است پیشنهاد می‌شود. در FRP نیز همین شرایط حاکم است به همین دلیل از المان پوسته جهت مدل‌سازی استفاده شده است [۱۲]. ابعاد این المان‌ها با توجه به شرایط همگرایی ۳۰ سانتی‌متر و ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند و به گونه‌ای هستند که علاوه بر تامین دقت محاسبات از نظر هزینه زمانی تحلیل نیز مناسب می‌باشد. همچنین تعداد لایه‌ها ۳ لایه و ضخامت هر لایه ۰/۳۷ میلی‌متر فرض شدند که با توجه به کاربرد آن در ناحیه اتصال و وجود همزمان خمش و برش بصورت دو جهته اعمال شدند [۱۳]. در تقویت کلی تمام قسمت‌های خارجی تیر و ستون‌ها با FRP پوشانیده شدند. مقدار سطح پوشش داده شده در تقویت موضعی نیز به اندازه ناحیه بحرانی اتصال و پای ستون انتخاب شدند. جدول ۳ مشخصات مکانیکی الیاف‌های استفاده شده در مدل‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. در عمل جهت چسباندن FRP بر روی سطوح از چسب اپوکسی استفاده می‌شود. اثر چسب بصورت بستند درجات آزادی گره‌ها به یکدیگر مدل شده است. این قید تمامی درجات دو گره مجاور را به یکدیگر بسته و باعث می‌شود این دو گره کاملاً با هم حرکت کنند که عملاً همان رفتار چسب است [۲، ۵].

جدول ۳: مشخصات مکانیکی الیاف‌های استفاده شده در مدل‌سازی‌ها.

الیاف کربن (CFRP)	
۲۳۰	مدول الاستیسیته (Gpa)
۳۰۰۰	مقاومت کششی (Mpa)
۱/۳%	کرنش تسلیم
۱۹/۲	انرژی شکست ( $J/mm^2$ )
الیاف شیشه (GFRP)	
۵۳	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۴۰۰	مقاومت کششی (Mpa)
۴/۵%	کرنش تسلیم
۵۴	انرژی شکست ( $J/mm^2$ )
الیاف آرامید (AFRP)	
۱۱۶	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۹۰۰	مقاومت کششی (Mpa)
۲/۵%	کرنش تسلیم
۳۶	انرژی شکست ( $J/mm^2$ )



## ۳-۳- مدل سازی آرماتورها

نوع المان استفاده شده برای آرماتورها از نوع میله‌ای خرابایی بوده که برای مدل سازی رفتار محوری گزینه مناسبی است. ابعاد این المان‌ها با توجه به شرایط همگرایی ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است و به گونه‌ای هستند که علاوه بر تامین دقت محاسبات از نظر هزینه زمانی تحلیل نیز مناسب می‌باشند. نوع آرماتور مصرفی با توجه به مدل ساخته شده در برنامه Etabs2000 از نوع S400 بوده که مشخصات رفتاری آن طبق اطلاعات داده شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در جدول ۴ آورده شده است [۲، ۱۴].

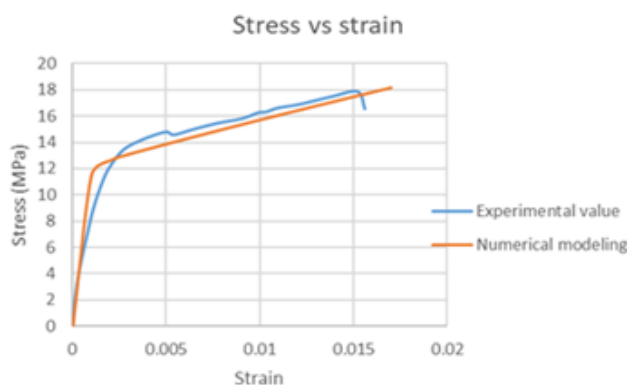
جدول ۴: مشخصات مکانیکی آرماتور مصرفی.

۴۰۰	تنش تسلیم (MPa)
۶۰۰	تنش گسیختگی (MPa)
۱۴%	کرنش حداقل در لحظه گسیختگی
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)

در مدل مرجع که برگرفته از نتایج طراحی ساختمان بتنی ۳ طبقه می‌باشد، همان نتایج عینا اعمال شده و مدل مربوطه شکل گرفته است. سپس در مدل‌های بعد به منظور تضعیف قاب بتنی آرماتورهای ستون‌ها از  $22\text{Ø}$  به  $20\text{Ø}$  کاهش داده شده است و آرماتور تیرها نیز از  $20\text{Ø}$  به  $18\text{Ø}$  کاهش داده شده است که سبب کاهش ظرفیت باربری کل سیستم تحت بار جانبی شده است ولی طبق خروجی‌های نرم افزار، قاب همچنان قابلیت تحمل بارهای ثقلی رادردولی تحمل بارهای جانبی راندارد. در مرحله بعد به منظور جبران کاهش ایجاد شده از لایه‌های FRP به صورت موضعی و کلی استفاده شده است [۲، ۱۵].

## ۴-۳- صحت سنجی مدل سازی

در سال ۲۰۱۲، چارالمبیدی و همکاران مقاومت ستون‌های مقاوم شده توسط FRP را بررسی کردند. در این پژوهش تعدادی ستون بتنی توسط چینش‌های مختلف GFRP مقاوم شده و تحت بار یکنواخت قرار گرفتند. برای اطمینان از نحوه‌ی مدل سازی FRP صحت سنجی بر روی پژوهش مذکور انجام شد که نتیجه آن از تطابق خوبی برخوردار بود. در این صحت سنجیک ستون بتنی مدل سازی شده است که چینش FRP بصورت پوشش کامل بوده و نوع آن GFRP است. شکل ۲ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش ستون صحت سنجی شده با نتایج تحقیقات چارالمبیدی و همکاران را نشان می‌دهد [۱، ۲].



شکل ۲: مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش ستون صحت سنجی شده با نتایج تحقیقات چارالمبیدی و همکاران.





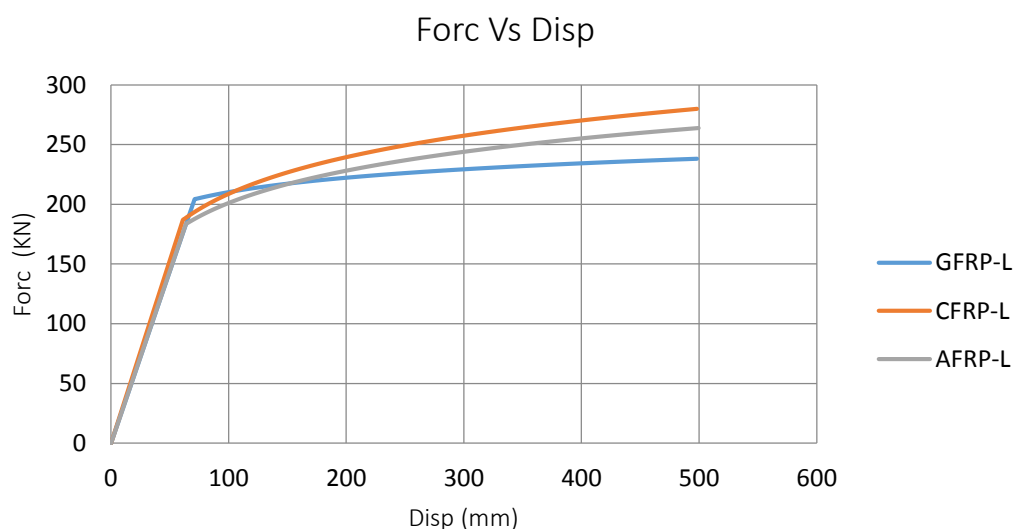
## ۳-۵- پروتکل بارگذاری

بارگذاری‌های مورد نظر جهت ارزیابی رفتار قاب مذکور در حالت‌های مختلف بصورت پوش آور و سیکلی در نظر گرفته شد. در بارگذاری پوش آور قاب از یک جهت تحت نیروی جانبی قرار می‌گیرد و در نهایت نمودار نیرو - جابجایی مربوطه، نشان‌گر رفتار قاب خواهد بود. در نمونه موجود با توجه به وجود تقارن در رفتار و هندسه مدل تفاوتی در جهت اعمال بار وجود ندارد [۲، ۱۳]. در بارگذاری سیکلی قاب تحت بار رفت و برگشتی قرار گرفته و نمودار نیرو - جابجایی برای آن بدست آورده می‌شود که نشان‌گر رفتار قاب در بارگذاری چرخه‌ای است. نوع و اندازه چرخه‌ها در آیین‌نامه‌های مختلف متفاوت است. در این تحقیق، پروتکل مورد استفاده جهت تعیین چرخه‌ها، مطابق با پروتکل پیشنهادی آیین نامه ATC-24 بوده است [۲، ۱۱].

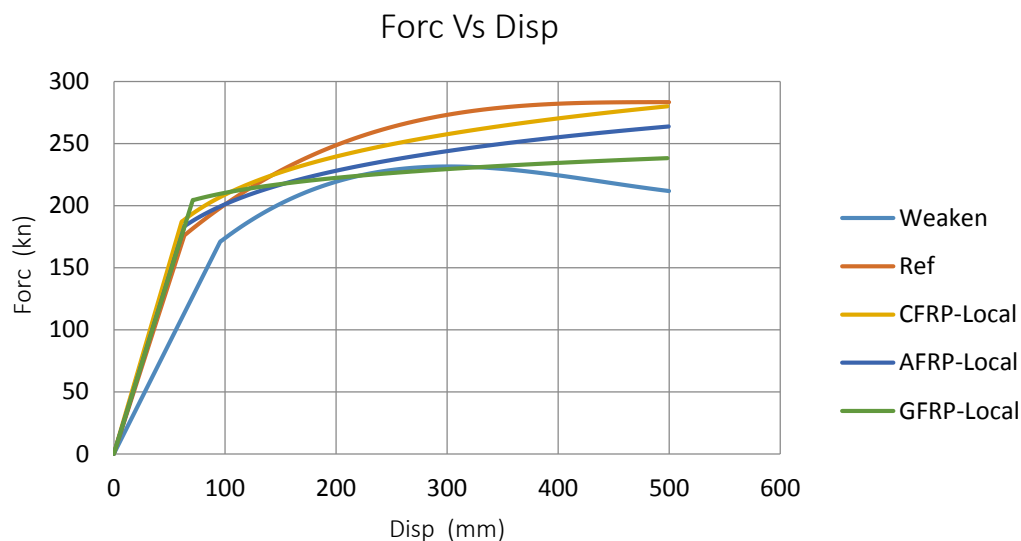
## ۴- تحلیل نتایج و بحث

## ۴-۱- نتایج بارگذاری‌های پوش آور

شکل ۳ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش قاب تقویت‌شده موضعی با الیاف‌های CFRP، GFRP و AFRP را نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل ۳ مشخص است بیشترین افزایش مقاومت مربوط به CFRP و کمترین آن مربوط به GFRP می‌باشد. در شکل ۴ نمودار مدل‌های مرجع، تضعیف‌شده و قاب‌های تقویت‌شده موضعی با الیاف‌های CFRP، GFRP و AFRP نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور کلی اضافه کردن الیاف به صورت موضعی سبب افزایش ظرفیت باربری قاب بتنی می‌شود.

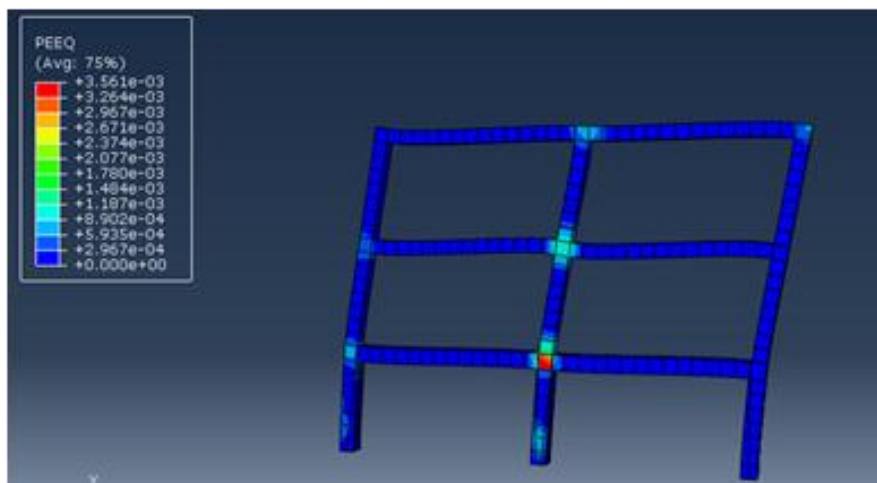


شکل ۳: مقایسه تأثیر الیاف مختلف در رفتار قاب تقویت‌شده موضعی.

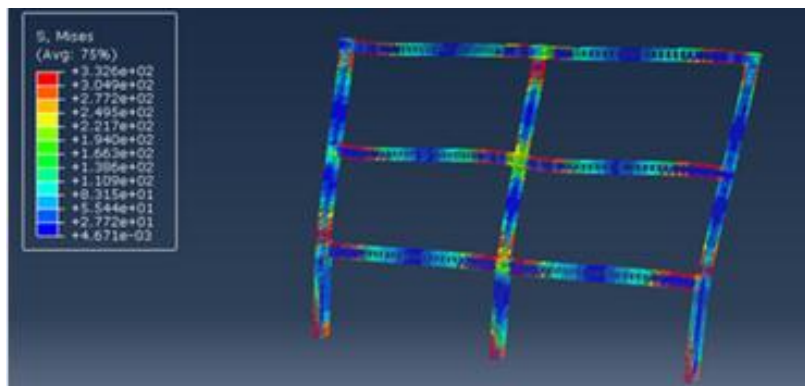


شکل ۴: مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی برای مدل‌های مرجع، تضعیف‌شده و تقویت‌شده موضعی.

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب کرنش غیرخطی بتن و تنش و ن میسز آرماتورها برای مدل مرجع را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مفصل پلاستیک در محل اتصال تیر به ستون (بر ستون) و پای ستون ایجاد شده است که مکانیزم مناسبی در بارگذاری جانبی نبوده و سبب خسارت‌های زیادی به سازه می‌شود. در مورد مدل تضعیف‌شده نیز دقیقاً نتایج مشابهی به دست آمدند.

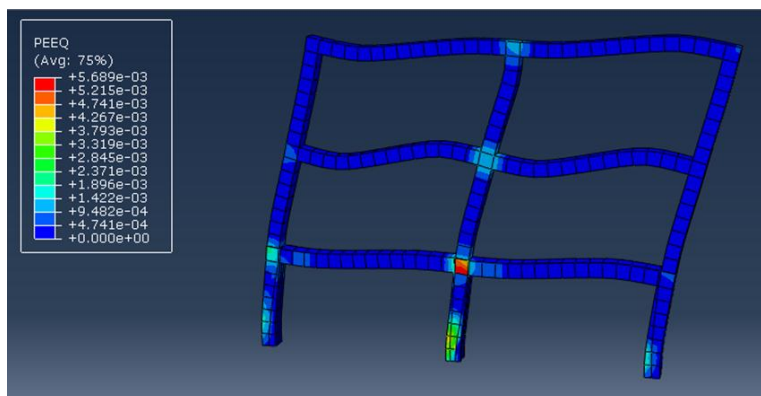


شکل ۵: کرنش غیر خطی قاب بتنی در مدل مرجع در جابجایی ۵۰۰ میلی‌متر.

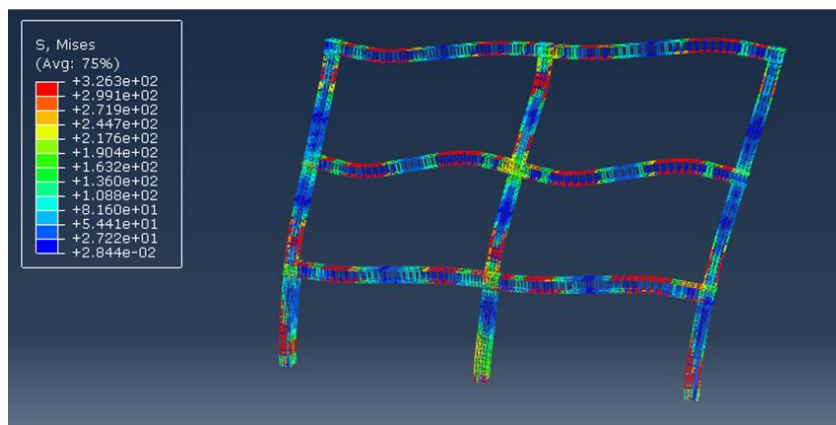


شکل ۶: تنشونمیسز برای آرماتورها در مدل مرجع در جابجایی ۵۰۰ میلی متر.

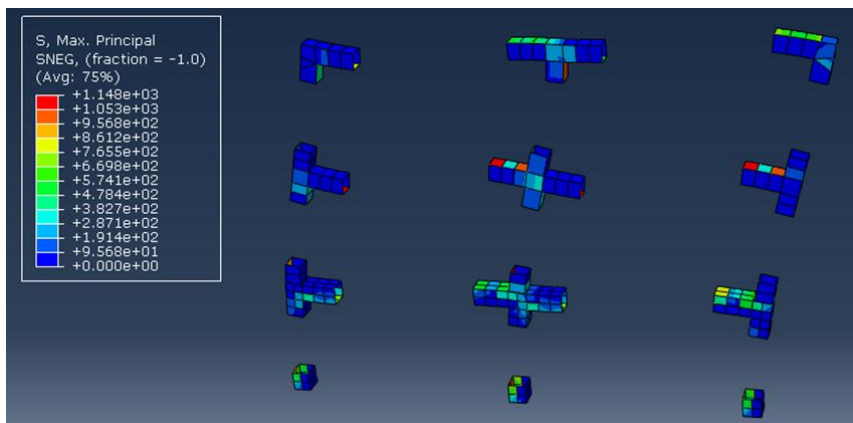
اشکال ۷ و ۸ و ۹ به ترتیب کرنش غیرخطی بتن، تنش ون میسز آرماتورها و تنش در لایه های FRP برای مدل تقویت شده موضعی به کمک الیاف کربن نشان می دهند. مطابق اشکال ۷ و ۸ و ۹ محل مفاصل پلاستیک در تیرها از بر ستون به داخل تیر کشیده شده است که این فرآیند سبب عملکرد بهتر اتصال می شود. همچنین در پای ستون ها نیز چنین اتفاق مشابهی رخ داده است. در مورد مدل تقویت شده موضعی به کمک الیاف شیشه و نیز مدل تقویت شده موضعی به کمک الیاف آرامید نیز دقیقا نتایج مشابهی به دست آمدند.



شکل ۷: کرنش غیر خطی قاب بتنی در مدل تقویت شده موضعی توسط CFRP در جابجایی ۵۰۰ میلی متر.

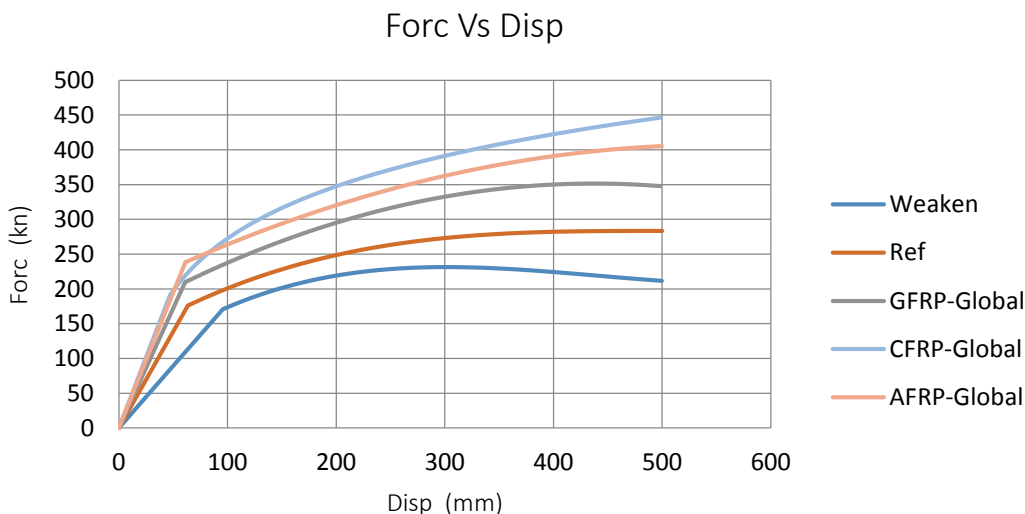


شکل ۸: تنش ونمیسز برای آرماتورها در مدل تقویت شده موضعی توسط CFRP در جابجایی ۵۰۰ میلی متر.



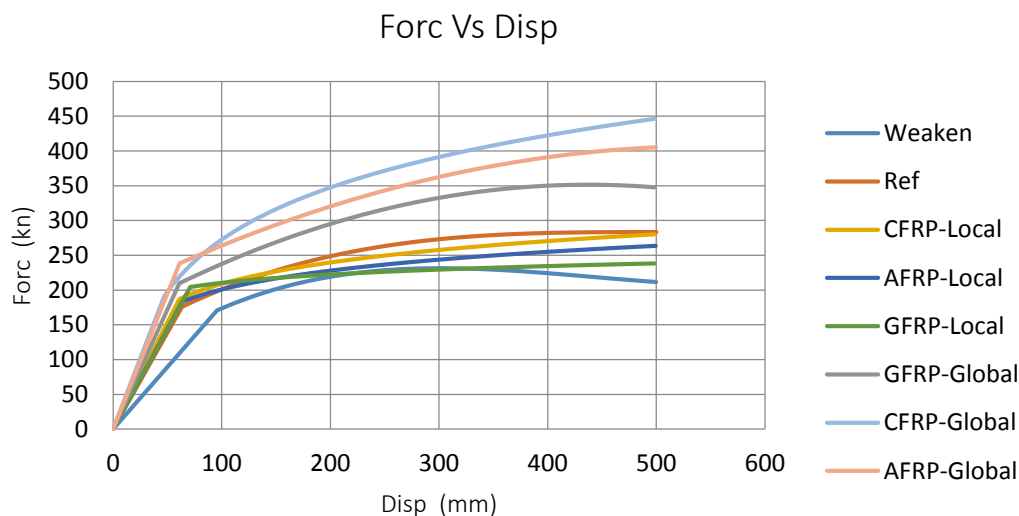
شکل ۹: تنش حداکثر در لایه های FRP در مدل تقویت شده موضعی توسط CFRP در جابجایی ۵۰۰ میلی متر.

شکل ۱۰ منحنی های نیرو - جابجایی مدل های مرجع، تضعیف شده و قاب هایی که به صورت کلی توسط الیاف های CFRP، CFRP و GFRP تقویت شده اند را نشان می دهد. همان طوری که مشاهده می شود تقویت کلی ظرفیت باربری قاب ها را به مقدار زیادی افزایش می دهد.



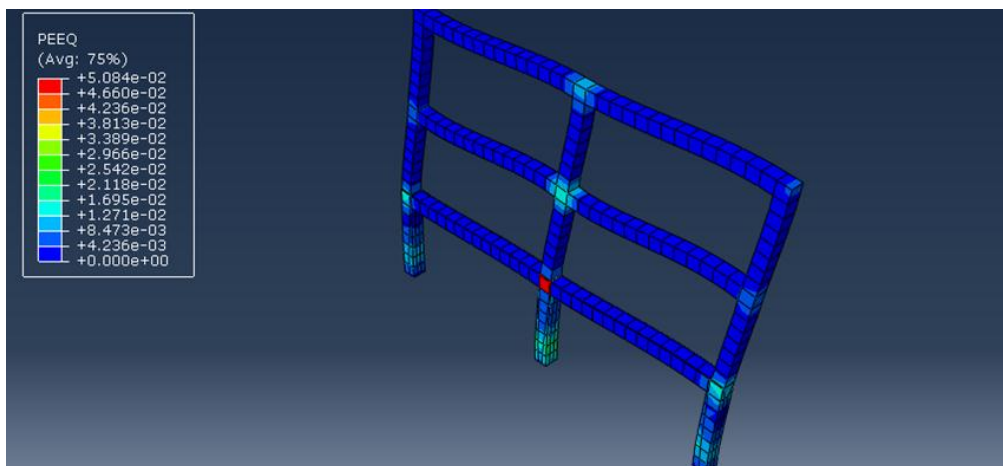
شکل ۱۰: مقایسه رفتار مدل های مرجع، تضعیف شده و تقویت شده به صورت کلی با الیاف های مختلف.

در شکل ۱۱ رفتار مدل های مرجع، تضعیف شده و قاب های تقویت شده به صورت های کلی و موضعی با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طوری که مشاهده می شود تقویت کلی ظرفیت باربری را به مقدار بیشتری افزایش می دهد.

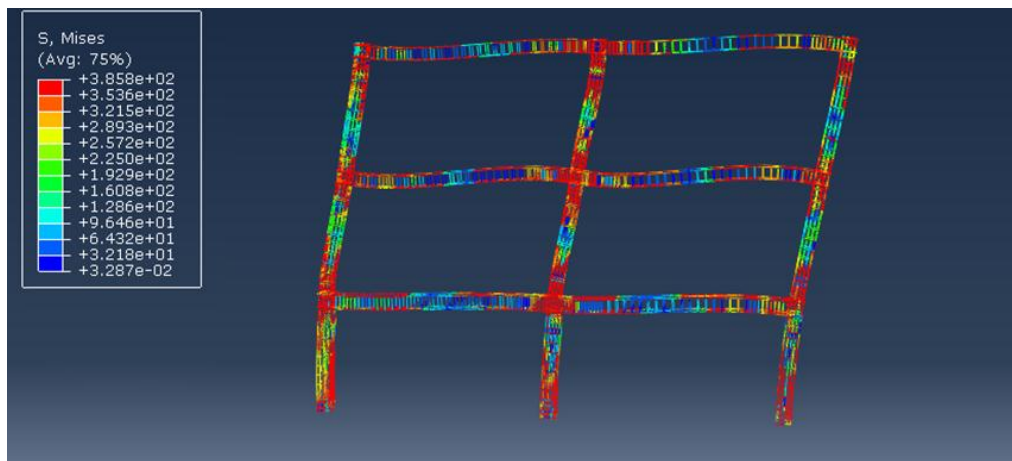


شکل ۱۱: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی تمامی مدل‌های بررسی شده.

اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب کرنش غیرخطی بتن و تنش ون میسز آرماتورها برای مدل‌های تقویت‌شده به صورت کلی توسط الیاف کربن را نشان می‌دهند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود مفصل پلاستیک به معنی رایج دیگر وجود ندارد و ناحیه زیادی از تیرها و ستون‌ها به حد جاری شدگی رسیده‌اند. در مورد مدل‌های تقویت‌شده کلی به کمک الیاف‌های شیشه و آرامید نیز دقیقاً نتایج مشابهی به دست آمدند.



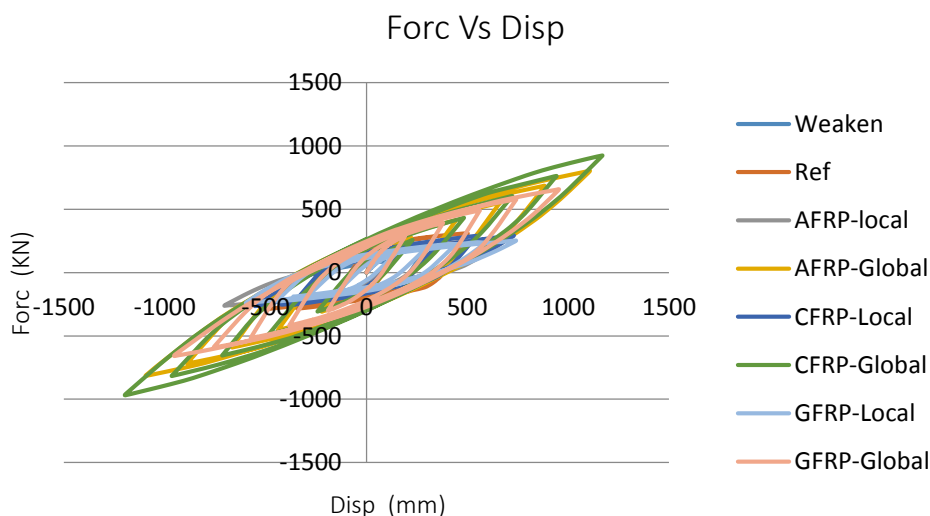
شکل ۱۲: کرنش غیر خطی بتن در مدل تقویت‌شده کلی با CFRP در جابجایی ۵۰۰ میلی‌متر.



شکل ۱۳: تنش ون میسز در آرماتورهادرمدل تقویت شده کلی با CFRP در جابجایی ۵۰۰ میلی متر.

#### ۲-۴- نتایج بارگذاری های چرخه ای

شکل ۱۴ مقایسه منحنی های هیستریزیس مدل های مرجع، تضعیف شده و قاب های تقویت شده کلی و موضعی توسط الیاف های مختلف را نشان می دهد.



شکل ۱۴: مقایسه منحنی های هیستریزیس تمامی مدل ها.

همان طوری که مشاهده می شود در تمامی مدل ها، ظرفیت های باربری چرخه ای با اضافه کردن موضعی یا کلی انواع الیاف افزایش چشم گیری داشته اند. نتایج نشان می دهند قاب مقاوم سازی شده به صورت کلی و با الیاف از جنس کربن به ترتیب با افزایش ۲۱۲/۲۳ و ۳۵۶/۳۶ درصدی از نظر ظرفیت باربری و جذب انرژی بهترین عملکرد رانسبت به نمونه مرجع داشته است. بعد از آن نیز به ترتیب قاب های مقاوم سازی شده به صورت کلی و با الیاف از جنس آرامید و شیشه بهترین نتایج را از خود نشان دادند.



## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از پژوهش انجام شده بررسی تأثیر الیاف پلیمری در تقویت و بهسازی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه بوده است. مراحل کار به این صورت بوده است که در ابتدا یک ساختمان بتنی سه طبقه مطابق با آیین‌نامه‌های امروزی و تحت بار ثقلی و زلزله طراحی شد. سپس یکی از قاب‌های بحرانی از این ساختمان به‌عنوان نمونه مرجع انتخاب شد. در گام بعد به‌منظور شبیه‌سازی این قاب با مواردی که دارای ضعف مقاومتی هستند، قاب مرجع عمداً تضعیف شد تا در مراحل بعدی به تقویت آن پرداخته شود. در ابتدا تقویت بصورت موضعی و در مناطق بحرانی صورت گرفت و تأثیر الیاف‌های پلیمری مختلف در بارگذاری پوش‌آوروچرخه‌ای بررسی شد. سپس تقویت کلی بر روی قاب تضعیف‌شده انجام شد و نتایج بارگذاری پوش‌آور و چرخه‌ای در این حالت نیز به دست آمد. نتایج حاکی از نقش موثر الیاف در تقویت قاب‌های خمشی بتنی می‌باشند که در ادامه جزییات آن‌ها بیان شده‌اند.

۱- نتایج بارگذاری‌های پوش‌آور در قاب‌های تقویت‌شده موضعی نشان می‌دهند که در صورت اثر استفاده از الیاف پلیمری تا حدودی افت مقاومت ایجاد شده در نمونه تضعیف‌شده جبران شده است، که می‌توان نتیجه گرفت استفاده از الیاف در ترمیم و افزایش ظرفیت باربری قاب بتنی مثر و واقع شده است. همچنین در تیرها و ستون‌ها ناحیه مفصل پلاستیک از بر تیرها به قسمت‌های داخلی تیرها منتقل شده‌اند و گسترده‌تر هم شده‌اند که این امر موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش خطر در ناحیه بحرانی اتصالات می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف کربن تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت باربری سیستم‌ها دارد و پس از آن به ترتیب الیاف‌های آرامید و شیشه در رده‌های بعد قرار دارند.

۲- با توجه به نتایج و منحنی‌های هیستریزیس به دست آمده، هم در قاب‌های تقویت‌شده به صورت موضعی و هم در قاب‌های تقویت‌شده به صورت کلی، استفاده از الیاف‌های پلیمری سبب بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌ها شده‌اند. استفاده از الیاف‌های پلیمری موجب شده است که رفتارهای چرخه‌ای سیستم‌ها علاوه بر جبران تضعیف صورت گرفته، نسبت به مدل مرجع نیز بهبودهای رفتاری چشمگیری داشته باشند. به‌طور کلی در بارگذاری چرخه‌ای، الیاف کربن و آرامید نتایج نزدیک به یکدیگر از خود نشان‌دادند ولی الیاف شیشه اندکی نتایج متفاوتی داشت. در واقع مدل تقویت‌شده با الیاف شیشه بهتر عمل کرده و سیکل‌های بیشتری را طی کرده است.

۳- با توجه به نتایج، در قاب‌های تقویت‌شده به صورت کلی استفاده از الیاف پلیمری سبب افزایش ظرفیت باربری و افزایش سختی در سیستم می‌شود. در صورتی افزایش سختی قابل ملاحظه نباشد (تعداد لایه‌های الیاف استفاده‌شده بهینه باشد) سبب افزایش ظرفیت باربری و همچنین تا حدودی بهبود رفتار چرخه‌ای می‌شود. با توجه به اینکه ظرفیت باربری کربن و آرامید از شیشه بیشتر است طبیعتاً مقدار افزایش باربری در مدل تقویت‌شده با کربن نیز بیشتر است که در مدل‌ها نیز مشاهده شده است.

۴- در تقویت کلی با توجه به محصور شدن بتن و آرماتورها درون لایه‌های FRP و همچنین به دلیل بالا بودن ظرفیت الیاف‌ها، در جابجایی‌های بالا اکثر قسمت‌های آرماتورها تنش بالایی را تحمل کرده و به حد جاری شدن و حتی زوال می‌رسند. همچنین در بتن نیز تنش‌ها بالایی ایجاد می‌شود. ایراد این رفتار آن است که در این حالت به محض ایجاد زوال در الیاف‌ها کل سیستم دچار زوال لحظه‌ای شده و کاملاً رفتاری ترد از خود نشان می‌دهد.

۵- در بارگذاری‌های چرخه‌ای قاب‌های تقویت‌شده به صورت کلی، افزایش ایجاد شده در سختی سیستم ناشی از تقویت کلی، باعث کاهش شکل‌پذیری آن‌ها شده است که نمود این موضوع در منحنی‌های هیستریزیس آن‌ها نیز قابل مشاهده است. (سطح درون نمودارها زیاد نبوده و اصطلاحاً نمودارها توپر نیستند) و این مطلب باعث می‌شود سیستم تقویت‌شده کلی رفتار تردی از خود نشان دهد. تمامی مدل‌های تقویت‌شده با الیاف‌های مختلف رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند و فقط تفاوت‌های آن‌ها در مقادیر افزایش ظرفیت باربری آنها می‌باشد.





۶- چون تمامی الیاف‌ها فوق‌الذکر بصورت دور پیچ (دوچپته) در سه لایه وبا ضخامت و مساحت یکسانی مورد استفاده و تقویت قرار گرفته‌اند، به ترتیب الیاف‌های آرامید، کربن و شیشه بیشترین هزینه‌های اقتصادی را دارند. البته درمقایسه تقویت موضعی نسبت به تقویت کلی، تقویت کلی با الیاف آرامید بیشترین هزینه اقتصادی را دارد و تقویت موضعی با الیاف شیشه کمترین هزینه را در بر دارد.

#### ۶- مراجع

- [1]- A. Version, 6.11., 2011, **User's manual**, Dassault Systems.
- [2]- Charalambidi, B., and Rousakis, T., and Karabinis, A., 2012, **Finite element modeling of reinforced concrete columns seismically strengthened through jacketing seismically strengthened through partial FRP jacketing**, criterion, 2, 1, 10-25.
- [3]- Ballinger, C., and Maeda, T., and Hoshijima, T., 1993, **Strengthening of reinforced concrete chimneys, columns and beams with carbon fiber reinforced plastics**, Special Publication, 138, 233-248.
- [4]- D'Ayala, D., and Penford, A., and Valentini, S., 2003, **Use of FRP fabric for strengthening of reinforced concrete beam-column joints**, in: Proceedings of the 10th International conference on structural faults and repair, London.
- [5]- Demers, M., and Neale, K. W., 1994, **Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets**, Developments in short and medium span bridge engineering, 895-905.
- [6]- Erik, M., and Heffernan, P., 1995, **Reinforced concrete slabs externally strengthened with FRP materials, Nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures**, London: E&FN Spon, 509-516.
- [7]- Fardis, M. N., and Khalili, H. H., 1982, **FRP-encased concrete as a structural material**, Magazine of concrete research, 34, 121, 191-202.
- [8]- Venture, S. J., and Committee, G. D., 2000, **Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings**, Federal Emergency Management Agency Washington, DC, USA.
- [9]- Garden, H., and Hollaway, L., and Thorne, A., 1997, **A preliminary evaluation of carbon fibre reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members**, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and buildings.
- [10]- Granata, P. J., and Parvin, A., 2001, **An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connections**, Composite structures, 53, 2, 163-171.
- [11]- Hashin, Z., 1981, **Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites**, Journal of Applied Mechanics, 48, 4, 846-852.
- [12]- Nanni, A., and Norris, M. S., 1995, **FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression**, Construction and Building Materials, 9, 5, 273-281.
- [13]- Kmiecik, P., and Kamiński, M., 2011, **Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration**, Archives of civil and mechanical engineering, 11, 3, 623-636.
- [14]- Lam, L., and Teng, J., 2001, **Strength of RC cantilever slabs bonded with GFRP strips**, Journal of Composites for Construction, 5, 4, 221-227.





[15]- Irwin,R., and Rahman, A., 2009, **FRP strengthening of concrete structures–design constraints and practical effects on construction detailing**, Available: Science Direct, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). [Accessed September, 2009]