



*Review Article*

## **Numerical Study of Compressive Members of FRP Hybrid Reinforced Concrete and its Modeling Under Concentric Loading**

**Behzad Ayoobi**

1. Master's degree in Civil Engineering, Earthquake Orientation, Iran University of Science and Technology Department, Tehran, Iran

Received: 25 January 2023; Revised: 18 April 2023; Accepted: 29 April 2023; Published: 29 April 2023

### **Abstract**

One of the challenges of using reinforced concrete structures is the corrosion of reinforcements in aggressive and corrosive environments such as offshore structures, stairs, etc., which will eventually lead to the destruction of concrete structures. To solve the corrosion problem in this category of structures, experts turned to the use of rebars with epoxy coating as a suitable alternative to conventional rebars. Most FRP rebars on the market today are made of high-performance continuous fibers such as glass, carbon and aramid, which are embedded in a polymer substrate by various composite production methods. FRP amplifiers are commonly used in various forms in the form of networks, rebars, textiles or cables. In this research, the numerical behavior of FRP hybrid reinforced concrete compression members and its modeling under concentric loading is investigated. All modeling is performed in ABAQUS finite element software and is evaluated using nonlinear analysis.

### **Keywords:**

Reinforced concrete, FRP rebar, Hybrid fittings, Reinforcement, Nonlinear analysis.

**Cite this article as:** ayoobi behzad. (2023). Numerical Study of Compressive Members of FRP Hybrid Reinforced Concrete and its Modeling Under Concentric Loading. *Civ Proj*; 5(1):51–69. <https://doi.org/10.22034/cpj.2023.394539.1193>

**ISSN:** 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the authors.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

## بررسی عددی اعضای فشاری بتن مسلح هیبریدی FRP و مدل سازی آن تحت بارگذاری هم مرکز

بهزاد ایوبی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۰۵ بهمن ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۲۹ فروردین ۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۰۹ اردیبهشت ۱۴۰۲؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۹ اردیبهشت ۱۴۰۲

### چکیده

یکی از چالش های استفاده از سازه های بتن مسلح، خوردگی آرماتورها در محیط های مهاجم و خوردنده مانند سازه های دریایی، پل ها و ... می باشد که نهایتاً منجر به تخریب سازه های بتنی خواهد شد. برای حل مشکل خوردگی در این دسته از سازه ها، متخصصان به سمت استفاده از میلگردهایی با پوشش اپوکسی به عنوان جایگزینی مناسب برای میلگردهای معمولی روی آوردند. امروزه عمده میلگردهای FRP موجود در بازار، حاصل از الیاف ممتد با کارایی بالا نظیر شیشه، کربن و آرامید هستند که به واسطه روش های مختلف تولید کامپوزیت درون یک بستر پلیمری جایگذاری می شوند. تقویت کننده های FRP عموماً در اشکال مختلفی به صورت شبکه ها، میلگردها، منسوج ها و یا کابل ها مورد استفاده قرار می گیرند. در این پژوهش به بررسی رفتار عددی اعضای فشاری بتن مسلح هیبریدی FRP و مدلسازی آن تحت بارگذاری هم مرکز پرداخته می شود. کلیه مدلسازی ها در نرم افزار المان محدودی ABAQUS صورت گرفته است و با استفاده از تحلیل های غیرخطی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

### کلمات کلیدی

بتن مسلح، میلگرد FRP، اتصالات هیبریدی، مقاوم سازی، تحلیل غیرخطی.

## ۱. مقدمه

مقاوم‌سازی در علم نوین مهندسی عمران به معنای بالا بردن مقاومت یک سازه (ساختمان) در برابر نیروهای وارده است. امروزه از این اصطلاح بیشتر در مورد نیروی جانبی استفاده می‌شود. مقاوم‌سازی در مورد ساختمان‌های از پیش ساخته شده کاربرد دارد. معمولاً برای ساختمان‌های در حال احداث رعایت اصول و مقررات فنی لازم می‌باشد و مقاوم‌سازی معنای خاصی در بر ندارد. بشر کنونی نمی‌تواند از وقوع زلزله جلوگیری نماید. اما می‌تواند با بکارگیری یکسری روش‌ها از بوجود آمدن خسارات مالی و فجایع انسانی و همچنین آسیب‌هایی که ممکن است در طولانی مدت در اثر وقوع زلزله بوجود آید جلوگیری نماید.

پس از زلزله‌های سال ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه، کاربرد FRP به منظور تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و بنایی گسترش یافت. سیستم تقویتی FRP یکی از مصالح کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است. میلگردها و پروفیل‌ها به روش پالتروژن تولید می‌گردند که در این روش دسته‌های الیاف پس از آغشته شدن با رزین پس از عبور از یک قالب در کنار هم قرار گرفته و یک پروفیل دارای مقطع ثابت را به وجود می‌آورد. محصولات پلیمری مورد استفاده در سازه‌ها به شکل ورق، میلگرد، مش و پروفیل‌های FRP وجود دارد. از این محصولات برای ساخت و تقویت سازه‌ها استفاده می‌شود (سان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱).

بطور کلی سه روش عملی برای ارتقاء شرایط موجود به منظور مقابله با آثار مخرب زلزله وجود دارد (کوبورن و اسپنس<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲).

الف) کاهش نیاز زلزله (Demand)

ب) افزایش مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌ها و سازه‌ها

ج) کاهش اثرات غیر مستقیم زلزله بر روی شرایط طبیعی، زمینی، سایر بخش‌ها و ...

بنابراین طراح می‌تواند بسته به شرایط و پارامترهای عنوان شده در بخش‌های فوق الذکر، هر یک از روش‌های مطلوب را انتخاب و بکار برد. حتی برای دو ساختمان مشابه واقع در دو محل متفاوت که ممکن است از نظر شرایط خاک، امکانات دسترسی به ابزار و نیروی فنی با یکدیگر متفاوت باشند، روش‌های ارتقاء ظرفیت باربری و سطح ایمنی، ممکن است بسیار متفاوت باشد و باید توجه داشت راه حل‌ها قابل فرمول‌بندی نبوده و هر پروژه‌ای می‌بایست با شرایط خودش سنجیده شود. اصول کلی ذیل را می‌توان در انتخاب بهترین و عملی‌ترین روش‌ها مفید دانست:

- کاهش دادن نیروی زلزله وارد بر ساختمان

- افزودن سیستم سازه‌ای جدید برای مقابله با نیروی زلزله

- تقویت اعضای موجود ساختمانی

- به حداقل رسانیدن فواصل مرکز جرم، سختی و مقاوت و کاهش بی نظمی‌ها.

قاب خمشی، متشکل از تیرها و ستون‌هایی است که به یکدیگر با اتصالات صلب متصل شده و تشکیل قاب می‌دهند. یعنی اتصال قابلیت انتقال لنگر از تیر به ستون را داراست. همانطور که اشاره شد سیستم قاب خمشی مجموعه‌ای از تیرها و ستون‌ها و اتصالات صلب است که به طور همزمان نیروهای جانبی و ثقلی را تحمل می‌کنند. در این سیستم چون هیچ عضو اضافی مثل مهاربند یا دیوار برشی وجود ندارد که در برابر تغییر شکل‌های جانبی مقاومت کند، بنابراین سازه از شکل‌پذیری بالایی برخوردار است. به

<sup>1</sup> sun

<sup>2</sup> Coburn & Spence

عبارتی در صورت وارد شدن نیروهای جانبی، قاب سازه مشابه موم در برابر این نیروها تغییر شکل داده و بدین ترتیب مانع از خرابی ساختمان می‌شود.

با توجه به اینکه کلیه اتصالات در سازه های بتنی، اتصال صلب هستند و وظیفه تحمل لنگر را در زلزله ایفا می کنند، توجه به اتصالات تیر و ستون در بتن مسلح و لزوم بهسازی و مقاوم سازی این بخش از سازه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد.

به طور کلی می‌توان گفت اتصال تیر و ستون های بتنی به یکدیگر از مناطق حساس یک سازه هستند، عدم مقاوم سازی این بخش از اتصالات سازه می‌تواند باعث بروز ضعف و سپس ایجاد آسیب در کل ساختمان سازه گردد. برای مقاوم سازی محل های اتصال این بخش از سازه های بتنی می‌توان از سیستم مقاوم سازی با FRP استفاده کرد که تا حدودی زیادی می‌تواند منجر به مقاوم سازی ساختمان شود لذا انجام هر گونه تحقیقی در این زمینه (رفتار اتصالات هیبریدی تیر به ستون قاب خمشی بتن مسلح با استفاده از میلگردهای FRP و فولادی، رفتار عددی اعضای فشاری بتن مسلح هیبریدی FRP و مدلسازی آن تحت بارگذاری هم مرکز) می‌تواند ضروری و پر اهمیت باشد.

بنابراین در این مقاله تلاش می‌شود تا مسائل مختلف قابل طرح در این خصوص مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق برای تحلیل و آنالیز اتصالات هیبریدی تیر به ستون قاب خمشی بتن مسلح با استفاده از میلگردهای فولادی و FRP از روش المان محدود استفاده خواهد شد. حال نمونه های مدلسازی شده را مطابق جدول زیر معرفی می‌کنیم.

جدول ۱: مدل های مورد مطالعه

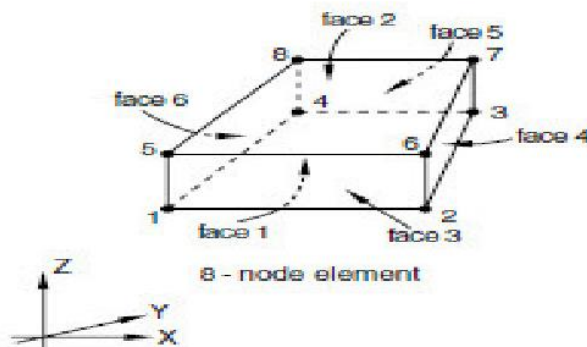
| شماره مدل | توضیح مدل  |
|-----------|--|
| ۱         | اتصال بتنی معمولی  |
| ۲         | اتصال بتنی هیبریدی                                       |
| ۳         | اتصال بتنی هیبریدی مقاوم سازی شده به وسیله ورق FRP       |
| ۴         | اتصال بتنی هیبریدی مقاوم سازی شده به وسیله میلگردهای FRP |

هدف از انجام این مطالعه بررسی دو عامل می‌باشد: ۱- حل مشکلاتی که در محل کار رؤیت می‌شود ۲- افزایش دانش بشری در زمینه ای که محقق در آن به پژوهش پرداخته است. در این پژوهش انواع مختلف اتصالات معمولی، هیبریدی و مقاوم سازی شده به وسیله ورق و میلگرد FRP مورد بررسی قرار گرفتند. برای مقایسه مدل های مختلف یک نمونه اتصال بتنی معمولی در آباکوس طراحی شد و سپس نوع اتصال از حالت معمولی به هیبریدی تغییر یافته و در نهایت به بررسی مقاوم سازی اتصال هیبریدی توسط ورق و میلگرد های FRP پرداخته شده است. در نهایت نتایج ۴ مدل طراحی شده را با یکدیگر مقایسه کرده و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

نرم افزاری که از آن جهت مدل سازی نمونه ها استفاده شده است، نرم افزار تحلیل المان محدود ABAQUS می باشد. تئوری کامل این نرم افزار مبتنی بر تحلیل غیر خطی المان محدود پیشرفته است. قابلیت های این نرم افزار نسبت به نرم افزارهای المان محدود مشابه شامل توانایی مونتاژ نمودن قطعات در محیط جداگانه، سادگی در ایجاد تماس بین سطوح، دارا بودن مدل های رفتاری پیشرفته و متنوع برای مواد مختلف (فلزات، لاستیک، بتن، خاک، سنگ، سیالات و...)، امکان ایجاد سریع مدل های با هندسه پیچیده، سهولت در ورود و خروج مدل با پسوندهای شناخته شده از نرم افزارهای مدل سازی و امکان تحلیل انواع مسائل پیچیده مهندسی است.

### ۳. خصوصیات المان معرفی شده برای رفتار بتن

نرم افزار ABAQUS با دارا بودن کتابخانه وسیعی از المان ها ابزاری قدرتمند برای حل مسائل مختلف می باشد. برای مدل سازی بتن با توجه به سه بعدی بودن مدل سازی قاب و اعضای قابی (تیر و ستون) در این پروژه از المان سه بعدی هشت گره ای C3D8R استفاده شده است.



شکل (۱): ترتیب گره ها و شماره صفحه ها در المان C3D8R

المان C3D8R دارای سه درجه آزادی بوده و با توجه به شرایط تکیه گاهی در هر یک از این جهات می توان آن را مقید ساخت. در نرم افزار ABAQUS مدل های ساختاری مختلفی برای آنالیز بتن تحت فشارهای محصوره پایین پیشنهاد میشود:

مدل ترک پخش شونده بتن در ABAQUS استاندارد Concrete Smeardcracking

مدل ترک ترد و شکننده بتن در آباکوس Explicit cracking Model for concrete

مدل پلاستیسیته آسیب بتن concrete Damage plasticity

در آباکوس - استاندارد و Explicit

همه مدل ها به گونه ای طراحی شده اند که قابلیت مدل سازی بتن مسلح و غیر مسلح همچنین سایر مواد ترد مشابه را در انواع سازه ها اعم از المان تیرها، خرپاها، پوسته ها"، و المانهای سه بعدی ۱ دارا باشند. در این مقاله برای مدل سازی رفتار بتن از مدل مدل پلاستیسیته آسیب استفاده گردیده است.

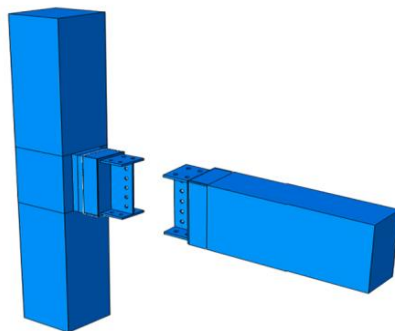
### ۴. مشخصات اتصال مدل سازی شده

در اینجا یک اتصال خارجی تیر به ستون بتن آرمه با مقیاس حد قبل و بعد از تقویت تحت اثر بارهای سیکلی که توسط محققینی که در سال ۲۰۱۹ در دانشگاه کوئینزلند استرالیا آزمایش شده بود در نظر گرفته شد. این اتصال بر اساس آیین نامه استرالیا طراحی و ساخته شده بود. مشخصات هندسی اتصال و خصوصیات مواد به صورت زیر است:

مقطع تیر به عرض ۳۰۰ و ارتفاع آن ۲۴۰ میلی متر و عرض ستون ها ۳۰۰ میلی متر و عمق آنها ۳۰۰ میلی متر است. تیر و ستون ها هر کدام شامل آرماتورهای طولی به قطر ۱۲ میلی متر و به مقاومت  $MPa420$  هستند که در چهار گوشه مقطع قرار دارند. میلگردهای عرضی به قطر 6 میلی متر و به فاصله مرکز به مرکز ۱۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده اند. همچنین در محل اتصال تیر به ستون

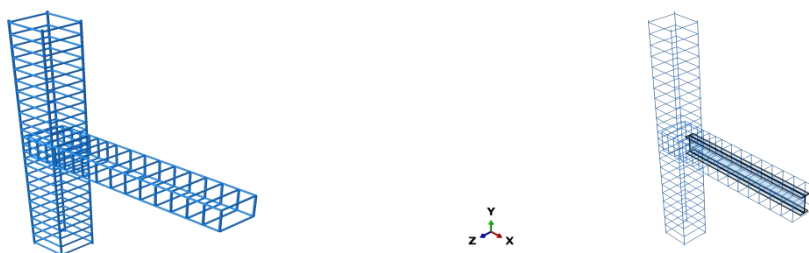
نیز از دو عدد آرماتور برشی به قطر 6.5 میلی‌متر استفاده شده است و آرماتورهای طولی تیر، به صورت خم در هسته اتصال مهار شده‌اند.

برای اتصال هیبریدی نیز مطابق با تحقیق یی<sup>۳</sup> در سال ۲۰۲۱ از یک تیر آهن I18 در داخل تیر بتنی استفاده شده است. شکل (۲) نمونه ای از مدل عددی این تحقیق می‌باشد که در این تحقیق نیز استفاده شده است.



شکل (۲): اتصال هیبریدی تیر به ستون بتنی یی در سال ۲۰۲۱

در مدلی دیگر نیز برای تقویت تیر از ورق‌های CFRP با مقاومت کششی با مقاومت کششی  $3900 \text{ MPa}$  و ضخامت  $0.195$  میلی‌متر و به طول  $600$  میلی‌متر از بر اتصال به سمت تیر استفاده شده است که به آن تقویت جان گفته می‌شود.



شکل (۳): اتصال هیبریدی در حالت تقویت نشده

#### ۱.۴. مدل‌سازی اتصال موردنظر در نرم‌افزار ABAQUS

برای مدل‌سازی هندسی، در ابتدا قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده این اتصال را در نرم‌افزار ایجاد نموده سپس قسمت‌های مختلف را در کنار یک دیگر قرار می‌دهیم. برای مدل‌سازی بتن و فولاد و ورق‌های FRP از المان‌های حجمی و صفحه‌ای و برای مدل‌سازی میلگردها از المان‌های خریایی استفاده نمودیم.

#### ۲.۴. نحوه بارگذاری سیکلی در ABAQUS

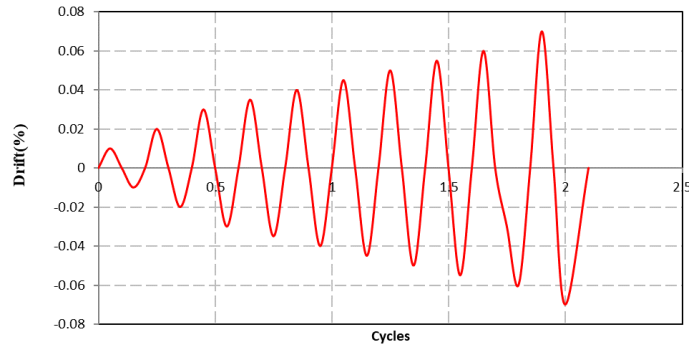
بارگذاری اتصال به صورت سیکلی و نحوه اعمال آن به صورت جابه‌جایی می‌باشد. نحوه بارگذاری در سر تیر و به صورت اعمال جابه‌جایی می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن ذکر کرد این است که در نرم‌افزار ABAQUS می‌توان بار را به صورت جابه‌جایی به سازه اعمال نمود. در اولین بارگذاری صعودی، بار به صورت جابه‌جایی به تیر وارد می‌شود. در آغاز مرحله دوم یعنی جایی که بارگذاری صعودی پایان یافته و بارگذاری نزولی وارد می‌شود، بارگذاری به طور آهسته کم شده و به صفر می‌رسد و سپس بارگذاری نزولی

<sup>3</sup> YE

شروع می‌شود و تا انتهای زمان دوم ادامه پیدا می‌کند. در سیکل‌های بعدی نیز بار به همین ترتیب وارد می‌شود. همان‌طور که گفته شد منحنی بارگذاری سیکلی در آزمایشگاه وابسته به شکل پذیری اتصال می‌باشد.

### ۳.۴. تهیه منحنی بارگذاری

برای تهیه منحنی بارگذاری سیکلی نیز به جابه‌جایی نظیر تسلیم آرماتورهای طولی تیر می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیزهای نمونه اتصال اصلی نشان می‌دهد که آرماتورهای طولی در جابه‌جایی ۱۰۸ میلی‌متر به تنش تسلیم رسیده‌اند.



شکل (۴): منحنی سیکلی بارگذاری اتصالات

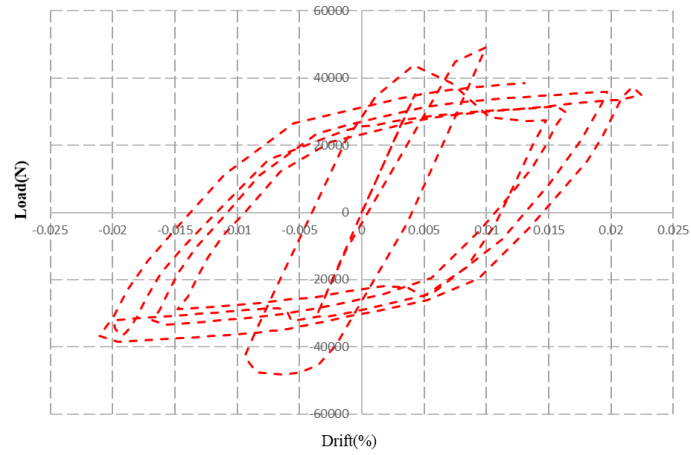
## ۵. بررسی نتایج

### ۱.۵. نتایج تحلیل اتصال معمولی

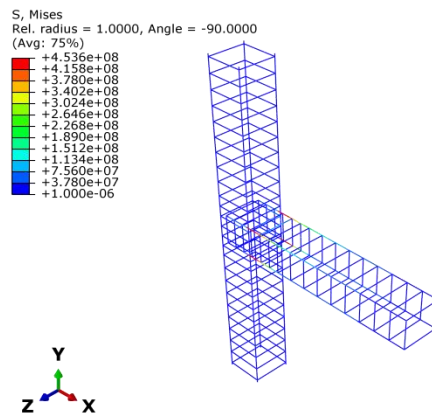
در این قسمت پارامترهای مختلفی از نتایج به‌دست‌آمده ارائه می‌شود:

الف: بار نهایی، بار نظیر تسلیم آرماتورهای طولی و بار نظیر ترک‌خوردگی اولیه:

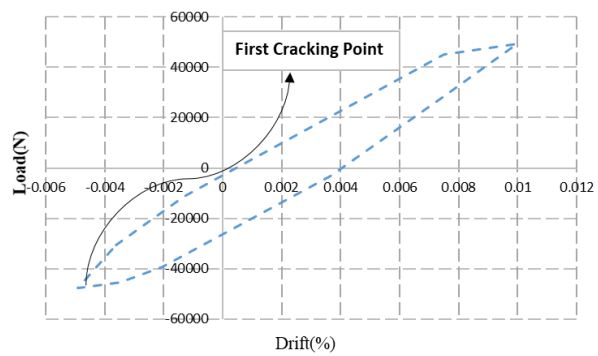
در شکل ۵ منحنی هیستریزس به‌دست‌آمده از روش عددی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در منحنی هیستریزسی حاصل از روش آنالیز عددی حداکثر ظرفیت باربری اتصال خارجی اصلی (تقویت نشده) تیر به ستون بتن‌آرمه به روش اجزاء محدود در حالت صعودی برابر با ۹۵/۱۸ KN و در حالت نزولی برابر با ۳۶/۱۸ KN می‌باشد. همچنین آرماتورهای طولی در بار برابر با ۶۸/۱۷ KN به تنش تسلیم رسیده‌اند. همان‌طور که در شکل موردنظر مشاهده می‌نماییم محل تسلیم شدن آرماتورهای طولی در بر اتصال بوده و در نتیجه مفصل پلاستیک برای اولین بار در این ناحیه تشکیل می‌گردد و به مرور بارگذاری‌های بیشتر این مفصل نیز به داخل هسته اتصال نفوذ کرده و در نهایت منجر به خرابی اتصال می‌گردد. همچنین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده طبق روش عددی حداکثر جابه‌جایی تحمل شده توسط اتصال در جهت مثبت برابر با ۳۹/۷ mm می‌باشد. شکل زیر تنش تسلیم در آرماتورهای طولی اتصال معمولی (فولادی) بدون تقویت همچنین در نمونه بررسی شده به روش عددی نشان داده شده که در سیکل اول و ۴۸۸/۱۰ نیوتن شکل زیر بار نظیر اولین ترک‌خوردگی برابر با ۵۲/۲ KN اتفاق افتاده است.



شکل (۵): نمودار هیستریزس اتصال تیر به ستون معمولی

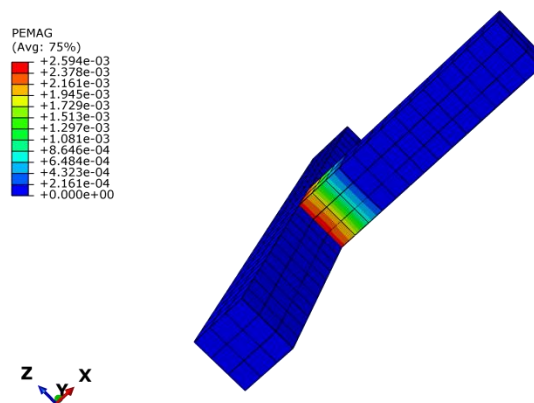


شکل (۶): تنش های تسلیم آرماتورها



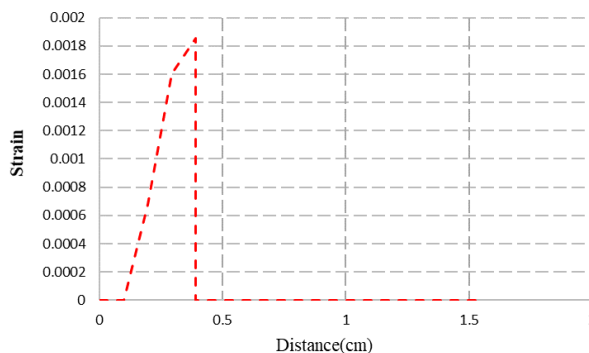
شکل (۷): بررسی وقوع اولین ترک خوردگی با توجه به منحنی هیستریزس به دست آمده از روش





شکل (۸): تشکیل شدن اولین ترکها در زیر تیر و در بر اتصال در اولین سیکل بارگذاری و بالتبع آن کاهش سختی در المانهای بتنی همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد وقوع اولین ترک و به تبع آن کاهش مقاومت در اولین سیکل بارگذاری به خوبی در نرم‌افزار قابل مشاهده می‌باشد. در حقیقت با وقوع ترک خوردگی و تسلیم آرماتورها معمولاً در منحنی‌های هیستریزس به دست آمده از اعضای بتنی پدیده ای بنام پینچینگ رخ می‌دهد که عدم توانایی مدل‌سازی این پدیده در نرم‌افزار آباکوس یکی از عیب‌های این نرم‌افزار می‌باشد که با مدل‌سازی‌های مختلف و تعریف رفتارهای مختلف برای مواد بتنی در این مقاله نتوانستیم به این پدیده دست پیدا نماییم البته این موضوع و بررسی امکان مدل‌سازی پدیده پینچینگ در نرم‌افزار آباکوس قبلاً توسط محققین زیادی بررسی گردیده است از جمله این موضوع نیز در یکی از پایان نامه‌های دانشگاه صنعتی اصفهان بروی رفتار بتن بررسی گردیده بود و در نهایت محقق نتوانسته بود به پدیده پینچینگ در نرم‌افزار ABAQUS دست پیدا کند.

باتوجه به نتایج به دست آمده همچنین در شکل ۹ می‌توان مقدار کرنش آرماتور طولی تیر را در لحظه اولین تسلیم مشاهده نمود که این نمودار خود مویدی از تشکیل مفصل پلاستیک در فاصله ای تقریباً ۲۵ سانتی متری از برستون می‌باشد.



شکل (۹): نمایش کرنش در طول آرماتور طولی تیر

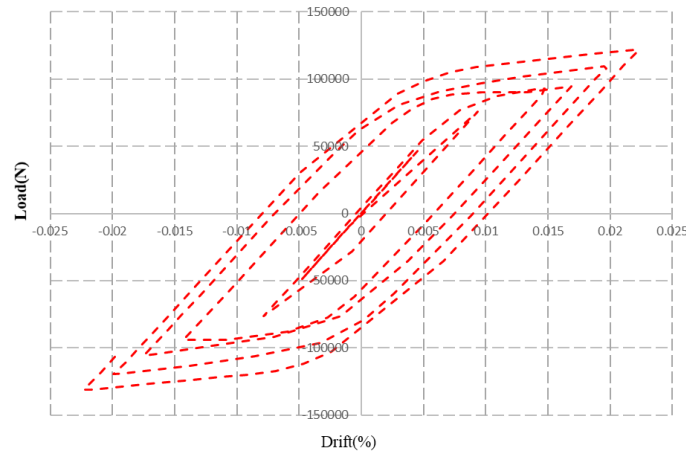
همچنین باتوجه به نتایج به دست آمده برای این نمونه سختی نظیر اولین نقط تسلیم برای این نمونه برابر با  $1/10 \text{ KN/mm}$  به دست آمد.

## ۶. نتایج تحلیل اتصال هیبریدی

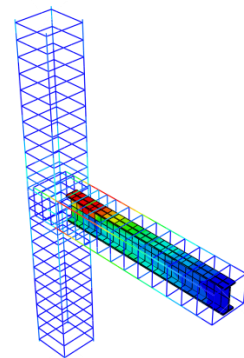
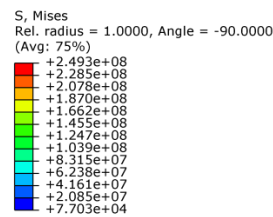
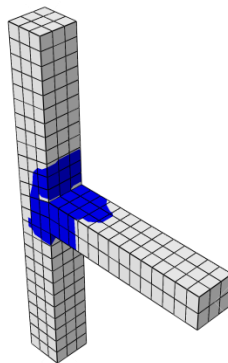
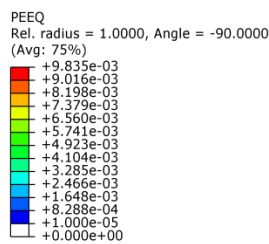
باتوجه به نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبلی و در بارگذاری‌های مونوتونیک انجام شده بروی نمونه‌های مورد نظر مشخص گردید که برای مدل اتصال هیبریدی، مفصل پلاستیک در داخل اتصال تشکیل می‌گردد اکنون در این قسمت در ابتدا نتایج به دست آمده از آنالیزاتصال هیبریدی تحت بار سیکلی به اختصار توضیح داده می‌شود و در ادامه نیز به نتایج به دست آمده از آنالیز اتصال هیبریدی با ورق ها و آرماتورهای CFRP بررسی خواهد شد.

بار نهایی، بار نظیر تسلیم آرماتورهای طولی بار و نظیر ترک خوردگی اولیه:

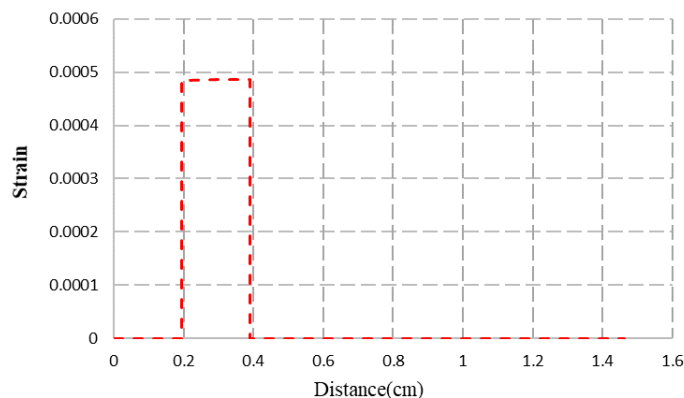
در شکل زیر منحنی هیستریزیس به دست آمده از روش عددی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می کنید در منحنی هیستریزیس حاصل از روش آنالیز عددی حداکثر ظرفیت باربری اتصال خارجی اصلی هیبریدی تیر به ستون بتن آرمه به روش اجزاء محدود برابر با ۱۳۲۰ KN می باشد. همچنین آرماتورهای طولی برابر با ۱۶۲ KN به تنش تسلیم رسیده اند. تیر I18 در تنش ۲۴۳ KN به تنش تسلیم رسیده است. با توجه به نتایج به دست آمده مفصل پلاستیک علیرغم تقویت جان تیر با یک I18 از بر اتصال تیر به ستون به سمت تیر جابجا نشده است. بنابراین مفصل پلاستیک در فاصله تقریباً ۲۵ سانتیمتری از بر ستون تشکیل گردیده است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده برای این نمونه به روش عددی وقوع اولین ترک خوردگی در ۲۴۵KN به وقوع پیوست.



شکل (۱۰): نمودار هیستریزیس اتصال تیر به ستون هیبریدی



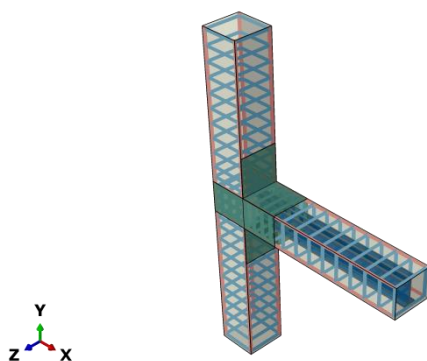
شکل (۱۱): اتصال هیبریدی به همراه تیر I18



شکل (۱۲): ناحیه اولین تسلیم شدگی آرماتور طولی تیر

## ۷. نتایج تحلیل اتصال هیبریدی با ورق های CFRP

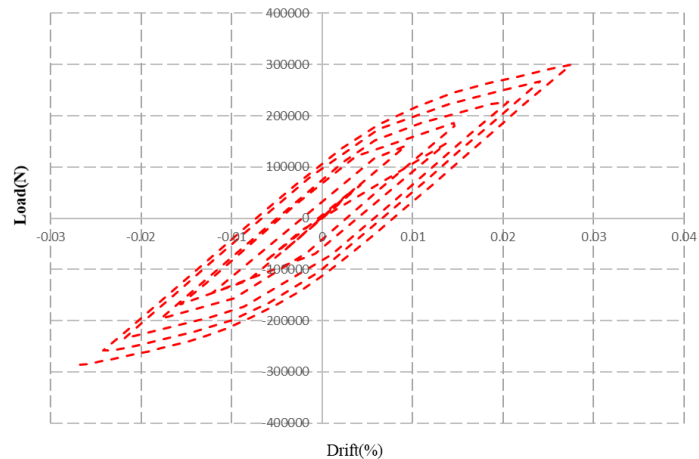
باتوجه به نتایج به دست آمده در قسمت قبلی بنابراین در این قسمت تصمیم بر آن شد تا از لایه ورق های CFRP به منظور بررسی رفتار لرزه ای و همچنین پارامترهای مختلف به دست آمده از نتایج روش عددی استفاده نمائیم. این نمونه با ورقه های الیافی FRP در ناحیه جان تیر تقویت شده است و تحت اثر بار سیکلی همانند مدل اتصال هیبریدی قرار گرفته است. ورقه های CFRP دارای طولی برابر با ۶۰۰ میلی متر بوده به طوریکه ۳۰۰ میلی متر این طول بروی تیر پوشانیده شده است و ما بقی طول آن در ادامه وجه جانبی تیر به روی ستون ادامه داده شده است.



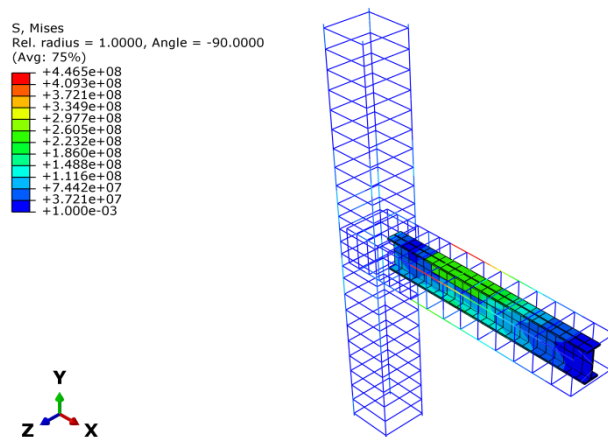
شکل (۱۳): نمونه تقویت شده با لایه ورقه های CFRP

بار نهایی، بار نظیر تسلیم آرماتورهای طولی و بار نظیر ترک خوردگی اولیه:

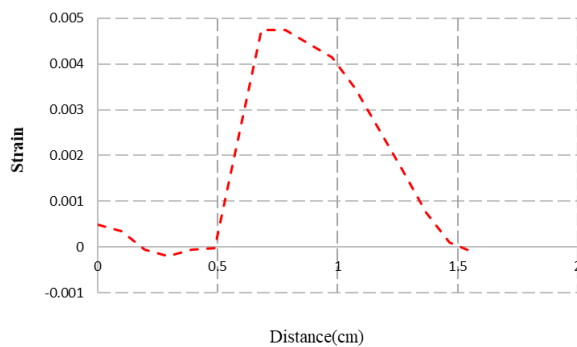
در شکل ۱۴ منحنی هیستریزس به دست آمده از روش عددی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می کنید در منحنی هیستریزس حاصل از روش آنالیز عددی حداکثر ظرفیت باربری اتصال خارجی اصلی تقویت شده با لایه الیاف CFRP تیر به ستون بتن آرمه به روش اجزاء محدود برابر با ۳۰۱/۲۳ KN می باشد. همچنین آرماتورهای طولی برابر با ۱۷۰/۲ KN به تنش تسلیم رسیده اند. شکل مفصل پلاستیک به دلیل تقویت جان تیر با ورقه های CFRP از بر اتصال تیر به ستون به سمت تیر جابجا شده است. بنابراین مفصل پلاستیک در فاصله تقریباً ۵۳۱ میلی متری از بر ستون و بعد از محل ورق CFRP در تیر تشکیل شده است که در شکل زیر این موضوع به خوبی نشان داده شده است. همچنین در شکل زیر میزان تغییرات کرنش در آرماتورهای طولی تیر نشان داده شده است. میزان این تغییرات در فاصله ۵۳۱ میلی متری از بر اتصال به مقدار حداکثر خود رسیده است که نشان دهنده تشکیل شدن مفصل پلاستیک در این ناحیه می باشد. و این حاکی از موفقیت این پژوهش در بررسی انتقال مفصل پلاستیک از طریق ورقه های FRP از بر اتصال به داخل تیر اتصال می باشد.



شکل (۱۴): منحنی هیستریزیس اتصال تقویت شده با لایه الیاف CFRP

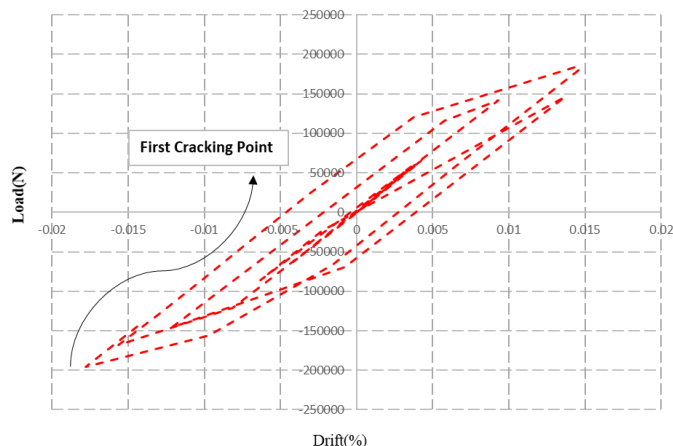


شکل (۱۵): تنش های اولین تسلیم شدگی در بر ورق های CFRP



شکل (۱۶): میزان تغییرات کرنش

در آمارتوهای طولی تیر نمونه تقویت شده با توجه به نتایج به دست آمده برای این نمونه حداکثر جابه جایی تحمل شده توسط اتصال در جهت مثبت برابر با ۶۹۹۷/۵۸ mm و حداکثر جابه جایی تحمل شده در جهت منفی برابر با ۶۹۹۳/۰۸ می باشد. همچنین برای نمونه تقویت شده وقوع اولین ترک خوردگی در بار معادل ۱۹۳/۱۲ KN و در جابه جایی نظیر ۶/۲ میلی متر به وقوع پیوست.



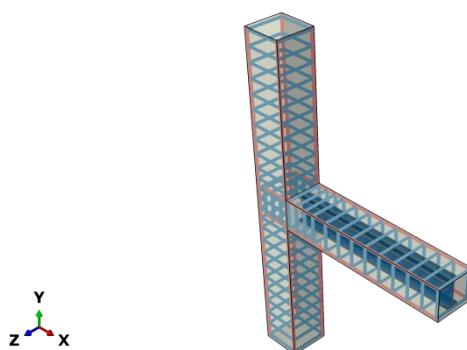
شکل (۱۷): وقوع اولین ترک خوردگی در بتن

### ۱.۷. میزان اتلاف انرژی

ورقه‌های CFRP قرار گرفته در جان تیر باعث انتقال مفصل پلاستیک از قسمت برستون به سمت تیر اتصال شده‌اند. اما انرژی تلف شده توسط آنها ناچیز بوده و در میزان اتلاف انرژی کل اتصال قبل و بعد از تقویت تاثیر کمی داشته‌اند. وجود ورق‌های CFRP باعث شده تا بخشی از نیروی وارده بر اتصال توسط آنها تحمل شده و آرماتورهای طولی تیر دیرتر به تسلیم برسند. به همین لحاظ نمونه تقویت شده انرژی بیشتری را تحمل کرده‌اند. قسمت زیادی از این انرژی توسط آرماتورهای طولی نیز اتلاف شده است.

### ۲.۷. نتایج تحلیل اتصال هیبریدی با آرماتورهای FRP

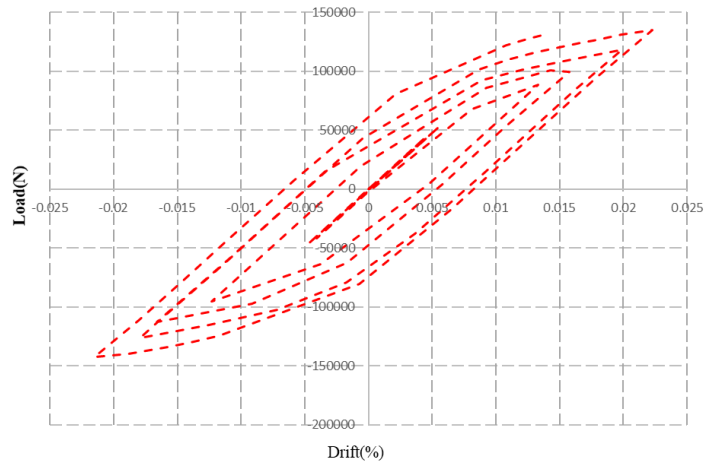
در قسمت‌های قبلی نمونه‌هایی از اتصالات هیبریدی در حالی که ورق CFRP به جان تیر و در ادامه به سطح جانبی ستون ادامه داده شده بودند بررسی گردید. در این بخش حالتی را مطابق شکل زیر بررسی می‌نمائیم که در آن آرماتور FRP استفاده شده است.



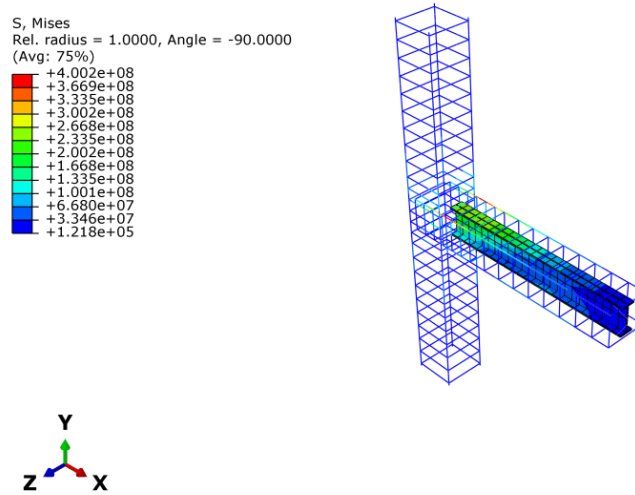
شکل (۱۸): مدل اتصال هیبریدی با آرماتور FRP

در شکل ۱۹ منحنی هیستریزس به دست آمده از روش عددی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در منحنی هیستریزس حاصل از روش آنالیز عددی حداکثر ظرفیت باربری اتصال هیبریدی با آرماتورهای FRP به روش اجزاء محدود برابر با ۱۴۷ KN می‌باشد. همچنین آرماتورهای طولی در بار برابر با ۹۷/۱۹ KN به تنش تسلیم رسیده‌اند. باتوجه به این شکل مفصل پلاستیک با وجود آرماتورهای CFRP از بر اتصال تیر به ستون به سمت تیر جابجا نگردید. در این حالت مفصل پلاستیک در

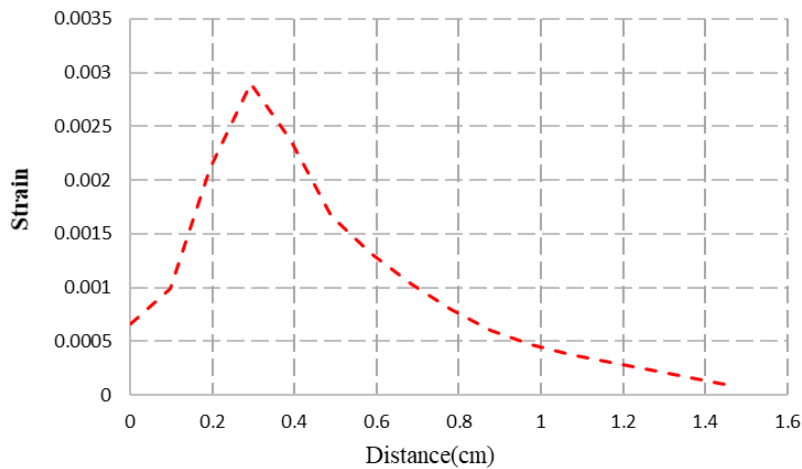
فاصله تقریباً ۳۲۷ میلی‌متری از بر ستون به سمت داخل در هسته اتصال تشکیل گردید که این موضوع به خوبی نشان داده شده است. همچنین در شکل زیر میزان تغییرات کرنش در آرماتورهای طولی تیر نشان داده شده است.



شکل (۱۹): منحنی هیستریزس اتصال هیبریدی با آرماتورهای CFRP



شکل (۲۰): اولین تسلیم آرماتورهای طولی در هسته اتصال



شکل (۲۱): میزان تغییرات کرنش در طول آرماتورهای FRP

## ۸. مقایسه نتایج نمونه‌های آنالیز شده به روش عددی

در این قسمت پارامترهای مختلفی را که در قسمت قبلی برای نمونه‌های مختلف به دست آمدند را با یک دیگر مقایسه می‌نمائیم.

### ۱.۸. بارنهائی

جدول (۲): جدول نتایج حاصل از روش عددی برای بار نهایی اتصالات در حالات مختلف

| نوع مدل                      | ظرفیت بارنهائی (KN) |
|------------------------------|---------------------|
| اتصال ساده                   | 53                  |
| اتصال هیبریدی                | ۱۲۳                 |
| اتصال هیبرید با ورق های CFRP | ۳۰۱                 |
| اتصال هیبریدی با آرماتور FRP | ۱۴۸                 |

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌نمائیم نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود برای حالت‌های مختلف بیان گردیده است که طبق این نتایج ظرفیت باربری نهایی در اتصال تقویت شده بوسیله یک لایه الیاف CFRP به میزان ۴۴ درصد افزایش نسبت به نمونه ساده و نیز نمونه آرماتور FRP به نیز دارای 10 درصد افزایش باربری نسبت به نمونه ساده بوده و این در حالی است که در اتصال هیبریدی رشد قابل توجهی در ظرفیت باربری نسبت به نمونه ساده می‌باشد.

### ۲.۸. بار نظیر تسلیم آرماتورهای طولی

جدول (۳): نتایج حاصل از روش عددی برای بار تسلیم آرماتورهای اتصالات در حالات مختلف

| نوع مدل                      | تنش تسلیم (KN) |
|------------------------------|----------------|
| اتصال ساده                   | ۶۸.۱۷          |
| اتصال هیبریدی                | ۱۶۲            |
| اتصال هیبرید با ورق های CFRP | ۱۷۲            |
| اتصال هیبریدی با آرماتور FRP | ۹۷             |

در این قسمت نیز طبق نتایج به دست آمده از روش عددی در جدول بالا بار تسلیم اولین آرماتورهای طولی تیر با یک دیگر مقایسه شده‌اند که طبق این نتایج در نمونه تقویت شده با یک الیاف CFRP مقدار بار تسلیم آرماتورهای طولی رشد، در نمونه با آرماتور FRP بار تسلیم رشد کمتر داشته است.

### ۲.۳. بار ترک خوردگی

جدول (۴): نتایج حاصل از روش عددی برای بار نظیر ترک خوردگی اتصالات در حالات مختلف

| نوع مدل                      | تنش ترک خوردگی (KN) |
|------------------------------|---------------------|
| اتصال ساده                   | ۵۲                  |
| اتصال هیبریدی                | ۲۰۵                 |
| اتصال هیبرید با ورق های CFRP | ۲۳۰                 |
| اتصال هیبریدی با آرماتور FRP | ۱۷۸                 |

در جدول (۴) مقادیر بار معادل که در آن اولین ترک خوردگی در طول سیکل‌های بارگذاری رخ می‌دهد مشاهده می‌گردد که در بین نمونه‌های تقویت شده نمونه تقویت شده با لایه کامپوزیت CFRP دیرتر از بقیه نمونه‌ها و یا در بار بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر دچار ترک خوردگی می‌گردد.

## ۹. قابلیت انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک

تاکنون طی اندازه گیری پارامترهای مختلف در قسمت‌های قبلی مشاهده گردید که نمونه‌های تقویت شده بوسیله ورق های FRP نسبت به نمونه ساده دارای برتری‌هایی بوده‌اند و از میان آن نمونه‌ها بهترین نمونه که دارای بیشترین رشد در بین نمونه‌ها و در پارامترهای مختلف می‌باشد. در این قسمت نیز طبق مشاهدات اندازه گیری شده این نمونه دارای بهترین عملکرد در انتقال مفصل پلاستیک اتصال از سمت هسته اتصال به سمت داخل تیر و در فاصله ۳۰۰ mm و در بر الیاف CFRP را دارد.

## ۱۰. بحث و نتیجه گیری

نهدی<sup>۴</sup> و سعید<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۵ به آزمایش بررسی تاثیر استفاده از میلگردهای GFRP در اتصالات بتن آرمه و مقایسه با میلگردهای فولادی پرداختند. ایشان در این پژوهش از دو نمونه J1 و J4 برای تحلیل فرضیه های مورد نظر استفاده نمودند. نمونه J1 یک اتصال استاندارد تیر- ستون بتنی مسلح است که با استفاده از آیین‌نامه‌های CSA و ACI طراحی شده‌اند. نمونه J4 بر خلاف نمونه قبلی که با میلگرد فولادی مسلح گردیده بود، با استفاده از میلگرد GFRP مسلح شده است. نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای FRP رفتار سیستم را در محدوده الاستیک نگه می‌دارد در حالیکه در اتصالات استاندارد که با میلگردهای فولادی مسلح می‌شوند رفتار سازه به مرحله پلاستیک نیز می‌رسد. میلگردهای GFRP در مقایسه با میلگردهای فولادی سختی کمتری را از خود نشان می‌دهند. میلگردهای GFRP در مقایسه با میلگردهای فولادی جذب انرژی کمتری را از خود نشان می‌دهند (نهدی و همکاران، ۲۰۰۵).

هویه<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تحلیل المان محدود غیر خطی و مدل سازی یک اتصال تیر - ستون هیبریدی پیش ساخته تحت بارهای سیکلی پرداختند. در این تحقیق، به منظور بررسی پاسخ و پیش‌بینی رفتار اتصال تیر به ستون هیبریدی پیش ساخته تحت بارهای سیکلی یک مدل دقیق سه بعدی المان محدود غیر خطی، توسعه داده شده است که در آزمایشگاه موسسه ملی استانداردها و تکنولوژی مورد آزمون قرار گرفت. مفصل پیش ساخته با استفاده از المان‌های صلب سه بعدی مدلسازی شده‌اند و المان‌های تماسی هم سطح (رویه به رویه) بین وجه‌های تیر و ستون، گروت‌ریزی گردید. این مدل، اثر پیش کشش را در لایه پس کشیده و رفتار غیر خطی مواد و مصالح بتنی در نظر می‌گیرد. پاسخ مدل با نتایج تست تجربی مقایسه شد و در تمامی مراحل بارگذاری همبستگی خوبی را نشان داد. گسیختگی میلگردهای فولادی نرم منجر به شکست اتصال گردید. به منظور پیش بینی این حالت، میدان‌های تنش و کرنش در میلگردهای فولادی نرم در رابط تیر به ستون، از مدل تحلیل شده استفاده شد. چنین میدان‌های تنش و کرنش، برای اندازه‌گیری تست تجربی سخت و مشکل هستند. علاوه بر این، مقدار نیروی گسترش یافته در تاندون فولادی پس کشیده (پس کشش) نیز کنترل و در نظر گرفته شد و مشاهده شد که در بازه بارگذاری به نقطه تسلیم نمی‌رسد. مدلسازی المان محدود موفقیت‌آمیز، ابزاری عملی و اقتصادی را برای بررسی رفتار چنین اتصالاتی ارائه خواهد کرد (هویه و همکاران، ۲۰۱۶).

یوان<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر استفاده از میلگردهای فولادی و FRP بصورت همزمان در مقاطع بتنی پرداختند. در این پژوهش در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک از بتن ECC استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای FRP به همراه میلگردهای فولادی نسبت به بتن مسلح معمولی تعداد ترک‌ها در بتن افزایش یابد اما عرض ترک‌ها بسیار کمتر می‌گردند.

<sup>4</sup> Nehdi

<sup>5</sup> Said

<sup>6</sup> Hawileh

<sup>7</sup> Yuan



استفاده از بتن ECC در ناحیه بحرانی ستون به همراه میلگرد FRP و فولادی سبب افزایش مقاومت نهایی و سختی بالاتر پس از تسلیم می گردد (یوان و همکاران، ۲۰۱۹)

در سال ۲۰۱۹ زی یانگ<sup>۸</sup> و همکاران به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با ورق‌های FRP پرداختند. در این پژوهش مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۵ نمونه با تعداد و جانمایی مختلف میلگردهای فولادی و FRP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مودهای شکست تیر، پس از تسلیم میلگردهای فولادی آغاز می‌شود میلگردهای BFRP پلاستیک شده تیر را محدود می‌کنند. سختی اولیه و سختی پس از تسلیم تیرهای بتنی نمونه با سه میلگرد فولادی و FRP به هم بسته شده حدود ۵۰ درصد تیرهای بتنی با دو میلگرد فولادی و بتنی به هم بسته شده می‌باشد. شکل پذیری در همه نمونه‌های مورد بررسی عددی بالاتر از ۶ را نشان داد (زی یانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

یاسر<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار خمشی اتصالات ستون خارجی بتن مسلح ترکیبی تحت بارهای استاتیک و چرخه‌ای پرداختند. این مطالعه یک بررسی تجربی از رفتار خمشی اتصالات خارجی تیر - ستون ساخته شده از بتن هیبریدی (بتن معمولی (NC) و بتن پودری واکنش پذیر (RPC) یا میلگرد ترکیبی (فولاد و الیاف کربن مسلح شده با پلیمر (CFRP)) به صورت داخلی یا خارجی با استفاده از روش نصب سطحی NSM ارائه داد. ۹ نمونه اتصال تیر - ستون بتن مسلح هیبریدی تحت اثر بارگذاری استاتیکی یا سیکلی مورد مطالعه قرار گرفته و در سه گروه مورد آزمایش قرار گرفتند (یاسر و همکاران، ۲۰۱۹).

حسن<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با استفاده از یک طرح ترکیبی با میلگردهای فولاد ضد زنگ و ورقه‌های CFRP پرداختند. در این مقاله یک روش مقاوم سازی جدید برای تیرهای RC خورده شده با استفاده از میله‌های فولاد ضد زنگ (SS) و ورقه‌های پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) که به صورت خارجی پیوند زده شده‌اند، پیشنهاد شده است نتایج تجربی نشان می‌دهند که تقویت فولاد کربنی (CS) می‌تواند با تقویت SS جایگزین شود تا هزینه‌های تعمیر آینده کاهش یابد زیرا تفاوت قابل توجهی در رفتار خمشی تیرهای تقویت شده با میلگردهای CS و SS وجود ندارد. اثربخشی طرح‌های پوشش ورقه CFRP بر عملکرد خمشی تیرهای RC - SS تقریباً مشابه تیرهای RC - CS است (حسن و همکاران، ۲۰۲۰).

السانادی<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی اتصالات بتنی پیش ساخته به همراه استفاده از ورق CFRP به منظور جلوگیری از فروریزش ناگهانی<sup>۱۲</sup> سازه انجام دادند. در مدل مورد بررسی، در محل اتصال تیر و ستون از ورق‌های CFRP استفاده نمودند [۷]. نتایج نشان داد استفاده از ورق‌های CFRP نمودارهای نیرو تغییرمکان را بسیار بهبود می‌بخشد. استفاده از ورق‌های CFRP باعث بالارفتن بار نهایی سازه قبل از فروریزش به میزان ۱۶/۹ برابر گردید. همچنین استفاده از ورق‌های CFRP در محل اتصالات پیش ساخته سبب می‌گردد شکل پذیری و جذب انرژی به ترتیب ۵۱ و ۵۳ درصد افزایش پیدا کند (السانادی و همکاران، ۲۰۲۰).

عرفه<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار ستون‌های مرکب فولادی / gftp تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی پرداختند. این مقاله میلگردهای پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه / فولاد (GFRP) را به عنوان تقویت اولیه ستون‌های بتن مسلح پیشنهاد کرده است. یک مدل المان محدود دو بعدی دقیق (FEM دو بعدی)، که غیر خطی بودن مواد و هندسی و رفتار اتصال میلگرد فولادی و شیشه‌ای FRP (GFRP) را در نظر می‌گیرد، ایجاد و در برابر نتایج تجربی موجود اعتبار سنجی شد. مدل ساخته شده، نتایج تجربی به دست آمده از حالت شکست و پاسخ تغییر شکل را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. سپس سیستم ترکیبی که

<sup>8</sup> Zeyang

<sup>9</sup> Yasser

<sup>10</sup> Hassan

<sup>11</sup> Elsanadedy

<sup>12</sup> Collapse

<sup>13</sup> Arafa

شامل ترکیب فولاد / GFRP است مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به طور کامل نشان داد که ستون‌های تقویت شده هیبریدی می‌توانند تحت جابجایی بزرگ با کمترین آسیب قرار گیرند (عرفه و همکاران، ۲۰۲۱)

در این مقاله از روش تحلیل عددی غیر خطی برای مدل سازی و تحلیل لرزه ای اتصالات هیبریدی خارجی هیبریدی بتن آرمه با ورق و آرماتورهای FRP استفاده گردید. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان چنین نتیجه گرفت که رفتار سیکلی اتصالات هیبریدی خارجی هیبریدی تیر به ستون بتن آرمه و یا در حالت کلی تر کلیه اجزاء یک قاب بتن آرمه اعم از تیر، ستون قبل و بعد از تقویت با ورق های FRP به روش عددی می‌توانند به راحتی در دسترس باشد. نزدیک بودن نتایج عددی در حالت های مختلف قبل و بعد از تقویت با FRP گویای این واقعیت است که مدل سازی عددی می‌تواند به عنوان یک ابزار عملی برای تحلیل و بررسی رفتار سیکلی اتصالات هیبریدی تیر به ستون بتن آرمه و تقویت شده با FRP بکار گرفته شود. بدین منظور پارامترهای مختلفی همچون منحنی تنش-کرنش بتن و فولاد و ورقه های FRP شرایط تکیه گاهی و بارگذاری، تعیین درست گام های بارگذاری و همچنین تشخیص صحیح المانهای مورد نیاز برای هر جزء اتصال بتن آرمه و مدل سازی صحیح آنها در روند حل و همگرا شدن دقیق بسیار مهم می‌باشند. به طوری که اگر مقادیر دقیقی برای موارد ذکر شده اتخاذ نگردد روند همگرایی به درستی انجام نگرفته و نتایج به دست آمده به دور از واقعیت می‌باشند.

در پژوهش حاضر، بر اساس نتایج به دست آمده از روش عددی تطابق خوبی در منحنی های آزمایشگاهی و عددی مشاهده میگردد. همانطور که می‌دانیم در منحنی های با مکانیزم شکست خمشی حلقه های هیستریزس باز تر بوده و در ناحیه ترک خوردگی فاقد نازک شدگی می‌باشد. بنابراین اتصالات هیبریدی با مقاومت و شکل پذیری خوب دارای حلقه های هیستریزس به صورت دوکی شکل می‌باشند.

در بررسی رفتار عددی اتصال تیر به ستون بتن نمونه تقویت شده همانطور که مشاهده شد، مکانیزم شکست خمشی می‌باشد. زیرا مفصل پلاستیک در ناحیه تیر اتصال اتفاق افتاده است. همچنین با بررسی مقادیر کرنش در آرماتور های طولی تیر اتصال اصلی می‌توان دریافت که حدکثر کرنش در بر ستون و در اتصال تقویت شده در قسمت میانی، در جایی که ورق های کامپوزیتی به اتمام رسیده اند رخ داده است.

ورقه های FRP باعث بهبود رفتار اتصالات هیبریدی می‌شوند. برای مثال در اتصال تقویت شده باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال و افزایش بار تسلیم آرماتور های طولی و در نهایت باعث انتقال مفصل پلاستیک از برستون به سمت تیر شده اند. بطوری که در نمونه تقویت شده با لایه الیاف ظرفیت بار نهایی حدود ۳۲/۳۳ درصد رشد را نسبت به نمونه ساده و بدون تقویت را نشان میدهند.

همچنین طی نتایج و مشاهدات به دست آمده مشخص گردید در نمونه های تقویت شده مقدار جذب انرژی نسبت به نمونه ساده بیشتر می‌باشد این اختلاف را می‌توان در اختلاف بار اولین تسلیم آرماتورهای طولی مشاهده کرد که طی آن اتصالات هیبریدی تقویت شده با لایه الیاف در سطح جان تیر و ستون دارای حداکثر جذب انرژی می‌باشند و بار تسلیم اولین آرماتور طولی در این نمونه نسبت به نمونه ساده رشد داشته است.

همچنین طی نتایج به دست آمده مشخص گردید که در نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه ساده بار نظیر اولین ترک خوردگی در اتصال و همچنین حداکثر جابجایی تحمل شده توسط اتصالات هیبریدی تقویت شده بطور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است.

یکی از مهمترین مقوله های مهم در طراحی ساختمانها که باید توجه خاصی به آن گردد محل تشکیل شدن مفاصل پلاستیک در هنگام رخ دادن زلزله های متوسط و شدید می‌باشد که در این تحقیق با توجه به نتایج به دست آمده از بخش صحت سنجی

موفق گردیدیم که محل مفصل پلاستیک را در هنگام بارگذاری سیکلی از هسته اتصال در داخل نمونه ساده به محل قطع شدن الیاف CFRP منتقل نماییم. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق و همچنین نتایج دیگر محققین برای انتقال مفصل پلاستیکی به داخل تیر از هسته اتصال به طولی برابر ارتفاع تیر از ورقه های FRP نیاز می باشد.

## منابع

- 1) Ali, A. Y., & Al-Rammahi, A. A. (2019). Flexural behavior of hybrid-reinforced concrete exterior beam-column joints under static and cyclic loads. *Fibers*, 7(10), 94.
- 2) Arafa, A., Shoeib, A. E., & Dandrawy, S. Y. (2021). BEHAVIOR OF HYBRID STEEL/GFRP REINFORCED COLUMNS UNDER LATERAL CYCLIC LOADING: A NUMERICAL STUDY. *Sohag Engineering Journal*, 1(1), 110-121.
- 3) Coburn, A., & Spence, R. (2002). *Earthquake protection*. John Wiley & Sons.
- 4) Elsanadedy, H. M., Al-Salloum, Y. A., Alrubaidi, M. A., Almusallam, T. H., Siddiqui, N. A., & Abbas, H. (2021). Upgrading of precast RC beam-column joints using innovative FRP/steel hybrid technique for progressive collapse prevention. *Construction and Building Materials*, 268, 121130.
- 5) Hasan, M. A., Akiyama, M., Kashiwagi, K., Kojima, K., & Peng, L. (2020). Flexural behaviour of reinforced concrete beams repaired using a hybrid scheme with stainless steel rebars and CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 265, 120296.
- 6) Hawileh, R. A., Rahman, A., & Tabatabai, H. J. A. M. M. (2010). Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-column connection subjected to cyclic loads. *Applied Mathematical Modelling*, 34(9), 2562-2583.
- 7) Nehdi, M., & Said, A. (2005). Performance of RC frames with hybrid reinforcement under reversed cyclic loading. *Materials and structures*, 38, 627-637.
- 8) Sun, Z. Y., Wu, G., Wu, Z. S., & Zhang, M. (2011). Seismic behavior of concrete columns reinforced by steel-FRP composite bars. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 696-706.
- 9) Sun, Z., Fu, L., Feng, D. C., Vatuloka, A. R., Wei, Y., & Wu, G. (2019). Experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with bundled hybrid steel/FRP bars. *Engineering Structures*, 197, 109443.
- 10) Yuan, F., & Chen, M. (2018). Numerical sensing of plastic hinge regions in concrete beams with hybrid (FRP and steel) bars. *Sensors*, 18(10), 3255.