



## مقاوم‌سازی اتصال تیر به ستون بتن‌آرمه در مقابل بارهای ارتعاشی با استفاده از FRP

مینا آجورلو<sup>۱</sup>، علیرضا بیتراف<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* کد پستی ۳۵۱۳۱۳۷۱۱۱ سمنان، a.bitaraf@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل	با توجه به تغییرات استانداردها و کدهای طراحی، بسیاری از سازه‌های ساخته شده در دهه‌های اخیر، الزامات کدهای جدید را ارضا نمی‌کنند. لذا به منظور حفظ عملکرد این سازه‌ها، نیاز به بهسازی آنها می‌باشد. یکی از مصالح مناسب برای مقاوم‌سازی و بهسازی ساختمان‌ها در برابر بارهای ارتعاشی نظیر زلزله، مصالح FRP می‌باشد. اما به دلیل هزینه بالای این مصالح و نیز مشکلات اجرایی در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، ارائه روش‌های کارآمد برای استفاده از این مصالح، از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل در مطالعه حاضر، به بررسی استفاده از نوارهای FRP برای مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون بتن‌آرمه پرداخته و تاثیر آن بر رفتار اتصال بررسی شده است. به این منظور تعداد ده مدل اتصال، معرفی و با نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی و آنالیز شده است. نتایج تحلیل نشان داد که استفاده از نوارهای افقی و مورب روی تیرها، مقاومت اتصال را تا ۳۷ درصد افزایش می‌دهد. تغییرشکل نهایی مدل نیز تا ۱۰۲ درصد افزایش می‌یابد. مطالعه حاضر نشان داد که استفاده از نوار FRP بجای دورپیچ کامل، تکنیک موثری برای بهسازی اتصالات بتن‌آرمه می‌باشد.
دریافت: ۵ مرداد ۱۳۹۹	
پذیرش: ۲۵ آبان ۱۳۹۹	
ارائه در سایت: ۲۵ آبان ۱۳۹۹	
<b>کلیدواژگان</b>	
FRP	
بار ارتعاشی	
مقاوم‌سازی	
اتصال تیر به ستون	
بتن‌آرمه	

### Strengthening of beam-column connection with FRP jacket and strips

Mina Ajorlou<sup>1</sup>, Alireza Bitaraf<sup>1\*</sup>

1- Seismic Geotechnical and High Performance Concrete Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\* P.O.B. 3513137111 Semnan, Iran, a.bitaraf@semnaniau.ac.ir

#### Article Information

Original Research Paper

Received 26 July 2020

Accepted 15 November 2020

Available Online 15  
November 2020

#### Keywords

Fiber-reinforced polymer (FRP)

Cyclic loads

Strengthening

RC Beam-column connection

#### ABSTRACT

Considering the changes in standards and design codes, many structures built in recent decades do not meet the requirements of the new codes. Therefore, in order to maintain the performance of these structures, it is necessary to retrofitting them. FRP materials are one of the suitable materials for strengthening structures against vibration loads such as earthquakes. However, due to the high cost of FRP and the difficulty of execution in the strengthening of existing structures, it is very important to provide new efficient methods for the use of these materials. For this reason, in the present study, the use of FRP strips for strengthening of beam to column joints was investigated and its effect on joint behavior was studied. For this purpose, ten models were introduced, modeled and analyzed with ABAQUS software. The results showed that the use of horizontal and diagonal strips on the beams increased the joint strength up to 37%. The final displacement of the beam also increased up to 102%. The present study showed that the use of FRP stripes is an effective technique for improving reinforced concrete joints.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mina Ajorlou, Alireza bitaraf, Strengthening of Beam-column connection with FRP jacket and strips, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol.11, No.3, pp. 44-55, 2020 (In Persian)

## ۱- مقدمه

در صورتی که در سازه‌ی ساخته شده بر مبنای آیین‌نامه‌های قدیمی، اتصالات در برابر بارهای ارتعاشی مثل بارهای لرزه‌ای مقاومت کافی نداشته باشند، اتصالات بتنی را می‌توان به روش‌های مرمت موضعی، ژاکت بتنی، ژاکت فولادی، استفاده از خاموت‌های خارجی جهت افزایش ظرفیت برشی و پوشش با ورقه‌های FRP<sup>۱</sup> بهسازی کرد.

استفاده از ورق FRP، امروزه به جهات مختلفی دارای مزیت‌هایی نسبت به روش‌های دیگر است. چرا که بر خلاف ژاکت بتن آرمه، استفاده از ورقه‌های FRP منجر به افزایش ابعاد اتصال نمی‌شود و نیاز به قالب‌بندی ندارد. همچنین این ورقه‌ها بر خلاف فولاد در برابر خوردگی و دمای محیط، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. با پوشش اتصالات با ورقه‌های FRP، می‌توان ظرفیت خمشی و برشی و همچنین شکل‌پذیری اتصالات را افزایش داد [۵].

تحقیقات زیادی در خصوص مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه با ورق‌های FRP انجام شده است. به عنوان مثال آزمایشات روی ستون‌های پل نشان داد که دورپیچ کردن ستون‌ها با لایه‌های FRP، شکل‌پذیری ستون را افزایش می‌دهد. همچنین از آنجایی که به دلیل کمبود خاموت عرضی و مهار ناکافی میلگردهای طولی در اتصالات تیر به ستون، بسیاری از پل‌ها تحت بارهای ارتعاشی، در اثر برش کششی مورب شکست می‌خورند، یک روش ساده و اجرایی برای تقویت اینگونه اتصالات چسباندن ورق‌ها یا نوارهای FRP به ناحیه اتصال می‌باشد [۶].

تحقیقات زیادی درباره بهسازی اتصالات بتن آرمه تحت بارهای ارتعاشی با ورق FRP انجام گرفته است. این تحقیقات نشان دهنده موثر بودن این روش در بهسازی اتصالات می‌باشد [۷-۱۲]. پروتا و همکاران در سال ۲۰۰۱ از ترکیب ورق‌های لایه‌ای FRP و میلگردهای FRP کاشته شده به روش NSM<sup>۲</sup> برای بهسازی اتصالات تیر به ستون استفاده کردند. ایشان از ورق‌های FRP برای محصور کردن ستون و بهسازی ظرفیت

اتصالات نقش مهمی در رفتار سازه‌ای قاب‌های خمشی ایفا می‌کنند. اما به دلیل ناکافی بودن تحقیقات پیشین و در نتیجه عدم توجه کافی به این موضوع در ویرایش‌های قبلی کدهای طراحی، همچنین اجرای نادرست آرماتوربندی در ناحیه اتصال، بدلیل سختی اجرا، بسیاری از سازه‌های قدیمی، در این ناحیه، دچار ضعف می‌باشند و قادر به تحمل بارهای ارتعاشی مثل بار زلزله نمی‌باشد [۱]. دلایل ایجاد آسیب در بسیاری از سازه‌های بتن آرمه در زلزله‌های اخیر، ضعف در طراحی یا عدم اجرای صحیح اتصالات می‌باشد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که در اغلب زلزله‌های شدید، مفصل پلاستیک در تیر و نزدیک ستون تشکیل می‌شود که باعث گسترش ترک خوردگی در تیر می‌شود. افزایش خرابی تیر در نزدیکی ستون، باعث بیشتر شدن شکست میلگردها به داخل اتصال و کاهش طول مهاری در میلگرد تحت بار ارتعاشی به علت لغزش میلگردهای افقی در اتصال می‌گردد [۲]. این مساله لزوم مقاوم‌سازی اتصالات در سازه‌های موجود را یادآوری می‌کند. ناحیه بحرانی تیرها در اتصالات بتن آرمه در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک، رخ می‌دهد. حداکثر فاصله مفصل پلاستیک از محل اتصال بین ۰.۵ تا ۱.۵ برابر ارتفاع مقطع در بر ستون است. به همین دلیل در مقاوم‌سازی سازه‌های ضعیف، این ناحیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بطور کلی، خرابی‌های مشاهده شده در اتصالات سازه‌های بتن آرمه، تحت بارهای ارتعاشی را می‌توان بصورت ذیل دسته‌بندی کرد: گسیختگی برشی اتصال که ناشی از عدم وجود میلگرد عرضی کافی در تیر یا ستون است [۳]، کماتش میلگرد طولی ستون در اثر ناکافی بودن میلگردهای عرضی در ناحیه اتصال [۳، ۴]، کماتش میلگردهای طولی تیر در اثر ناکافی بودن خاموت در تیرها [۳، ۴]، وجود درز سرد در محل اتصال [۴]، برون‌محوری اتصال تیر به ستون که منجر به پیچش در محل اتصال می‌شود [۳، ۴] و کمبود میلگردهای مثبت و منفی در تیرها که باعث تخریب کامل اتصال می‌شود [۲].

<sup>1</sup> Fiber-reinforced Polymer

<sup>2</sup> Near surface mounted

اتصالات تیر به ستون بتن آرمه مقاوم سازی شده با ورق FRP، تحت بارگذاری لرزه‌ای پرداختند. مطالعه ایشان نشان داد که استفاده از ورق FRP باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب می‌شود [۱].

رافونزو و همکاران در همان سال، رفتار اتصالات تیر به ستون بتن آرمه تقویت شده با FRP را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و نشان دادند که استفاده از FRP در مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه، باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود [۱۹]. در مطالعه دیگری، علاء‌الدینی در سال ۲۰۱۵، تقویت اتصالات تیر به ستون بتن آرمه با نوارهای CFRP را با نرم افزار المان محدود LS-DYNA شبیه سازی کرد [۲۰].

استیلانیوس و همکاران در سال ۲۰۱۹، مقاوم سازی خمشی تیرهای کامپوزیتی را با استفاده از FRP بررسی کردند. ایشان با استفاده از مدل عددی و تحلیلی، رابطه ممان-انحنای تیرهای کامپوزیتی مقاوم سازی شده با FRP را بدست آوردند [۲۱]. عابد و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تحلیلی ستون‌های دایره‌ای و مربعی و تیرهای بتن آرمه مسلح شده با آرماتور FRP پرداختند. ایشان از الیاف شیشه، بازالت و کربن استفاده کردند. مطالعه ایشان نشان داد که با افزایش آرماتور طولی از جنس FRP در ستون‌ها، ظرفیت محوری افزایش می‌یابد [۲۲]. در همان سال تافسیر و همکاران به بررسی مقاوم سازی اتصال تیر به ستون، تحت بارهای افزایشی و ارتعاشی پرداختند. ایشان از الیاف کربن و شیشه استفاده کردند و نتیجه بررسی ایشان نشان داد که مقاوم سازی، باعث افزایش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود [۲۳].

با توجه به هزینه بالای مصالح FRP، استفاده از دورپیچ کامل تیر و ستون که در عموم پروژه‌های مقاوم سازی استفاده می‌شود، کاری پرهزینه و مشکل می‌باشد. به همین دلیل استفاده از نوارهای FRP، می‌تواند روش موثرتری باشد. چراکه هم باعث کاهش مصرف مصالح می‌شود و هم از نظر اجرا در ساختمان‌های موجود، سختی کمتری دارد. از آنجایی که

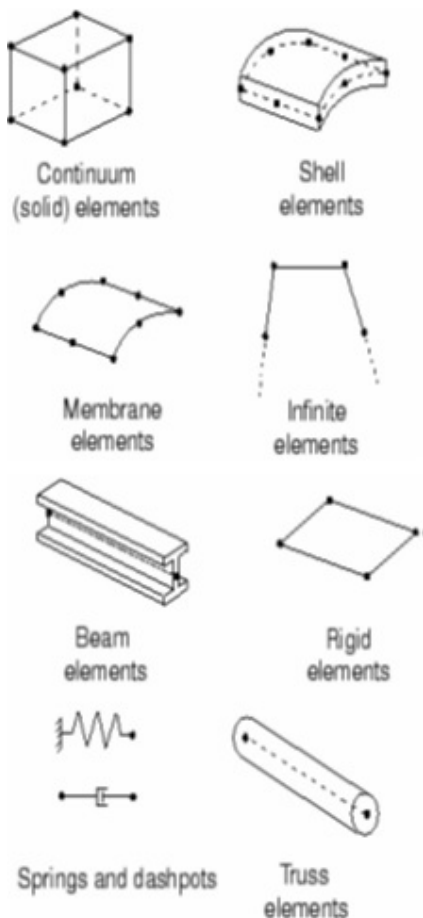
برشی اتصال استفاده کرده و میلگردهای NSM را در ستون‌ها به کار گرفتند تا ظرفیت انعطاف پذیری آن‌ها را افزایش دهند. مطالعه ایشان نشان داد که محصور شدن ستون‌ها با ورق FRP باعث بهبود عملکرد آرماتورهای NSM تحت بارهای ارتعاشی می‌شود [۱۳].

کارایانیس و همکاران در سال ۲۰۰۸، اتصالات تیر به ستون را با ترکیبی از تزریق رزین اپوکسی و ورق‌های CFRP تقویت کردند. ایشان با اعمال بارگذاری ارتعاشی به نمونه‌ها نشان دادند که تزریق رزین اپوکسی در محل ترک‌ها به همراه استفاده از ورق CFRP در محل اتصالات، روش مناسبی برای بهسازی و بالا بردن ظرفیت لرزه‌ای اتصالات در برابر خسارت‌های مشاهده شده در محل اتصال و بهبود ظرفیت باربری و شکل پذیری و جذب انرژی اتصال می‌شود [۱۴]. در همان سال، پانتدلیس و همکاران، اتصالات تیر به ستون بتن آرمه را با ورق کامپوزیت FRP بهسازی کردند. نتایج آزمایش ایشان نشان داد که ژاکت FRP نقش موثری برای بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون دارد [۱۵].

در تحقیق دیگری، شریستا و همکاران در سال ۲۰۰۹، به بررسی تقویت اتصالات تیر به ستون بتن آرمه با استفاده از نوارهای FRP پرداختند. بررسی ایشان نیز نشان داد که استفاده از نوارهای FRP باعث افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری قاب می‌باشد [۱۶]. ترانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، به بررسی افزایش ظرفیت برشی اتصالات تیر به ستون بتن آرمه با استفاده از ورق CFRP پرداختند. بررسی ایشان بر بار ثقلی متمرکز بود. مطالعه ایشان نشان داد که مقاوم سازی اتصال با ورق FRP باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود [۱۷].

راما کریشنا و همکاران در سال ۲۰۱۲، اتصالات تیر به ستون بتن آرمه را با ورق‌های FRP با دو نوع الیاف کربن و شیشه، بهسازی کردند. نتایج آزمایشات ایشان نشان داد که نمونه‌های بهسازی شده، ظرفیت باربری و شکل پذیری بیشتری نسبت به نمونه مرجع دارند [۱۸]. در مطالعه دیگری، ترن و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی افزایش ظرفیت برشی

می‌شود. در مرحله تحلیل، مدل مسئله، با استفاده از کدهای تحلیل‌گر تحلیل می‌شود و نتایج تحلیل، ذخیره می‌گردد. و سرانجام در مرحله پس‌پردازش نتایج تحلیل قابل مشاهده می‌باشد [۲۵].



شکل ۱ گروه المان‌های تحلیل تنش در نرم‌افزار آباکوس [۲۴]

### ۳- صحت‌سنجی و آنالیز حساسیت

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی، پیش از مدل‌سازی نمونه‌های مورد بررسی، یک نمونه آزمایشگاهی، مدل‌سازی شده و پاسخ مدل با پاسخ آزمایشگاهی مقایسه شد. نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی برای صحت‌سنجی، نمونه آزمایشگاهی یک اتصال کناری در قاب خمشی بتن‌آرمه است که توسط شرستا و همکاران در سال ۲۰۰۹ آزمایش شد [۱۶].

مشخصات هندسی و نحوه آرماتورگذاری و نیز نحوه مقاوم‌سازی نمونه در مدل صحت‌سنجی با تسمه FRP مطابق شکل ۲ می‌باشد.

تحقیقات صورت گرفته در مورد استفاده از نوار، تنها در اتصالات گوشه، که تیر فقط از یک سمت اتصال گسترش یافته، انجام شده است. مطالعه حاضر، بر بررسی این روش در اتصالات میانی که تیر در هر دو سمت اتصال گسترش یافته است، متمرکز است. لذا با معرفی چهار نوع روش مقاوم‌سازی، مجموعاً ده اتصال تیر به ستون بتن‌آرمه با نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل و تاثیر مقاوم‌سازی بر رفتار اتصال بررسی شد.

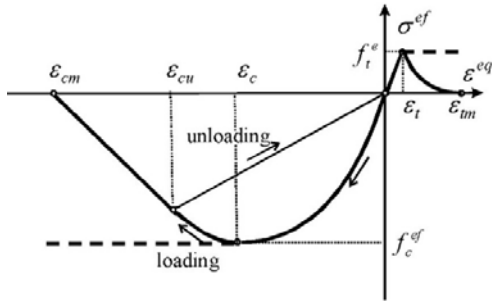
### ۲- معرفی نرم‌افزار آباکوس

آباکوس یک نرم‌افزار قدرتمند برای مدل‌سازی و تحلیل بر اساس روش اجزای محدود است که توانایی تحلیل مسائل مختلف مهندسی را دارد. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی و حل مسائل در حوزه‌های انتقال حرارت، اکوستیک، مکانیک خاک و مکانیک جامدات می‌باشد. در حوزه مکانیک جامدات این نرم‌افزار با مجموعه متنوعی از المان‌های مختلف، سازه‌ها با هندسه‌های گوناگون را مدل می‌کند. در نرم‌افزار آباکوس، مواد مهندسی متنوعی معرفی شده که در مدل‌سازی مواد با خواص و رفتارهای گوناگون نظیر فلزات، مواد پلیمری، مواد کامپوزیتی، بتن و همچنین خاک و سنگ، توانایی زیادی دارد. مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نسبتاً ساده است و می‌توان مسائل پیچیده را با کمک آن به راحتی مدل‌سازی نمود. در تحلیل‌های خطی، نرم‌افزار قادر به تعیین میزان رشد بار و همگرایی است. و طی فرایند تحلیل، مقادیر آنها را برای رسیدن به پاسخ پایانی تعدیل می‌نماید. بنابراین معمولاً، کاربر نیاز به تعیین پارامترهای کنترل حل عددی ندارد [۲۴]. در نرم‌افزار آباکوس، انواع گوناگونی از المان‌ها وجود دارد. در شکل ۱ انواع گروه‌های المان‌های مورد استفاده در مسائل تحلیل تنش مشاهده می‌شود.

نحوه فرمول‌بندی یک المان در آباکوس، به تئوری ریاضی تعیین رفتار آن وابسته است. در المان‌های تنش-کرنش از فرمول‌بندی لاگرانژی یا جرم کنترل استفاده می‌شود. در این فرمول‌بندی، ماده داخل المان تا انتهای تحلیل در داخل المان باقی می‌ماند و نمی‌تواند از مرز المان خارج شود [۲۵].

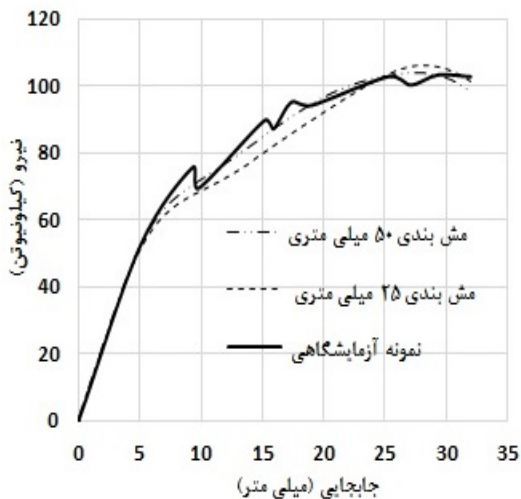
در نرم‌افزار آباکوس، فرایند تحلیل اجزای محدود شامل سه مرحله پیش‌پردازش، تحلیل مساله و پس‌پردازش می‌باشد. در مرحله پیش‌پردازش، مدل هندسی ساخته شده و ماده مورد نظر، معرفی و به قطعات تخصیص داده می‌شود. قطعات به هم مونتاژ شده و وضعیت فیزیک تماس نیز تعریف می‌شود. شرایط مرزی، شرایط اولیه، بارگذاری و نحوه مش‌بندی در همین مرحله تعریف

در مدل سازی نمونه صحت سنجی، ضریب پواسون بتن برابر با 0.15 و مدول الاستیسیته آن 24.178 GPa در نظر گرفته شد. مدل تنش-کرنش بتن مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد. رفتار غیرخطی بتن با مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن مدل سازی شد. این مدل، توانایی مدل سازی رفتار چرخه ای بتن را به خوبی دارا می باشد.



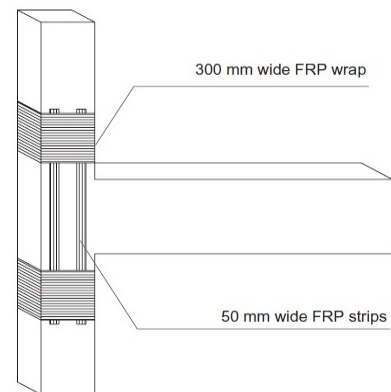
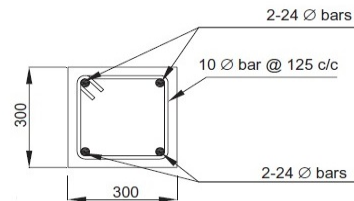
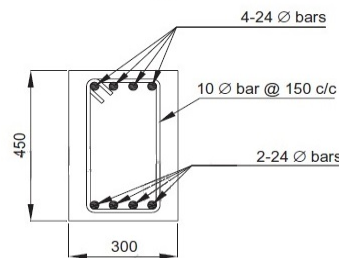
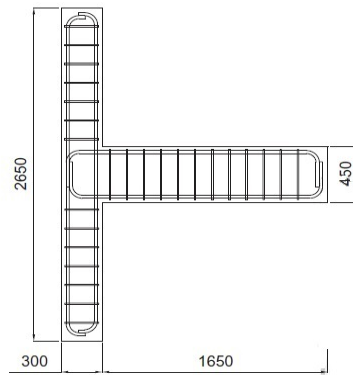
شکل ۳ منحنی تنش کرنش بتن [۲۶]

به منظور تعیین ابعاد بهینه مش‌ها در مدل سازی، یک آنالیز حساسیت روی مدل صحت سنجی انجام شد. در یک حالت، ابعاد مش در ناحیه مقاوم شده، 0.025 متر و در خارج از آن با ابعاد 0.05 متر و در حالت دوم، کل نمونه با ابعاد 0.05 متر مش بندی شد. همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می شود، مش بندی در حالت دوم انطباق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی دارد و با توجه به اینکه در این حالت حجم آنالیز و مدت زمان تحلیل، نیز کمتر می باشد، از حالت مش بندی دوم برای مدل سازی نمونه‌ها استفاده شد.



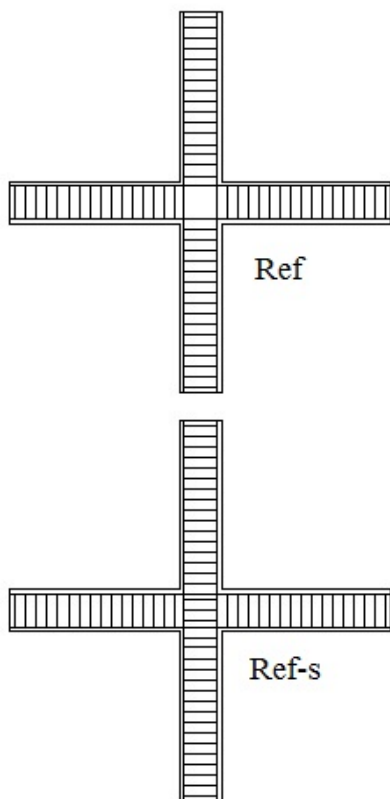
شکل ۴ منحنی بار-جابجایی نمونه صحت سنجی

بار نهایی در مدل کامپیوتری برابر با 98.518 kN بدست آمد. با توجه به اینکه در بررسی آزمایشگاهی شریستا [۱۶]، این

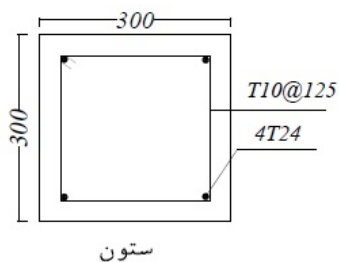


شکل ۲ نمونه آزمایشگاهی مدل صحت سنجی [۱۶]

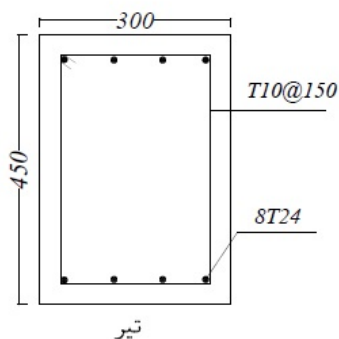
همانگونه که در شکل ۲ ملاحظه می شود، ایشان ناحیه اتصال را با نوارهای قائم، مقاوم سازی کردند. در نمونه آزمایشگاهی ایشان، تسمه‌ها با دورپیچ FRP مهار شدند. مقاومت ۲۸ روزه بتن مصرفی در بررسی ایشان، 25.4 MPa و تنش تسلیم آرماتورهای طولی و خاموت‌ها به ترتیب 532 MPa و 332 MPa می باشد. ورق FRP مورد استفاده از جنس کربن و مدول الاستیسیته آن 243 GPa می باشد. در بررسی ایشان، بارگذاری به روش بارافزون انجام شد.



شکل ۵ نمای جانبی مدل‌های مرجع و نحوه خاموت‌گذاری آنها



ستون



تیر

شکل ۶ مقطع عرضی تیر و ستون در مدل‌های مرجع

همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، تفاوت دو مدل در وجود یا عدم وجود خاموت ستون در ناحیه چشمه اتصال است.

مقدار برابر با 102.734 kN بدست آمد، بنابراین بار نهایی در مدل کامپیوتری، از دقت ۹۶ درصد برخوردار است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، خطای مدل‌سازی با مش‌بندی حالت دوم، در حدود ۵ درصد است، که رضایت‌بخش تلقی می‌شود. بنابراین، مدل‌سازی از اعتبار لازم برخوردار است.

#### ۴- معرفی مدل‌ها

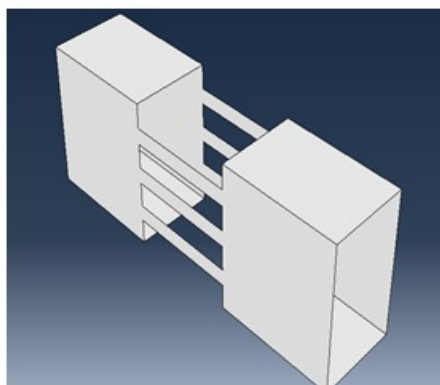
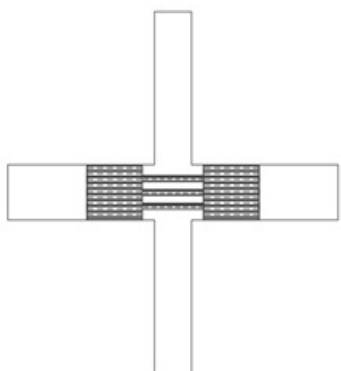
به منظور بررسی تاثیر نحوه مقاوم‌سازی بر رفتار اتصال تیر به ستون بتن‌آرمه، مجموعاً ده نمونه، مدل‌سازی و آنالیز شدند. دو مدل به عنوان مرجع، بدون مقاوم‌سازی آنالیز شدند. در یک نمونه در ناحیه چشمه اتصال خاموت‌گذاری انجام نشد و در مدل دوم در این ناحیه، خاموت‌گذاری انجام شد. علت تعریف دو مدل مرجع، اهمیت وجود خاموت در چشمه اتصال و تاثیر آن بر رفتار اتصال می‌باشد. در حالی که در عمل، به دلیل سختی اجرا در بسیاری از سازه‌های موجود، از اجرای آن صرف نظر شده است. در ادامه هر یک از مدل‌های مرجع، به چهار روش مقاوم‌سازی شدند. در حالت اول، کل ناحیه مفصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها با ورق FRP دورپیچ شدند (روش متداول در مقاوم‌سازی اتصالات). در حالت دوم، با استفاده از سه نوار افقی FRP در هر طرف تیرها مقاوم‌سازی انجام شد. در گروه سوم، از سه نوار قائم در هر طرف ستون استفاده شد و در حالت چهارم، از دو نوار قطری در هر سمت تیر استفاده شد. در مقاصد عملی، به منظور عبور نوارهای گروه دو تا چهار، بایستی تیر عمود بر صفحه اتصال، سوراخ شده و نوارها از آن عبور داده شوند. سپس سوراخ با گروت پر شود. مشروح مدل‌ها مطابق جدول ۱ است. مشخصات مدل‌های مرجع در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات مدل‌های مورد بررسی

گروه	نام مدل	شرح مدل
مرجع	Ref	مدل مرجع، بدون خاموت در چشمه اتصال
	Ref-s	مدل مرجع، با خاموت در چشمه اتصال
تیپ یک	T1	مقاوم‌سازی مدل Ref با دورپیچ کامل
	T1-s	مقاوم‌سازی مدل Ref-s با دورپیچ کامل
تیپ دو	T2	مقاوم‌سازی مدل Ref با نوارهای افقی
	T2-s	مقاوم‌سازی مدل Ref-s با نوارهای افقی
تیپ سه	T3	مقاوم‌سازی مدل Ref با نوارهای قائم
	T3-s	مقاوم‌سازی مدل Ref-s با نوارهای قائم
تیپ چهار	T4	مقاوم‌سازی مدل Ref با نوارهای قطری
	T4-s	مقاوم‌سازی مدل Ref-s با نوارهای قطری



انتهای تسمه‌ها، مشابه مدل‌های تیپ دو، دورپیچ شده است (شکل ۹).



شکل ۸ نحوه مقاوم‌سازی در مدل‌های تیپ دو

در مدل‌های مقاوم‌سازی شده تیپ چهار، از دو نوار به صورت قطری در هر طرف تیرها، استفاده شده است. در این نمونه‌ها نیز طول ناحیه مقاوم شده برابر با  $1.5d$  است که  $d$  ارتفاع تیر است (شکل ۱۰).

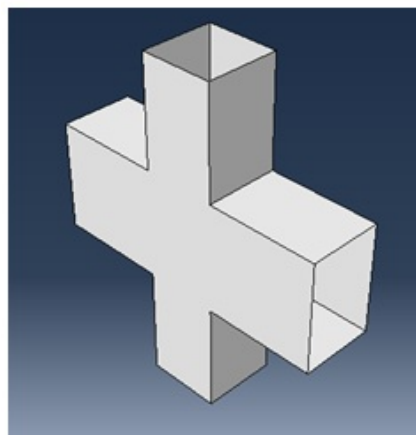
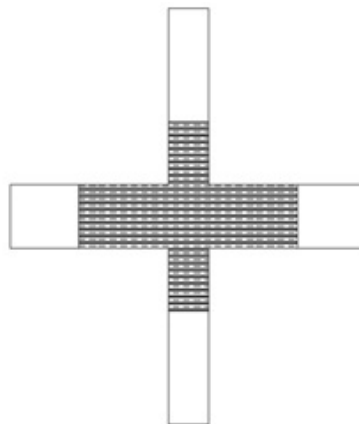
#### ۵- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی، مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. در مدل‌سازی نصف ارتفاع ستون‌ها و نصف طول تیرها مدل‌سازی شده است و بار به صورت رفت و برگشتی به انتهای تیر وارد شده است.

#### ۶- نتایج تحلیل نمونه‌ها

منحنی بار-جابجایی نمونه‌های مرجع در شکل ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که در این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود، پس از طی چند سیکل، بار پیک به تدریج کاهش می‌یابد.

در مدل‌های مقاوم‌سازی شده تیپ یک، از پوشش FRP به صورت دورپیچ هم در تیر و هم در ستون، استفاده شده است. در این روش، مقطع تیر و ستون با کمک نوار FRP محصور می‌شود. نحوه مقاوم‌سازی نمونه‌های تیپ یک، در شکل ۷ نشان داده شده است.

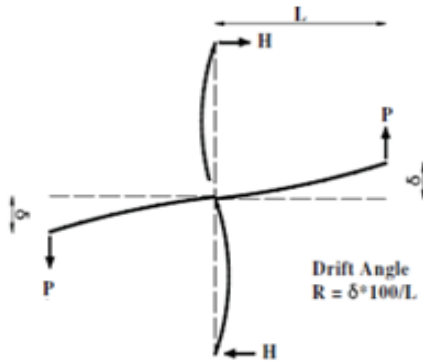


شکل ۷ نحوه مقاوم‌سازی در مدل‌های تیپ یک

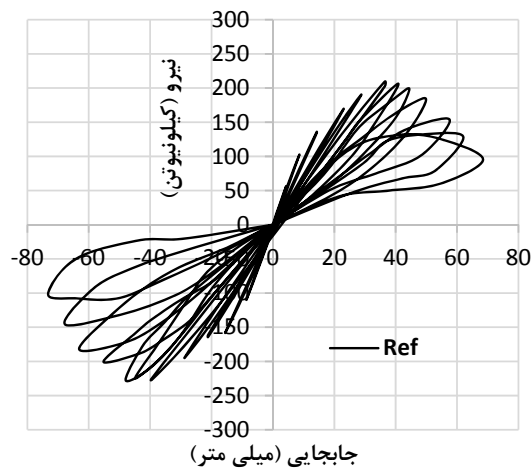
در این مدل‌ها، طول ناحیه تقویت شده در تیر و ستون برابر با  $1.5d$  است که  $d$  ارتفاع مقطع تیر یا ستون است. در مدل‌های مقاوم‌سازی شده تیپ دو از سه نوار افقی در هر یک از وجوه تیر استفاده شده است. طول ناحیه تقویت شده در هر سمت چشمه اتصال، برابر با  $1.5d$  است. به منظور جلوگیری از جداشدگی<sup>۱</sup> تسمه‌ها، انتهای تسمه‌ها با نوار FRP دورپیچ شده است (شکل ۸).

در مدل‌های مقاوم‌سازی شده تیپ سه، از سه نوار قائم در هر طرف ستون استفاده شده است. طول ناحیه مقاوم‌سازی شده در هر سمت چشمه اتصال  $1.5d$  است که  $d$  ارتفاع ستون است.

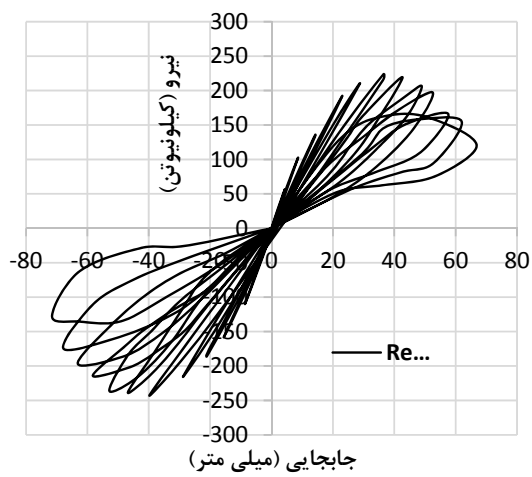
<sup>۱</sup> Debonding



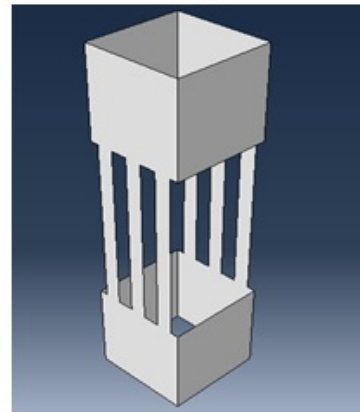
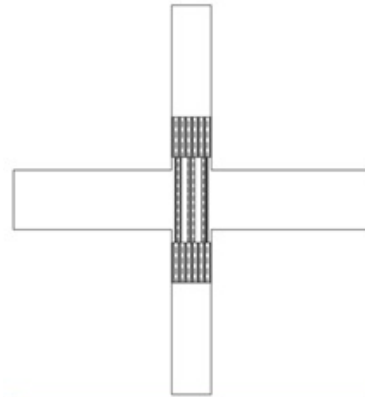
شکل ۱۱ شرایط مرزی و نحوه بارگذاری



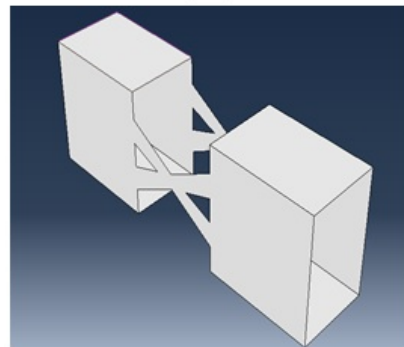
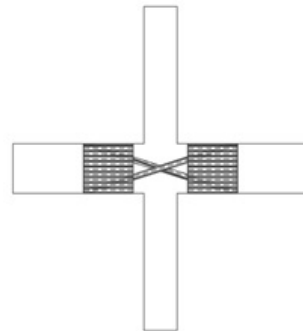
شکل ۱۲ منحنی بار-جابجایی نمونه مرجع فاقد خاموت در چشمه اتصال (Ref)



شکل ۱۳ منحنی بار-جابجایی نمونه مرجع دارای خاموت در چشمه اتصال (Ref-s)



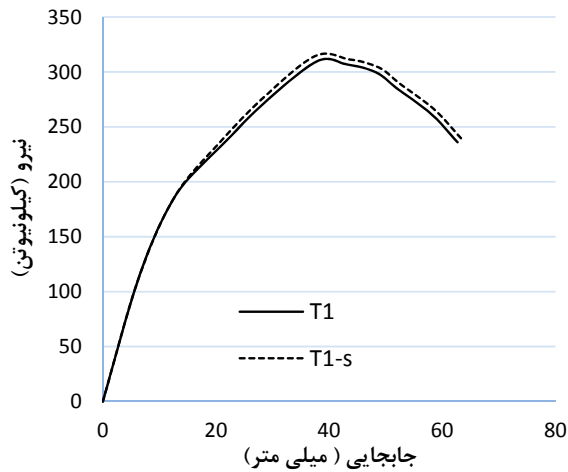
شکل ۹ نحوه مقاوم سازی در مدل های تیپ سه



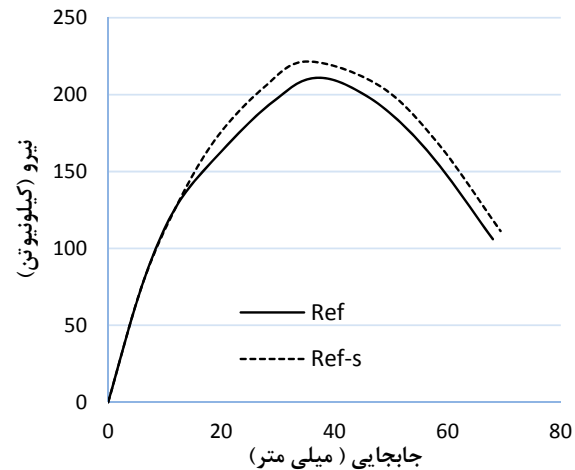
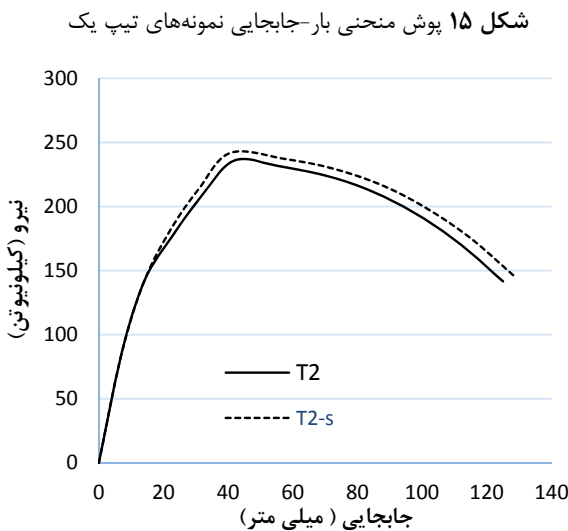
شکل ۱۰ نحوه مقاوم سازی در مدل های تیپ چهار



برای مقایسه آسان تر نتایج، پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های مرجع در شکل ۱۴ و پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود، ظرفیت نهایی نمونه مرجع بدون خاموت در چشمه اتصال (Ref) برابر با 211 kN و ظرفیت نهایی نمونه مرجع دارای خاموت در چشمه اتصال (Ref-s) برابر با 222 kN است. که نشان دهنده رشد ۵ درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. در صورتیکه نسبت بار پیک به جابجایی متناظر را به عنوان معیاری برای سختی در نظر بگیریم، سختی نمونه Ref برابر با 5.7 kN/mm و سختی نمونه Ref-s برابر با 6.3 kN/mm است که نشان دهنده رشد ۱۰ درصدی نمونه دارای خاموت است.



شکل ۱۵ پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های تیپ یک



شکل ۱۴ پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های مرجع

شکل ۱۶ پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های تیپ دو

مطابق شکل ۱۵، ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ یک فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب برابر با 310 kN و 314 kN است. که نشان دهنده رشد تنها یک درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 8.2 kN/mm و 8.3 kN/mm است که مجدداً نشان دهنده رشد تنها یک درصدی نمونه دارای خاموت است.

از سوی دیگر مطابق شکل ۱۶، ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ دو فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب برابر با 236 kN و 242 kN است. که نشان دهنده رشد سه درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 5.7 و 5.9 kN/mm است.

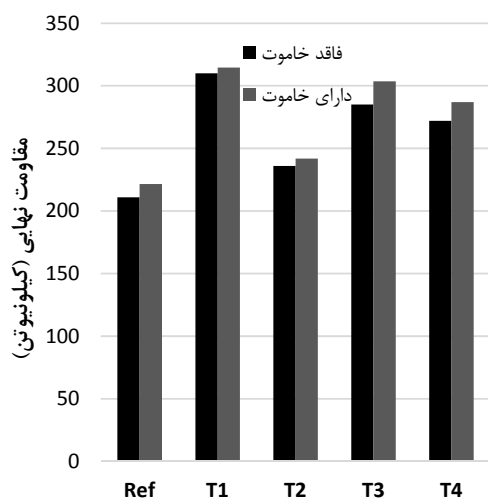
ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ سه فاقد خاموت و دارای خاموت مطابق شکل ۱۷، به ترتیب برابر با 285 kN و 304 kN است. که نشان دهنده رشد هفت درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 6.1 kN/mm و 7.0 kN/mm است که نشان دهنده رشد ۱۵ درصدی نمونه دارای خاموت است.

سرانجام مطابق شکل ۱۸، ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ چهار فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب برابر با 272 kN و 287 kN است. که نشان دهنده رشد شش درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 6.3 و 7.1 kN/mm است.

شکل ۱۵ مطابق شکل ۱۶، ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ یک فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب برابر با 310 kN و 314 kN است. که نشان دهنده رشد تنها یک درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 8.2 kN/mm و 8.3 kN/mm است که مجدداً نشان دهنده رشد تنها یک درصدی نمونه دارای خاموت است.

از سوی دیگر مطابق شکل ۱۶، ظرفیت نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی تیپ دو فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب برابر با 236 kN و 242 kN است. که نشان دهنده رشد سه درصدی مقاومت اتصال در اثر وجود خاموت در چشمه اتصال است. سختی نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با 5.7 و 5.9 kN/mm است.

به مصرف کمتر FRP و سادگی اجرا، به وضوح دارای مزیت بیشتری است. نمونه‌های تیپ چهار، نیز که در آنها از نوار قطری استفاده شده است، مقاومت بالایی از خود نشان دادند و در مقایسه با نمونه‌های مرجع نظیر، رشد ۲۹ درصدی نشان می‌دهند. نحوه اجرای نوارهای مقاوم‌سازی در این نمونه‌ها نیز با خاموت در چشمه اتصال شباهت دارد.



شکل ۱۹ مقاومت نهایی نمونه‌ها

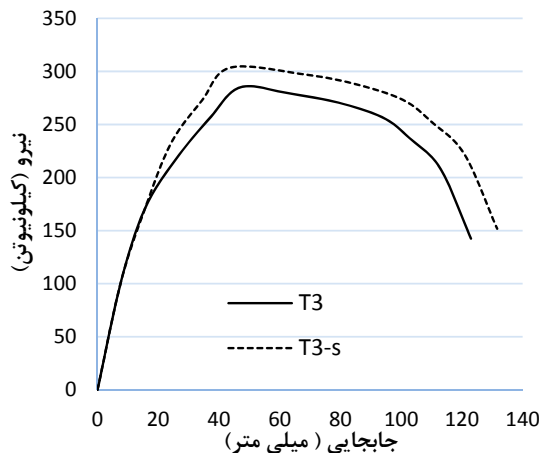
از سوی دیگر با بررسی سختی نمونه‌ها نیز ملاحظه می‌شود که سختی کلیه نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، از نمونه‌های مرجع بیشتر است. همانطور که انتظار می‌رفت، به دلیل دورپیچ کامل، نمونه‌های تیپ یک، بیشترین سختی را دارند، که در نمونه‌های فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب ۴۴ و ۳۲ درصد بیشتر از نمونه‌های مرجع است.

در بین سه نمونه دیگر، بیشترین سختی، مربوط به نمونه‌های تیپ چهار با نوارهای قطری است که در نمونه‌های فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب ۱۰ و ۱۳ درصد بیشتر از نمونه‌های مرجع است.

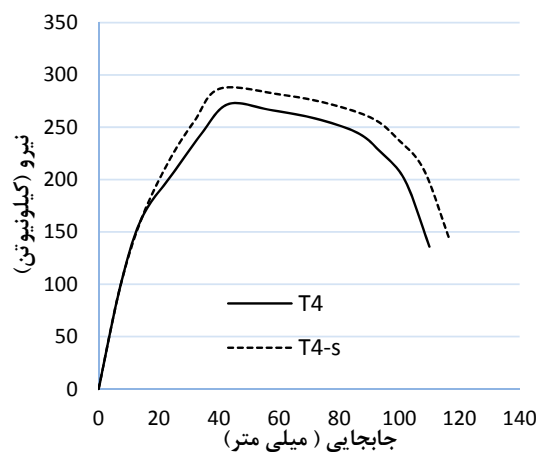
علاوه بر بار پیک و سختی، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های رفتاری سازه‌ها، تغییرشکل نهایی آنها است که نشان دهنده شکل‌پذیری سازه نیز می‌باشد. تغییرشکل نهایی، معمولاً به تغییرشکل متناظر با بار برابر با ۸۰ درصد بار نهایی در شاخه نزولی منحنی بار-جابجایی اطلاق می‌شود. در شکل ۲۰ تغییرشکل نهایی مدل‌ها مقایسه شده است.

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، علی‌رغم مقاومت و سختی زیاد، اما تغییرشکل نهایی نمونه‌های تیپ یک تفاوت

kN/mm است که نشان دهنده رشد ۱۳ درصدی نمونه دارای خاموت است.



شکل ۱۷ پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های تیپ سه



شکل ۱۸ پوش منحنی بار-جابجایی نمونه‌های تیپ چهار

## ۷- نتیجه‌گیری

در شکل ۱۹ بار پیک نمونه‌ها مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که بار پیک در کلیه نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، نسبت به نمونه‌های مرجع، افزایش یافته است. همانطور که انتظار می‌رفت، بیشترین افزایش مقاومت متعلق به نمونه‌های تیپ یک است که در آن از دورپیچ کامل FRP استفاده شده است و نسبت به نمونه‌های مرجع ۴۷ و ۴۱ درصد رشد نشان می‌دهند.

در بین سه گروه دیگر مقاوم‌سازی شده، بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه‌های تیپ سه است که در آنها از نوارهای افقی استفاده شده است. این نوارها از نظر رفتاری مشابهت زیادی با خاموت ستون دارند. رشد مقاومت این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مرجع، به ترتیب ۳۵ و ۳۷ درصد است. اگرچه مقاومت این گروه از نمونه‌ها، از گروه یک کمتر است، اما با توجه

- وجود خاموت در چشمه اتصال باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌شود. افزایش مقاومت در اثر اجرای خاموت در چشمه اتصال، در قاب بتن آرمه در حدود ۵ درصد و در قاب‌های مقاوم‌سازی شده، متناسب با تکنیک مقاوم‌سازی بین یک تا ۷ درصد رشد نشان می‌دهد.

- استفاده از دورپیچ FRP در چشمه اتصال، هم در تیرها و هم در ستون‌ها باعث افزایش قابل توجه مقاومت (تا ۴۷ درصد) می‌شود. اما به دلیل قیمت بالای FRP، روش مناسبی نیست.

- استفاده از نوارهای FRP در مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون بتن آرمه، تکنیکی موثر، کارآمد و کم هزینه است. استفاده از نوارهای افقی یا مورب، مقاومت را تا ۳۷ درصد افزایش می‌دهد.

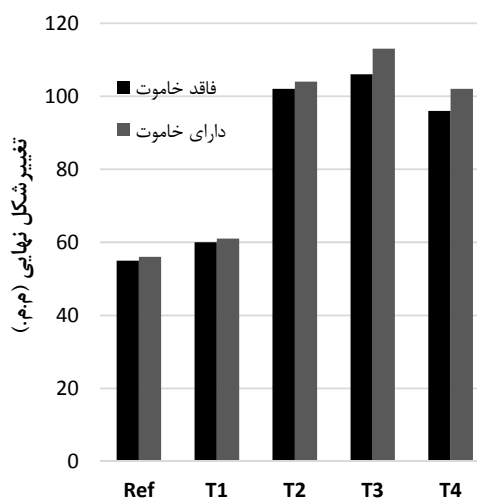
- در حالی که استفاده از دورپیچ کامل، تغییرشکل‌های نهایی را کاهش می‌دهد، اما استفاده از نوار افقی یا مورب روی تیرها، تغییرشکل‌های نهایی را تا ۱۰۲ درصد افزایش می‌دهد که این مساله مزیت مهمی نسبت به دورپیچ کامل است.

با توجه به مطالعه انجام شده، استفاده از نوارهای FRP به صورت افقی یا مورب، روی تیرها یا استفاده از نوارهای قائم روی ستون‌ها، هم باعث افزایش مقاومت و هم باعث افزایش شکل‌پذیری اتصال بتن آرمه می‌شود. تاثیر نوارهای افقی و مورب از نوار قائم بیشتر است. اما بسته به شرایط موجود و نحوه دسترسی به سازه، هر دو روش مقاوم‌سازی قابل استفاده است. استفاده از نوار بجای دورپیچ کامل، به جهت هزینه کمتر و اجرای آسان‌تر، نسبت به دورپیچ کامل دارای مزیت است.

## ۹- مراجع

- [1] Tran, M.T., The shear strength of as-built and fibre reinforced polymer-strengthened exterior reinforced concrete beam-column connections under seismic loading. 2014.
- [2] ACI 318-14-Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014. American Concrete Institute Farmington Hills, MI. p.
- [3] Council, B.S.S., NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA Publication 274). 1997, ATC-33 Project, Washington, DC.
- [4] راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی (نشریه شماره ۵۲۴)، سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۸۹.
- [5] راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP (نشریه ۳۴۵)، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۸۵.

چندانی با نمونه‌های مرجع ندارد. این پدیده مهم‌ترین ضعف در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه با FRP به روش‌های معمول است. در مقابل در نمونه‌های تیپ دو تا چهار تغییر شکل نهایی بسیار زیاد می‌باشد. تغییر شکل نهایی نمونه‌های تیپ سه در نمونه‌های فاقد خاموت و دارای خاموت به ترتیب ۹۳ و ۱۰۲ درصد بیشتر از نمونه‌های مرجع است.



شکل ۲۰ مقایسه تغییرشکل نهایی نمونه‌ها

از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که در کلیه گروه‌ها نمونه دارای خاموت در چشمه اتصال، مقاومت و سختی بیشتری نسبت به نمونه فاقد خاموت دارد. مقاومت نمونه مرجع دارای خاموت در چشمه اتصال ۵ درصد و سختی آن ۱۰ درصد بیشتر از نمونه بدون خاموت است. اما در نمونه‌های تیپ یک، اختلاف بین دو نمونه بسیار ناچیز است. چرا که با دورپیچ کردن کامل چشمه اتصال با FRP، عملاً تفاوتی بین وجود خاموت و فقدان آن وجود ندارد و یا به عبارتی، ضعف عدم وجود خاموت با دورپیچ بطور کامل جبران می‌شود.

در نمونه‌های تیپ سه و چهار که نوارهای FRP، نقش خاموت را ایفا می‌کنند، مقاومت در نمونه دارای خاموت، نسبت به نمونه فاقد آن به ترتیب ۷ و ۶ درصد و سختی به ترتیب ۱۵ و ۱۳ درصد افزایش یافته است.

## ۸- بحث

در این مقاله با مدل‌سازی تعداد ده نمونه اتصال تیر به ستون بتن آرمه با نرم‌افزار المان‌های محدود آباکوس، مقاوم‌سازی اتصالات بررسی شد و نتایج ذیل به دست آمد.

- [21] Stylianidis, P.M. and M.F. Petrou, Study of the flexural behaviour of FRP-strengthened steel-concrete composite beams. *Structures*, 2019. 22: p. 124-138.
- [22] Abed, F., C. Oucif, Y. Awera, H.H. Mhanna, and H. Alkhraisha, FE modeling of concrete beams and columns reinforced with FRP composites. *Defence Technology*, 2021. 17(1): p. 1-14.
- [23] Tafsirojjaman, T., S. Fawzia, D.P. Thambiratnam, and X.-L. Zhao, FRP strengthened SHS beam-column connection under monotonic and large-deformation cyclic loading. *Thin-Walled Structures*, 2021. 161: p. 107518.
- [24] شهبازی، ر.، یکرنگ‌نیا، ش.، راهنمای کاربردی آباکوس به همراه مسائل مهندسی عمران، سازه و ژئوتکنیک، تهران، انتشارات علم عمران، چاپ سوم، ۱۳۹۵.
- [۲۵] سروش نیا، س.، بهشتیان، ن.، کامل‌ترین مرجع کاربردی آباکوس (سطح مقدماتی)، تهران، انتشارات نگارنده دانش، چاپ ششم، ۱۳۹۵.
- [26] Chen, W.-F., *Plasticity in reinforced concrete*. J. Ross Publishing. 2007.
- [6] Hollaway, L.C. and J.-G. Teng, *Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites*. Elsevier. 2008.
- [7] Dong, Z., G. Wu, X.-L. Zhao, H. Zhu, and X. Shao, Behaviors of hybrid beams composed of seawater sea-sand concrete (SWSSC) and a prefabricated UHPC shell reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 2019. 213: p. 32-42.
- [8] Abdulrahman, B.Q. and O.Q. Aziz, Strengthening RC flat slab-column connections with FRP composites: A review and Comparative study. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2020.
- [9] Akhlaghi, A. and D. Mostofinejad, Experimental and analytical assessment of different anchorage systems used for CFRP flexurally retrofitted exterior RC beam-column connections. *Structures*, 2020. 28: p. 881-893.
- [10] Durgadevi, S., S. Karthikeyan, N. Lavanya, and C. Kavitha, A review on retrofitting of reinforced concrete elements using FRP. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [11] Elsanadedy, H.M., Y.A. Al-Salloum, M.A. Alrubaidi, T.H. Almusallam, N.A. Siddiqui, and H. Abbas, Upgrading of precast RC beam-column joints using innovative FRP/steel hybrid technique for progressive collapse prevention. *Construction and Building Materials*, 2021. 268: p. 121130.
- [12] Qin, W., X. Liu, Z. Xi, Z. Huang, A. Al-Mansour, and M. Fernand, Experimental research on the progressive collapse resistance of concrete beam-column sub-assemblages reinforced with steel-FRP composite bar. *Engineering Structures*, 2021. 233: p. 111776.
- [13] Prota, A., A. Nanni, G. Manfredi, and E. Cosenza. Selective upgrade of beam-column joints with composites. In *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong. 2001. Citeseer. p. 919-926.
- [14] Karayannis, C.G. and G.M. Sirkelis, Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008. 37(5): p. 769-790.
- [15] Pantelides, C.P., Y. Okahashi, and L. Reaveley, Seismic rehabilitation of reinforced concrete frame interior beam-column joints with FRP composites. *Journal of composites for construction*, 2008. 12(4): p. 435-445.
- [16] Shrestha, R., S.T. Smith, and B. Samali, Strengthening RC beam-column connections with FRP strips. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2009. 162(5): p. 323-334.
- [17] Le-Trung, K., K. Lee, J. Lee, D.H. Lee, and S. Woo, Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 2010. 41(1): p. 76-85.
- [18] Ramakrishna, R. and V. Ravindra, Experimental investigation on rehabilitation of reinforced cement concrete interior beam-column joints using CFRP and GFRP sheets. *International journal of engineering science and technology*, 2012. 4(3): p. 874-881.
- [19] Realfonzo, R., A. Napoli, and J.G.R. Pinilla, Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems. *Construction and Building Materials*, 2014. 54: p. 282-297.
- [20] علاء‌الدینی، ش.، کبیر، م.، حجابی، ه.، ارزیابی عملکرد قاب بتنی تقویت شده توسط پوشش‌های پلیمری FRP تحت بارهای سیکلی، مهندسی عمران مدرس، ۱۱۷-۱۲۷: (۳) ۱۴، ۲۰۱۵.