

Evaluation of the Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams Reinforced with FRP Bars Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

Arsalan Yousefipour

Ph.D. candidate of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Leila Hosseinzade

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Seyede Mahdieh Miralami*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Rahman Institute of Higher Education, Ramsar, Iran

Yousof Zandi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Miralami@Rahman.ac.ir

Keywords:

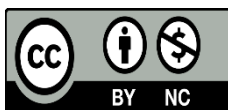
GGBFS,
GFRP bar,
Steel bar,
Bearing capacity,
Central displacement,
simulation.
Energy
dissipation
modes

Abstract

was studied. Compressive, and splitting tensile strengths were used to investigate the mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at 28 days of age. GGBFS was used in the form of weight percentages instead of cement (0, 30, 40, and 50%). The results of the experiments were used to simulate the properties of concrete materials in ABAQUS software. According to the results, the compressive and splitting tensile strengths of the specimen with 30% GGBFS were 10% and 5.02% higher than those of the control specimen. Then 12 concrete beams were simulated in ABAQUS software. The effect of bar type (steel and GFRP), the ratio of longitudinal reinforcement, and the mechanical properties of concrete with and without GGBFS were investigated. The results showed that increasing the ratio of GFRP longitudinal reinforcement in beams without GGBFS caused a significant increase in the load-bearing capacity up to 21.89% and a decrease in the central displacement of the beams up to 15.10%. Also, the use of steel bars with the same ratio of longitudinal reinforcement as GFRP bars achieved better results (an increase of 29.38% in bearing capacity and a decrease of 35.15% in the central displacement of the specimens). It should be noted that the values of the bearing capacity and central displacement of the simulated specimens were compared with the corresponding values in the relations provided in the ACI 440.1R-15 guide.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



ارزیابی رفتار تیرهای بتنی تسلیح شده با میلگردهای FRP حاوی سرباره کوره آهنگدازی

ارسلان یوسفی پور

دانشجوی دکتری عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

لیلا حسینزاده

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

سیده مهدیه میراعلمی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی رحمان رامسر، رامسر، ایران

یوسف زندی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*Miralami@Rahman.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۲ آبان ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳ تیر ۱۴۰۲

چکیده

در مقاله حاضر، رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی یا GFRP مطالعه شد. آزمایش‌های تعیین اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری و کششی در سن ۲۸ روز جهت دستیابی به مشخصات مکانیکی بتن با و بدون سرباره انجام شد. سرباره در قالب درصد‌های وزنی جایگزین سیمان (صفر، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده جهت تعیین شبیه‌سازی مشخصات بتن در نرم‌افزار ABAQUS به کار رفت. براساس نتایج آزمایش، افزودن ۳۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی اثر به‌سزایی در افزایش پارامترهای مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز داشت (افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری و ۵/۰۲ درصدی مقاومت کششی). یک نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP به منظور بررسی توانایی نرم‌افزار ABAQUS از میان پژوهش‌های پیشین شبیه‌سازی شد و انطباق قابل قبولی میان نتایج آزمایش و شبیه‌سازی از نظر ظرفیت باربری، تغییر مکان وسط دهانه و نحوه‌ی ایجاد و گسترش ترک‌ها حاصل شد. سپس تعداد ۱۲ تیر بتنی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شدند. اثر میلگرد فولادی یا GFRP، نسبت آرماتور طولی و خصوصیات مکانیکی بتن بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت آرماتور طولی GFRP در تیرهای فاقد سرباره موجب افزایش ظرفیت باربری تا ۲۱/۸۹ درصد و کاهش تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها تا ۱۵/۱۰ درصد می‌گردد. همچنین استفاده از میلگردهای فولادی با نسبت آرماتور طولی برابر با میلگرد GFRP نتایج بهتری را حاصل نمود (افزایش ۲۹/۳۸ درصدی ظرفیت باربری و کاهش ۳۵/۱۵ درصدی تغییر مکان وسط دهانه). مقادیر ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر متناظر آن براساس راهنمای ACI 440.1R-15 مقایسه شدند.

کلید واژگان: سرباره کوره آهنگدازی، میلگرد GFRP، میلگرد فولادی، ظرفیت باربری، تغییر مکان وسط دهانه، شبیه‌سازی.

۱- مقدمه

استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی^۱ در صنعت ساختمان به واسطه دهه هشتاد میلادی باز می‌گردد. مزایایی از جمله سبک بودن، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت کششی بالا، خاصیت غیرمغناطیسی و پایداری در برابر بارگذاری خستگی باعث شد تا این میلگردها جایگاه به‌خصوصی در تسلیح یا مقاوم‌سازی سازه‌ها داشته باشند. نکته‌ی قابل توجه در این میلگردها، رفتار خطی آن‌ها تا نقطه‌ی گسیختگی است. لذا تامین شکل‌پذیری کافی برای سازه‌های بتن مسلح حاوی میلگردهای مذکور از اهمیت خاصی برخوردار است [۳-۱]. لازم به ذکر است که ایجاد پیوستگی مناسب بین بتن و میلگردهای FRP مورد استفاده در سازه نیز از موارد مهمی است که در طراحی اعضای بتن مسلح باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. در کنار تمام مواردی که در زمینه‌ی مزایای میلگردهای FRP مطرح شد، خاصیت مقاومت در برابر خوردگی در ساخت اعضای سازه‌های بتن مسلح که در معرض رطوبت و شرایط محیطی نامناسب قرار می‌گیرند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در میان محصولات میلگردهای FRP (کربنی، شیشه‌ای، آرامید و بازالت)، میلگردهای پلیمری از جنس شیشه^۲ دارای کمترین ضریب ارتجاعی و مقاومت کششی بوده و از سوی دیگر از لحاظ اقتصادی ارزان‌تر از سایر محصولات میلگردهای FRP است. لذا می‌تواند گزینه‌ی مناسبی جهت تسلیح سازه‌ها باشد. البته مساله‌ی خیز و ترک‌خوردگی به عنوان پارامترهای مهم در بحث خدمت‌پذیری تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۸-۴].

سیمان به عنوان یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده بتن، عامل چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌باشد. تولید و مصرف این مصالح صنعتی در سطح جهان به سرعت رو به گسترش است. لازم به ذکر است که هزینه و انرژی فراوانی در فرآیند تولید این مصالح صرف می‌شود. نکته‌ی قابل توجه، تولید دی اکسید کربن (CO₂) و آلاینده‌های دیگری است که به واسطه‌ی تولید و مصرف سیمان در هوا انتشار می‌یابد. لذا استفاده از مصالح جایگزین سیمان که منجر به کاهش تولید آن شده و از طرفی خواص مکانیکی بتن را بهبود ببخشد، امری ضروری است. استفاده از پوزولان‌های طبیعی مانند تراس جاجرود، خاک سرخ لومار، پوسته‌ی بستان‌آباد، متاکاتولن و پوزولان‌های مصنوعی از جمله سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیس و خاکستر پوسته‌ی برنج به عنوان جایگزین سیمان، نه تنها مشکل آلودگی زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز می‌گردد [۹ و ۱۰]. لذا در پژوهش حاضر از سرباره کوره آهن‌گدازی^۳ از محصولات شرکت بنا بنیان زیست فناور همدان به عنوان پوزولان بهره‌جویی شد.

محتاج خراسانی و اصفهانی [۱۱] در پژوهشی آزمایشگاهی رفتار خمشی تعداد ۱۲ نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP را

بررسی کردند. نمونه‌های ساخته شده تحت بارگذاری از نوع خمش چهار نقطه با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی قرار گرفتند. پارامترهای مقاومت فشاری بتن و نوع و نسبت مسلح‌کننده‌ی خمشی GFRP در این پژوهش مطالعه شد. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش مقاومت فشاری بتن و تغییر در آرایش و نسبت آرماتورهای خمشی موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان وسط دهانه می‌گردد. محتاج خراسانی و همکاران [۱۲] در پژوهش دیگری تعداد ۲۰ نمونه تیر بتن مسلح با تکیه‌گاه‌های ساده را ساخته و تحت بارگذاری از نوع خمش چهار نقطه قرار دادند. از میلگردهای فولادی و GFRP در قالب مسلح‌کننده‌های خمشی بهره‌جویی شد. اثر پارامترهای نسبت آرماتورهای خمشی و فواصل خاموت‌گذاری نیز بررسی شدند. نتایج پژوهش نشان داد که تغییر در فواصل مسلح‌کننده‌های عرضی اثر آن‌چنانی بر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرها نخواهد داشت. هونگ و همکاران [۱۳] در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی تعداد ۶ نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی، میلگردهای CFRP و میلگردهای GFRP را تحت بارگذاری یکنواخت آزمایش کردند. نتایج پژوهش نشان داد که با توجه به ضریب ارتجاعی کمتر میلگردهای GFRP نسبت به میلگردهای فولادی، سختی خمشی پس از ترک خوردگی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی (در نمونه‌های ساخته شده با نسبت مسلح‌کننده یکسان) است. لازم به ذکر است که فاصله و نحوه‌ی توزیع ترک‌ها در تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP به ترتیب بسیار بیشتر و پراکنده‌تر از تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی می‌باشد. گرینیاک و همکاران [۱۴] نیز در قالب پژوهشی تعداد ۹ تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی و GFRP را ساخته و آزمایش کردند. تیرها در دو گروه دسته‌بندی شدند. در گروه اول تیرها با یک ردیف میلگرد فولادی یا GFRP مسلح شدند. تیرهای گروه دوم با سه ردیف میلگرد فولادی یا GFRP مسلح شدند. نتایج پژوهش نشان داد که در مرحله‌ی ترک‌خوردگی، تیرهای بتنی مسلح شده با سه ردیف میلگرد در ناحیه‌ی کششی، بیشینه عرض بازشدگی کمتر و فاصله‌ی ترک‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های گروه اول دارند. مصطفی و حسن [۱۵] در پژوهشی یک مدل اجزای محدود غیرخطی جهت شبیه‌سازی رفتار میلگردهای ترکیبی فولاد و FRP (CFRP و GFRP) ارائه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که جایگزین کردن میلگردهای فولادی با میلگردهای FRP (CFRP و GFRP) اثر بسزایی در بهبود شکل‌پذیری و شکست ترد تیرها دارد. کین و همکاران [۱۶] در قالب یک شبیه‌سازی به روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS [۱۷] اثر نسبت میلگردهای GFRP و فولادی در تیرهای بتن مسلح را بررسی کردند. این پژوهشگران دریافتند که برای افزایش ظرفیت باربری تیرهای بتن مسلح با نسبت آرماتور زیاد در ناحیه‌ی غیرخطی، مساحت میلگرد فولادی

³ Ground Granulated Blast Furnace Slag

¹ Fiber Reinforced Polymer bars (FRP)

² Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

کردند. این پژوهشگران از سرباره کوره آهنگدازی در قالب جایگزین بخشی از سیمان در بتن بهره‌جویی کردند. نتایج پژوهش نشان داد نمونه‌ی با ۵۰ درصد جایگزین سرباره همراه با ۱/۵ درصد الیاف فولادی و ۰/۴ درصد الیاف کربنی بیشترین مقادیر مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی و کمترین مقدار سایش و درصد جذب آب را داشته است [۲۱].

با توجه به مساله‌ی خوردگی میلگردهای فولادی، میلگردهای GFRP جایگزین مناسبی جهت تسلیح و تقویت سازه‌های بتنی می‌باشند. همچنین مساله‌ی خیز و ترک خوردگی تیرهای مسلح‌شده با میلگردهای GFRP با توجه به ضریب ارتجاعی پایین آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. پژوهش‌های انجام شده در خصوص کاربرد سرباره کوره آهنگدازی در تیرهای مسلح‌شده با میلگرد GFRP بسیار محدود است. لذا استفاده از میلگردهای GFRP در قالب آرماتورهای طولی و عرضی به عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی در کنار استفاده از سرباره کوره آهنگدازی به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند اثر بسزایی بر رفتار تیرهای بتن مسلح داشته باشد.

۲- جزئیات ساخت نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از سرباره کوره آهنگدازی به عنوان پوزولان در قالب درصد‌های وزنی جایگزین سیمان (صفر، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) استفاده شد. سرباره نیز از محصولات شرکت بنا بنیان زیست‌فناور همدان تهیه شده است. سیمان مصرفی نیز پرتلند نوع ۲ می‌باشد. جداول ۱ و ۲ به ترتیب خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان و سرباره را نشان می‌دهند. جدول ۳ نیز طرح اختلاط مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد. براساس جدول مذکور، تعداد ۴ طرح اختلاط در نظر گرفته شد. تعداد ۱۲ نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و تعداد ۱۲ نمونه‌ی مکعبی به بعد ۱۵۰ میلی‌متر جهت دستیابی به مشخصات مکانیکی بتن حاوی سرباره از جمله مقاومت فشاری و کششی ساخته شده و آزمایش شد. به‌منظور ساخت نمونه‌ها، ابتدا درشت‌دانه، ماسه، سیمان یا سرباره به مدت یک دقیقه به صورت خشک مخلوط شدند. سپس نیمی از آب به مصالح اضافه شد و مصالح به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. مقدار آب باقیمانده نیز با فوق روان‌کننده به ترکیب اضافه شده و مجدداً مصالح مخلوط شدند. نسبت آب به سیمان در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۴ بوده است. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و در شرایط مرطوب در دمای 23 ± 2 درجه تا زمان آزمایش نگهداری شدند. شکل ۱ نمایی از ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از نمونه‌های ساخته شده

به GFRP (A_s/A_f) باید در محدوده‌ی ۱ تا ۲/۵ باشد. همچنین دریافتند که طراحی تیرهای ترکیبی با نسبت آرماتور پایین را می‌توان به عنوان یک روش اقتصادی در نظر گرفت. النمر و همکاران [۱۸] در پژوهشی رفتار خمشی تعداد ۱۲ نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش اثر پارامترهای مشخصات سطح میلگردهای GFRP، مقاومت فشاری بتن و نسبت آرماتورهای طولی بررسی شدند. این پژوهشگران دریافتند که پاسخ نمونه‌های مسلح‌شده با میلگردهای GFRP از نظر مقدار تغییر شکل، نحوه‌ی ترک خوردگی و سختی پس از ترک خوردگی و حالت شکست تفاوت قابل‌توجهی با تیرهای مسلح‌شده با میلگردهای فولادی دارد به‌طوری‌که در ازای یک مقدار بار مشخص، بیشترین مقدار پارامترهای عرض ترک سطحی و تغییر شکل این تیرها در پاره‌ای از موارد از تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگرد فولادی بیشتر است. لازم به ذکر است که تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP ماسه‌پاشی شده در مقایسه با تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای GFRP ماریچ، تعداد ترک بیشتر و عرض ترک کمتری داشتند. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن و نسبت آرماتورهای طولی موجب کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP می‌گردد. سیجاوندی و همکاران [۱۹] در پژوهشی تعداد ۷ نمونه تیر بتنی را با ترکیب میلگردهای فولادی با مقاومت بالا و GFRP مسلح کردند. این پژوهشگران از دو نوع بتن معمولی و الیافی در ساخت تیرها بهره‌جویی کردند. نمونه‌ها به سه گروه تقسیم‌بندی شدند. گروه‌های اول و دوم، هر کدام شامل دو تیر با بتن معمولی و الیافی مسلح‌شده با میلگردهای GFRP یا میلگردهای فولادی مقاومت بالا بودند. گروه سوم نیز سه تیر بتن الیافی مسلح‌شده با ترکیب میلگردهای فولادی با مقاومت بالا و میلگردهای GFRP را شامل می‌شود. نتایج پژوهش نشان داد که بار ترک‌خوردگی، مقاومت، صلیبیت خمشی، شکل‌پذیری و جذب انرژی تیرهای بتن الیافی بطور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از تیرهای بتن معمولی می‌باشد. افزایش نسبت آرماتور طولی در تیرهای بتن الیافی با میلگردهای ترکیبی موجب افزایش ۳۷ تا ۸۸ درصدی شکل‌پذیری نسبت به تیرهای بتن الیافی با میلگردهای فولادی گردید. لازم به ذکر است که افزایش نسبت آرماتور در تیرهای بتن الیافی با میلگردهای ترکیبی نیز موجب افزایش ۵۱ تا ۱۷۴ درصدی جذب انرژی نسبت به تیرهای بتن الیافی مسلح شده با میلگردهای GFRP شد. کو و یو در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی به ساخت بتن با استفاده از سرباره کوره آهنگدازی با درصد‌های وزنی جایگزین سیمان ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پرداختند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب بر روی این نمونه‌ها انجام شد. براساس نتایج حاصل شده استفاده از ۵ درصد سرباره کوره آهنگدازی جایگزین سیمان موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت فشاری (تا ۳۵ مگاپاسکال) می‌گردد و بعد از عبور از این درصد، روند تغییرات پارامتر مذکور به‌صورت نزولی می‌باشد [۲۰]. میراعلمی و همکاران در قالب یک بررسی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی و کربنی را مطالعه

۳- نتایج آزمایش

جدول ۴ نتایج وزن مخصوص بتن سخت شده، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های با و بدون سرباره را نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده با نشانه‌های G_a نشان داده شدند. علامت a درصد وزنی سرباره جایگزین سیمان را بر حسب درصد (صفر، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) نشان می‌دهد. هر یک از مقادیر ارائه شده برای پارامترهای ارائه شده در جدول مذکور میانگین سه نمونه‌ی آزمایش شده را نشان می‌دهد. وزن مخصوص نمونه‌های بتنی در حالت سخت شده براساس استاندارد ASTM-C138 [۲۲] بدست آمد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از استاندارد BS EN 12390-3 [۲۳] و مقاومت کششی نمونه‌ها به روش غیرمستقیم با استفاده از آیین‌نامه‌ی ASTM C496 [۲۴] محاسبه شد. با توجه به جدول مذکور با افزایش درصد سرباره، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش یافته که با توجه به مقایسه‌ی وزن مخصوص سرباره (در این مطالعه ۲۸۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و سیمان (در این مطالعه ۳۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب) توجیه‌پذیر است. استفاده از ۳۰ درصد سرباره جایگزین سیمان اثر بسزایی در افزایش پارامترهای مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز (افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری و ۴/۳۲ درصدی مقاومت کششی) داشته است. همچنین با افزودن ۴۰ و ۵۰ درصدی سرباره جایگزین سیمان شاهد افزایش قابل توجه پارامترهای مقاومت فشاری و کششی خواهیم بود بطوریکه مقاومت فشاری نمونه‌های با ۴۰ درصد و ۵۰ درصد جایگزین سرباره به ترتیب افزایش ۲۲/۰۳ درصدی و ۲۲/۴۷ درصدی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد داشته است. لازم به ذکر است که مقاومت کششی نمونه‌های با ۴۰ درصد و ۵۰ درصد جایگزین سرباره نیز به ترتیب افزایش ۸/۶۳ درصدی و ۱۴/۹۵ درصدی نسبت به نمونه‌ی فاقد سرباره داشته است. شکل ۲ نیز مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری براساس آزمایش و آیین‌نامه‌ی ACI318-19 [۲۵] را نشان می‌دهد. براساس شکل مذکور انطباق قابل-قبولی میان نتایج آزمایش و استاندارد مذکور وجود دارد. به طوری که درصد اختلاف نتایج مقاومت کششی برای نمونه‌های G_0 ، G_{30} ، G_{40} و G_{50} به-ترتیب برابر با ۱۴/۹۲ درصد، ۱۳/۳۸ درصد، ۱۴/۶۸ درصد و ۸/۶۷ درصد می‌باشد.

۴- جزئیات شبیه‌سازی نمونه‌ها

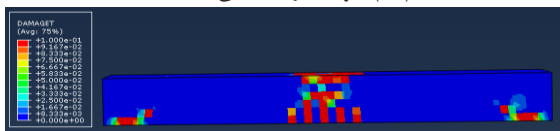
پژوهش حاضر به شبیه‌سازی تعداد ۱۲ نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی و GFRP با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۱۷] می‌پردازد. ابتدا جهت ارزیابی توانایی نرم‌افزار ABAQUS [۱۷] در شبیه‌سازی، یک نمونه تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP از پژوهش-های آزمایشگاهی پیشین [۱۲] انتخاب شد و در نرم‌افزار مذکور شبیه‌سازی شد. مطابق شکل ۵، تیر بتنی مورد نظر دارای مقطع مربعی شکل به بعد ۲۵۰ میلی‌متر و طول ۲۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در تیر مورد نظر از تعداد ۵ میلگرد طولی GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان آرماتور کششی و خاموت‌های فولادی به قطر ۸ میلی‌متر با فواصل ۷۰ میلی‌متر جهت تسلیح برشی بهره‌جویی شد. نمونه‌ی شبیه‌سازی شده تحت

بارگذاری از نوع خمش چهار نقطه و شرایط تکیه‌گاهی مفصلی مطابق نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت. شکل ۳ نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ی آزمایش شده [۱۲] و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ نیز مقایسه‌ی پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های آزمایش شده [۱۲] و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های مذکور انطباق قابل‌قبولی میان نتایج آزمایشگاهی [۱۲] و شبیه‌سازی وجود دارد. از نظر نحوه‌ی ایجاد و گسترش ترک‌ها در بتن، نمونه‌ی مدل‌سازی شده توانست به خوبی پاسخ نمونه‌ی آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کند به طوری که بار معادل اولین ترک در نمونه‌ی آزمایش شده ۱۵ کیلو نیوتن و در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده ۱۷ کیلو نیوتن بوده است که اختلاف ۱۳/۳۳ درصدی با یکدیگر دارند. لازم به ذکر است که ظرفیت باربری نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۳۳ کیلو نیوتن و ۱۳۵/۲۳ کیلو نیوتن می‌باشند (اختلاف ۱/۶۸ درصدی). همچنین تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۴۹/۶۱ میلی‌متر و ۴۷/۷۲ میلی‌متر می‌باشد (اختلاف ۳/۸۱ درصدی). جدول ۵ جزئیات تیرهای بتنی جهت شبیه‌سازی را از نظر تعداد و قطر آرماتورهای طولی و عرضی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ نیز ابعاد این تیرها و جزئیات آرماتوربندی آن را نشان می‌دهد. تیرهای شبیه‌سازی شده با مقطع مربعی به ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشند. جهت طراحی تیرها از آیین‌نامه‌ی ACI318-19 [۲۵] و راهنمای ACI440.1R-15 [۲۶] بهره‌جویی شد. براساس راهنمای ACI440.1R-15 [۲۶] اگر میلگردهای GFRP قبل از خرد شدن بتن گسیخته شوند، گسیختگی عضو بصورت ناگهانی بوده (حالت کنترل کشش) و نگرانی‌ها در خصوص تغییر شکل زیاد به دلیل رفتار خطی و ترد بودن مسلح‌کننده‌های GFRP قبل از گسیختگی وجود دارد و انتظار شکل‌پذیری آنچنانی از عضو خمشی نخواهیم داشت (در مقایسه با عضو مسلح‌شده با میلگردهای فولادی). از سوی دیگر حالت حدی کنترل فشار برای اعضای خمشی تسلیح‌شده با میلگرد GFRP قابل قبول است چرا که با خرد شدن بتن قبل از گسیختگی میلگردهای GFRP، عضو خمشی رفتار غیرخطی نشان می‌دهد. همچنین توصیه‌ی راهنمای ACI440.1R-15 [۲۶] در این خصوص این است که طراحی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP در خمش توسط حالت حدی کنترل فشار انجام شود. به عبارتی خردشدگی بتن قبل از گسیختگی میلگردهای GFRP اتفاق بیفتد. لازم به ذکر است که براساس راهنمای مذکور نسبت درصد میلگردهای GFRP به درصد تسلیح‌کننده متعادل (ρ_f/ρ_{fb}) در نمونه‌ها از ۱/۴ بیشتر در نظر گرفته شده است تا حالت حدی کنترل فشار حاکم باشد. اما برای تیرهای مسلح‌شده با میلگرد فولادی حالت کنترل کشش حاکم بوده و درصد فولاد مقطع با درصد فولادهای بیشینه و کمینه مقایسه شده است.

به همین منظور تعداد ۱۲ تیر بتن مسلح در قالب ۴ گروه دسته‌بندی شدند. گروه اول شامل سه تیر بتنی با میلگردهای طولی و عرضی فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد مسلح شدند. لازم به ذکر است

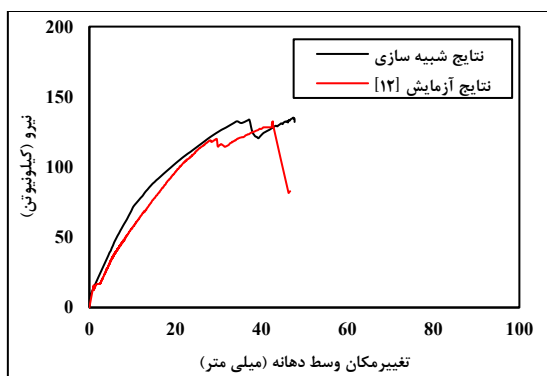


شکل ۱- الف) نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۲]



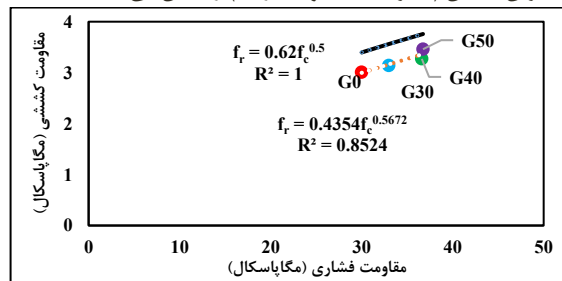
شکل ۱- ب) نمونه‌ی شبیه‌سازی شده

شکل ۳- نمایی از نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ها



شکل ۴- نمایی از پاسخ نمونه‌ی آزمایش شده و شبیه‌سازی شده

که بتن این تیرها فاقد سرباره می‌باشند. گروه دوم نیز سه تیر بتنی مسلح- شده با میلگردهای طولی و عرضی فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد با بتن حاوی ۳۰ درصد سرباره را شامل می‌شود. تیرهای بتنی گروه سوم نیز با میلگردهای طولی و عرضی فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد مسلح شدند و بتن آن‌ها حاوی ۴۰ درصد سرباره جایگزین سیمان می‌باشد. گروه چهارم نیز شامل سه تیر بتنی با ۵۰ درصد سرباره جایگزین سیمان با میلگردهای طولی و عرضی فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد مسلح شد. از نشانه‌ی RCB-aSTb-Gc یا RCB-aGFRPb-Gc جهت نمایش نمونه‌ها استفاده شد. نشانه‌ی a تعداد میلگردهای فولادی یا GFRP، نشانه‌ی b قطر میلگردهای فولادی (۱۴ میلی‌متر) یا GFRP (۱۴ و ۱۶ میلی‌متر) و نشانه‌ی c درصد وزنی سرباره جایگزین سیمان (صفر، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقایسه مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری براساس آزمایش

و استاندارد ACI 318-19 [۲۵]

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی سیمان و سرباره

مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)			زمان گیرش (دقیقه)		سطح مخصوص (سانتی متر مربع بر گرم)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی	اولیه			
۵۵	۴۱	۲۵	۲۱۰	۱۴۰	۳۹۱۶	۳/۱۴	سیمان
-	-	-	-	-	۳۰۵۰	۲/۸۹	سرباره

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان و سرباره

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	CaO	ترکیب شیمیایی (درصد)
۲۰/۲۸	۴/۷۶	۳/۸۶	۱/۸۹	۳/۲۲	۰/۷۵	۰/۳	۰/۰۲	۶۲/۲۸	سیمان
۳۵/۰۸	۱۳/۴۷	۰/۵۱	۰/۱	۱۰/۰	۰/۷۵	۰/۳	-	۳۸/۴۶	سرباره

جدول ۳- طرح اختلاط برای یک متر مکعب بتن (اعداد داخل جدول بر حسب کیلوگرم می‌باشد)

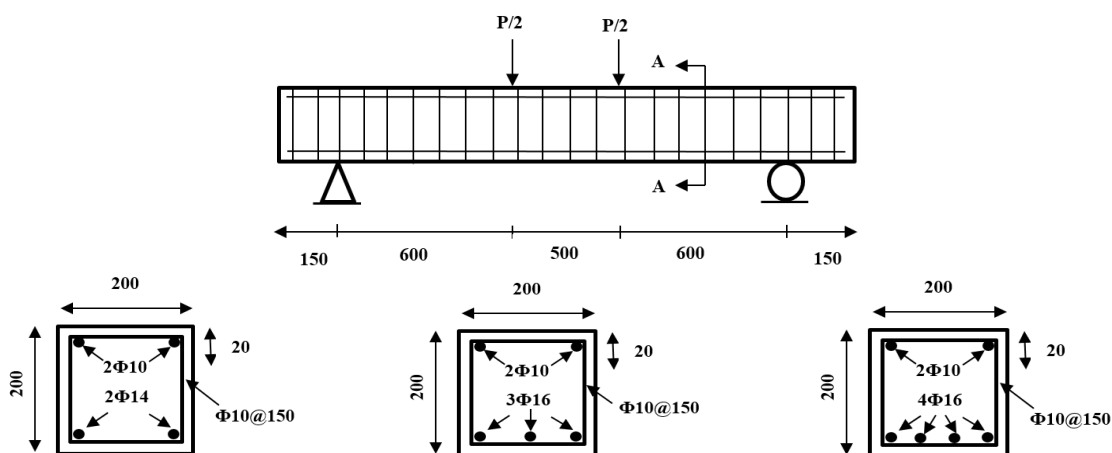
نشانه‌ی نمونه	شن	ماسه	سیمان	آب	فوق روان کننده	سرباره
G ₀	۱۱۰۴	۷۳۶	۴۰۰	۱۶۰	۲	۰
G ₃₀	۱۱۰۴	۷۳۶	۲۸۰	۱۶۰	۲	۱۲۰
G ₄₀	۱۱۰۴	۷۳۶	۲۴۰	۱۶۰	۲	۱۶۰
G ₅₀	۱۱۰۴	۷۳۶	۲۰۰	۱۶۰	۲	۲۰۰

جدول ۴- نتایج آزمایش

نشانه نمونه‌ها	وزن مخصوص بتن سخت شده (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
G ₀	۲۳۰۴	۳/۰۱	۳۰
G ₃₀	۲۳۰۰	۳/۱۴	۳۳
G ₄₀	۲۲۹۹	۳/۲۷	۳۶/۶۱
G ₅₀	۲۲۷۱	۳/۴۶	۳۶/۷۴

جدول ۵- جزئیات نمونه‌های تیر بتن مسلح

شماره گروه	گروه	نام نمونه	مشخصات میلگردهای کششی / مشخصات میلگردهای فشاری	مشخصات میلگردهای عرضی
۱	نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی یا GFRP	RCB-3GFRP16-G0	3Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-2GFRP14-G0	2Φ14-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-4ST16-G0	4Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
۲	نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد با بتن حاوی ۳۰ درصد سرباره	RCB-3GFRP16-G30	3Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-2GFRP14-G30	2Φ14-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-4ST16-G30	4Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
۳	نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد با بتن حاوی ۴۰ درصد سرباره	RCB-3GFRP16-G40	3Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-2GFRP14-G40	2Φ14-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-4ST16-G40	4Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
۴	نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی یا GFRP با دو نسبت آرماتور کم و زیاد با بتن حاوی ۵۰ درصد سرباره	RCB-3GFRP16-G50	3Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-2GFRP14-G50	2Φ14-2Φ10	Φ10@150 mm
		RCB-4ST16-G50	4Φ16-2Φ10	Φ10@150 mm



شکل ۵- نحوه‌ی اعمال بار، ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌های شبیه‌سازی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

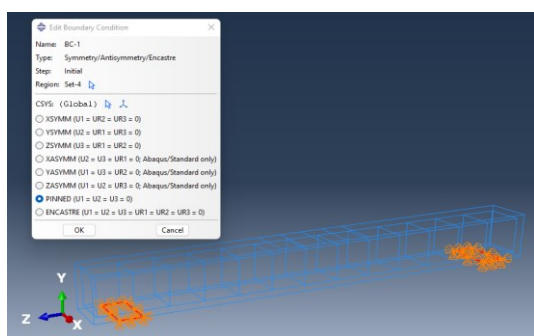
گسیختگی بصورت خطی و رفتار میلگردهای فولادی به صورت غیرخطی شبیه سازی شد. شکل ۶ جزئیات بارگذاری و اختصاص شرایط تکیه گاهی نمونه های تیر بتنی را نشان می دهد. جهت بارگذاری نمونه ها از دو نیروی وارد بر سطح مطابق شکل ۶ (الف) بهره جویی شد. مطابق شکل ۶ (ب) شرایط تکیه گاهی تیرهای شبیه سازی شده از نوع مفصلی در نظر گرفته شد. همچنین از قید اندرکنشی مدفون شده^۴ نیز جهت ایجاد پیوستگی میان میلگردهای GFRP و تیر بتنی بهره جویی گردید.

از المان های سه بعدی ۸ گره ای مکعبی با فرمول بندی کاهش یافته (C3D8R) جهت شبیه سازی هندسه ی تیر بتنی و از المان های خرپایی^۴ سه بعدی با دو درجه آزادی (T3D2) جهت شبیه سازی میلگردهای فولادی یا GFRP استفاده شد. جهت شبیه سازی ناحیه ی غیر خطی مصالح بتنی از تئوری Mander [۲۷] بهره جویی شد. همچنین از معیار بتن آسیب دیده ی خمیری^۵ جهت شبیه سازی رفتار ناحیه ی غیر خطی مصالح بتنی در نرم افزار ABAQUS [۱۷] بهره جویی شد.

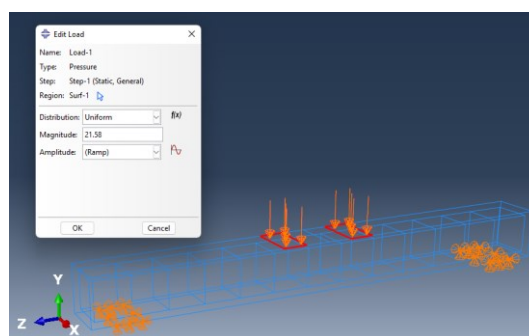
جدول ۶ مشخصات مصالح میلگردهای فولادی و GFRP مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می دهد. رفتار میلگردهای GFRP تا نقطه ی

جدول ۶- مشخصات میلگردهای فولادی و GFRP

نام میلگرد	قطر (میلی - متر)	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (درصد)	ضریب ارتجاعی (کیگاپاسکال)
Steel10	۱۰	۵۰۶	۷۷۲	-	-	۲۰۹
Steel16	۱۴	۵۵۷	۷۳۲	-	-	۲۱۰
GFRP 10	۱۰	-	-	۷۸۹	۱/۸۰	۴۴
GFRP14	۱۴	-	-	۸۲۵	۱/۹۹	۴۵
GFRP 16	۱۶	-	-	۷۷۵	۱/۸۰	۴۶



(ب)



(الف)

شکل ۶- (الف) اختصاص شرایط تکیه گاهی، (ب) بارگذاری

ترک های خمشی در نمونه های شبیه سازی شده می باشد. براساس نمودارهای شکل ۷، اولین ترک های خمشی در گروه اول در نمونه ی RCB-3GFRP16-G0 در بار ۶۶ کیلونیوتن و در نمونه ی RCB-2GFRP14-G0 در بار ۶۴ کیلونیوتن اتفاق افتاد و موجب کاهش سختی

۵- نتایج شبیه سازی

۵-۱- پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها

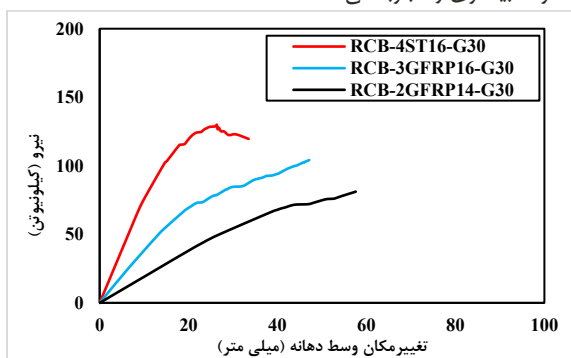
پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه ی تیرهای شبیه سازی شده در شکل ۷ آورده شده است. نکته ی قابل توجه در نمودارهای ارائه شده، وقوع اولین

^۶ Embedded region

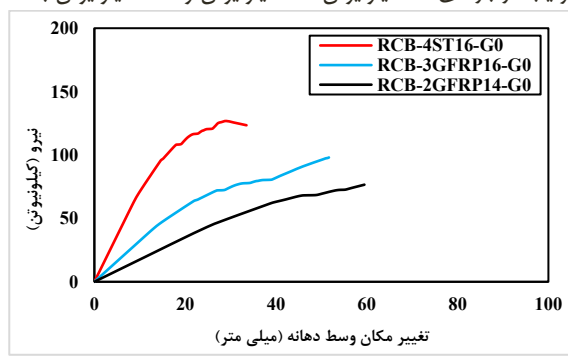
^۴ Truss

^۵ Concrete Damaged Plasticity (CDP)

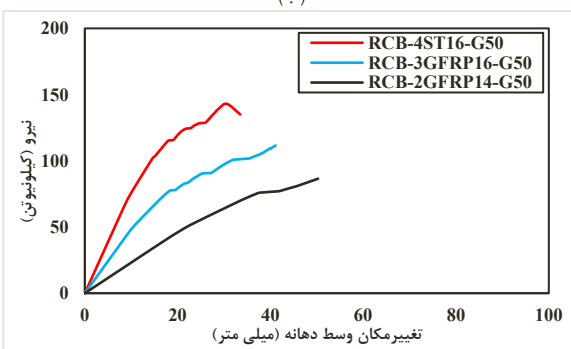
وقوع پیوست. همچنین اولین ترک‌های خمشی در نمونه‌های RCB-3GFRP16-G50، RCB-2GFRP14-G50 و RCB-4ST16-G50 به ترتیب در بارهای ۷۷ کیلو نیوتن، ۷۶ کیلو نیوتن و ۱۱۱ کیلو نیوتن اتفاق افتاد. با توجه به مشاهدات شبیه‌سازی، در شرایطی که معادل‌سازی آرماتورهای طولی نمونه‌ها از نظر ظرفیت خمشی انجام شود، تیرهای بتنی مسلح‌شده با آرماتورهای طولی فولادی در مقایسه با تیرهای بتنی مسلح‌شده با آرماتورهای طولی GFRP، سختی خمشی و بار معادل اولین ترک بیشتری را تجربه می‌کند.



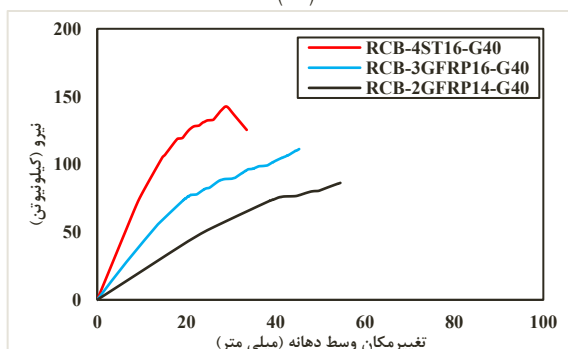
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۷- پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیرها (الف) گروه اول، (ب) گروه دوم، (ج) گروه سوم، (د) گروه چهارم

به ضریب ارتجاعی میلگرد GFRP به قطر ۱۴ (در این مطالعه ۴۵ گیگاپاسکال) نسبت به ضریب ارتجاعی میلگرد GFRP به قطر ۱۶ (در این مطالعه ۴۶ گیگاپاسکال) و نسبت مسلح‌کننده‌های طولی در این نمونه‌ها توجیه‌پذیر است. نمونه‌ی RCB-4ST16-G0 با درصد آرماتور طولی کششی ۰/۰۲۵ درصد نسبت به نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G0، افزایش ظرفیت باربری ۲۹/۳۸ درصدی و کاهش تغییر مکان وسط دهانه-ی ۳۵/۱۵ درصدی را تجربه کرد که با توجه به ضریب ارتجاعی بالاتر میلگرد فولادی به قطر ۱۶ (در این مطالعه ۲۱۰ گیگاپاسکال) نسبت به ضریب ارتجاعی میلگرد GFRP به قطر ۱۶ (در این مطالعه ۴۶ گیگاپاسکال) کاملاً توجیه‌پذیر است. در گروه دوم با افزایش نسبت سرباره جایگزین سیمان تا ۳۰ درصد، ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ی RCB-2GFRP14-G30 نسبت به نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G30 به ترتیب کاهش ۲۲/۱۲ درصدی و افزایش ۲۲/۲۵ درصدی داشته است. نمونه‌ی RCB-4ST16-G30 نیز نسبت به نمونه‌ی

خمشی و افت قابل‌ملاحظه‌ی ظرفیت باربری تیر شد. این در حالی است که اولین ترک‌های خمشی در نمونه‌ی RCB-4ST16-G0 در بار ۹۲ کیلو نیوتن اتفاق افتاد. وقوع اولین ترک‌های خمشی در نمونه‌های RCB-3GFRP16-G30، RCB-2GFRP14-G30 و RCB-4ST16-G30 از گروه دوم به ترتیب در بارهای ۶۹ کیلو نیوتن، ۶۷ کیلو نیوتن و ۹۳ کیلو نیوتن اتفاق افتاد. اولین ترک‌های خمشی در نمونه‌های RCB-3GFRP16-G40، RCB-2GFRP14-G40 و RCB-4ST16-G40 از گروه سوم، به ترتیب در بارهای ۷۴ کیلو نیوتن، ۷۳ کیلو نیوتن و ۱۰۱ کیلو نیوتن به

جدول ۷ مقادیر پارامترهای ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیرها را براساس نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS [۱۷]، آیین‌نامه‌ی ACI 318-19 [۲۵] و راهنمای ACI 440.1R-15 [۲۶] مقایسه می‌کند. نشانه‌های P_{ABA} و δ_{ABA} در جدول مذکور به ترتیب ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار ABAQUS [۱۷]، نشانه‌های P_{ACI318} و δ_{ACI318} به ترتیب ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی ACI 318-19 [۲۵] و نشانه‌های P_{ACI440} و δ_{ACI440} به ترتیب ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها براساس راهنمای ACI 440.1R-15 [۲۶] را نشان می‌دهند. براساس نتایج شبیه‌سازی، نمونه‌ی RCB-2GFRP14-G0 در گروه اول با نسبت آرماتور طولی کششی ۰/۰۰۹۴ نسبت به نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G0 با نسبت آرماتور طولی کششی ۰/۰۱۸۷، کاهش ظرفیت باربری ۲۱/۸۹ درصدی و افزایش تغییر مکان وسط دهانه‌ی ۱۵/۱۰ درصدی را تجربه کرده است. این تغییرات با توجه

وسط دهانه براساس آیین‌نامه‌ی ACI 318-19 [۲۵] برای نمونه‌های مسلح‌شده با میلگرد فولادی و راهنمای ACI 440.1R-15 [۲۶] برای نمونه‌های مسلح‌شده با میلگرد GFRP کمتر از مقادیر تغییرمکان وسط دهانه‌ی حاصل از نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

با توجه به نتایجی که حاصل شد، استفاده از سرباره موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی شده است. همچنین نمونه‌هایی که سرباره بیشتری داشتند، ظرفیت باربری بیشتر و تغییرمکان وسط دهانه‌ی کمتری نیز داشتند. این مساله را براساس راهنمای ACI 440.1R-15 [۲۶] می‌توان این‌گونه توجیه نمود که بتن با مقاومت بالاتر برای تیرهای مسلح‌شده با میلگردهای GFRP می‌تواند موجب افزایش سختی مقطع ترک‌خورده شود که با توجه به نتایج کاملاً مشهود است. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن موجب بهبود عملکرد پیوستگی میان میلگردهای کششی و بتن شده و کاهش لغزش، تغییرمکان وسط دهانه و ترک‌خوردگی را به‌دنبال دارد.

۵-۲- بررسی ترک‌ها در تیرهای بتنی

شکل ۸ نمایی از نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. معیار آسیب کششی در بتن با علامت d_t نشان داده می‌شود. پارامتر مذکور به‌صورت رابطه‌ی $d_t = 1 - \sigma_t / f_t$ تعریف می‌شود. پارامترهای σ_t و f_t نیز تنش‌های کششی و مقاومت کششی بتن را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در گروه‌های اول تا چهارم، نمونه‌های با درصد آرماتور کششی کم (مسلح‌شده با دو میلگرد GFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر) بیشترین مقدار آسیب‌ها در تیرهای بتنی را تجربه کردند. با توجه به ضریب ارتجاعی بالاتر میلگرد فولادی به قطر ۱۶ (در این مطالعه ۲۱۰ گیگاپاسکال) نسبت به ضریب ارتجاعی میلگرد GFRP به قطر ۱۶ (در این مطالعه ۴۶ گیگاپاسکال)، مقدار و شدت گسترش ترک‌ها در نمونه‌های مسلح‌شده با میلگرد فولادی بسیار کمتر از نمونه‌های مسلح‌شده با میلگرد GFRP می‌باشد.

جدول ۷- مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها

نمونه‌ها	PABA (کیلو نیوتن)	PACH40 (کیلو نیوتن)	PAC318 (کیلو نیوتن)	δ_{ABA} (میلی متر)	δ_{ACH40} (میلی متر)	δ_{ACI318} (میلی متر)
RCB-3GFRP16-G0	۹۸/۰۳	۹۶/۱۹	-	۵۱/۶۷	۳۷/۸۱	-
RCB-2GFRP14-G0	۷۶/۵۷	۷۵/۱۳	-	۵۹/۴۷	۴۲/۵۳	-
RCB-4ST16-G0	۱۲۶/۸۳	-	۱۲۴/۸۷	۳۳/۵۱	-	۳۱/۱۶
RCB-3GFRP16-G30	۱۰۴/۱۷	۱۰۲/۲۶	-	۴۷/۱۱	۳۶/۴۱	-
RCB-2GFRP14-G30	۸۱/۱۳	۷۹/۶۰	-	۵۷/۵۹	۴۱/۲۲	-
RCB-4ST16-G30	۱۲۹/۹۶	-	۱۳۱/۱۰	۳۳/۴۸	-	۳۰/۲۵
RCB-3GFRP16-G40	۱۱۱/۲۵	۱۰۹/۲۰	-	۴۵/۲۶	۳۵/۱۲	-
RCB-2GFRP14-G40	۸۶/۲۹	۸۴/۶۷	-	۵۴/۵۱	۴۰/۷۷	-
RCB-4ST16-G40	۱۴۲/۵۷	-	۱۳۷/۲۳	۳۲/۹۴	-	۲۸/۹۷
RCB-3GFRP16-G50	۱۱۱/۵۳	۱۰۹/۴۷	-	۴۱/۱۱	۳۴/۱۸	-
RCB-2GFRP14-G50	۸۶/۴۸	۸۴/۸۷	-	۵۰/۲۷	۴۰/۱۳	-
RCB-4ST16-G50	۱۴۲/۹۷	-	۱۳۷/۴۷	۳۲/۱۲	-	۲۸/۵۱

RCB-3GFRP16-G30، افزایش ظرفیت باربری ۲۴/۷۶ درصد و کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی ۲۸/۹۳ درصدی را تجربه کرد. در گروه سوم، ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ی RCB-2GFRP14-G40 در مقایسه با نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G40 به ترتیب کاهش ۲۲/۴۴ درصدی و افزایش ۲۰/۴۴ درصدی داشت. همچنین ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ی RCB-4ST16-G40 نسبت به نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G40 به ترتیب افزایش ۲۸/۱۵ درصدی و کاهش ۲۷/۲۲ درصدی داشت. نمونه‌ی RCB-2GFRP14-G50 در گروه چهارم در مقایسه با نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G50 کاهش ظرفیت باربری ۲۲/۴۶ درصدی و افزایش تغییرمکان وسط دهانه‌ی ۲۲/۲۸ درصدی داشته است. نمونه‌ی RCB-4ST16-G50 نسبت به نمونه‌ی RCB-3GFRP16-G50 به ترتیب افزایش ۲۸/۱۹ درصدی ظرفیت باربری و کاهش ۲۱/۸۷ درصدی تغییرمکان وسط دهانه داشته است.

تغییرمکان وسط دهانه برای تیرهای تحت اثر خمش چهار نقطه‌ای با استفاده از روش‌های تحلیل سازه از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود. در رابطه‌ی مذکور δ_{max} بیشینه مقدار تغییرمکان وسط دهانه، L_a طول دهانه برشی (فاصله‌ی هر یک از بارهای نقطه‌ای تا تکیه‌گاه)، L طول کل دهانه تیر، P مجموع دو بار نقطه‌ای متمرکز وارد شده بر تیر، E_c ضریب ارتجاعی بتن و I_e ممان اینرسی موثر تیر پس از ترک‌خوردگی است. روابط (۲) تا (۶) برای نمونه‌های مسلح‌شده با میلگردهای فولادی براساس آیین‌نامه‌ی ACI 318-19 [۲۵] و روابط (۷) تا (۹) برای نمونه‌های مسلح‌شده با میلگرد GFRP براساس راهنمای ACI 440.1R-15 [۲۶] ارائه شده است. در رابطه‌های مذکور I_{cr} ممان اینرسی ترک‌خوردگی برای مقطع مستطیلی، M_{cr} لنگر ترک‌خوردگی، M_a بیشینه لنگر در بار سرویس، γ پارامتر تغییر سختی در ناحیه‌ی ترک‌خورده و I_g ممان اینرسی مقطع ناخالص می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر تغییرمکان



RCB-4ST16-G30 نمونه‌ی (ه)



RCB-3GFRP16-G40 نمونه‌ی (خ)



RCB-2GFRP14-G40 نمونه‌ی (د)



RCB-4ST16-G40 نمونه‌ی (ذ)



RCB-3GFRP16-G50 نمونه‌ی (ر)



RCB-2GFRP14-G50 نمونه‌ی (ز)



RCB-4ST16-G50 نمونه‌ی (س)

شکل ۸- نتایج ترک‌های بتن در نمونه‌های شبیه‌سازی شده

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی رفتار تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای فولادی و GFRP انجام شد. جهت شبیه‌سازی مشخصات مصالح بتن حاوی سرباره کوره آهنگدازی در نرم‌افزار ABAQUS نمونه‌هایی ساخته شده و آزمایش شد. براساس شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر قابل استناد است:

- در بخش آزمایشگاهی پژوهش، وزن مخصوص نمونه‌های بتنی ساخته شده با افزایش درصد سرباره کاهش یافت. البته این کاهش با مقایسه‌ی مقادیر وزن مخصوص سرباره (در این مطالعه ۲۸۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و سیمان (در این مطالعه ۳۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب) کاملاً توجیه‌پذیر است.

- افزودن ۳۰ درصد سرباره جایگزین سیمان در بخش آزمایشگاهی پژوهش، اثر به‌سزایی در افزایش پارامترهای مقاومت فشاری و کششی

$$\delta_{max} = \frac{PL_a}{48E_cI_e}(3L^2 - 4L_a^2) \quad (۱)$$

$$I_e = I_{cr} + (I_g - I_{cr}) \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \leq I_g \quad (۲)$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 \quad (۳)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (۴)$$

$$kd = \frac{\sqrt{2dB+1}-1}{B} \quad (۵)$$

$$B = \frac{b}{nA_s} \quad (۶)$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \quad M_a \geq M_{cr} \quad (۷)$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f (d - kd)^2 \quad (۸)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (۹)$$

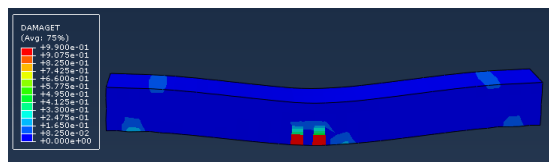
$$M_{cr} = \frac{0.62\lambda\sqrt{f_c}I_g}{y_t} \quad (۱۰)$$



RCB-3GFRP16-G0 نمونه‌ی (الف)



RCB-2GFRP14-G0 نمونه‌ی (ب)



RCB-4ST16-G0 نمونه‌ی (ت)



RCB-3GFRP16-G30 نمونه‌ی (ث)



RCB-2GFRP14-G30 نمونه‌ی (ج)

reinforced concrete structures. ASCE Journal of Composites for Construction. 2002; 6(3): 154-61.

[3] Nanni A. North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP:

principles, applications and unresolved issues. Construction and Building Materials. 2003; 17(6-7): 439-446.

[4] CAN/CSA-S806. Design and Construction of building components with fiber-reinforced polymers. Canadian Standards Association. Ontario, Canada, 2012.

[5] ISIS Manual No.3. Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007.

[6] Toutanji HA. Saafi M. Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars. Structural Journal. 2000; 97(5): 712-719.

[7] Shahmansouri AA. Bengar HA. Jahani E. Predicting compressive strength and electrical resistivity of eco-friendly concrete containing natural zeolite via GEP algorithm. Construction and Building Materials. 2019; 229: 1-18.

[8] Biscaia HC. Silva MA. Chastre C. An experimental study of GFRP-to- concrete interfaces submitted to humidity cycles. Composite Structures. 2014; 110: 354-368.

[9] Hwang CL. Lin CY. Strength development of blended blast-furnace slag-cement mortars. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 1986; 9(3): 233-239.

نمونه‌ها در سن ۲۸ روز داشته است (افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری و ۵/۰۲ درصدی مقاومت کششی).

- براساس آزمایش‌های انجام شده، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها با افزودن ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره افزایش قابل توجهی داشته است به طوری که مقاومت فشاری نمونه‌های با ۴۰ درصد و ۵۰ درصد جایگزین سرباره به ترتیب افزایش ۲۲/۰۳ درصدی و ۲۲/۴۷ درصدی داشته است. لازم به ذکر است که مقاومت کششی نمونه‌های با ۴۰ درصد و ۵۰ درصد جایگزین سرباره نیز به ترتیب افزایش ۱۰/۶۲ درصدی و ۱۰/۹۲ درصدی داشته است.

- براساس نتایج شبیه‌سازی، افزایش نسبت میلگردهای طولی GFRP (دو میلگرد GFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر در مقایسه با سه میلگرد GFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر) اثر به‌سزایی بر افزایش پارامتر ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها داشته است. این در حالی است که تسلیح تیرهای بتنی با میلگردهای فولادی در مقایسه با میلگردهای GFRP، اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش پارامترهای ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها داشته است. - با توجه به این مساله که استفاده از سرباره موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی شده است، نمونه‌هایی که سرباره بیشتری داشتند، ظرفیت باربری بیشتر و تغییرمکان وسط دهانه‌ی کمتری نیز داشتند که این مساله براساس راهنمای ACI440.1R-15 نیز کاملاً توجیه‌پذیر است.

- براساس نتایج شبیه‌سازی، مقادیر پارامترهای ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه در روابط ارائه شده در راهنمای ACI 440.1R-15 مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان داد که مقادیر ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه براساس راهنمای ACI 440.1R-15 کمتر از مقادیر حاصل از نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

۷- قدردانی

از شرکت ارائه خدمات آزمایشگاهی خاک و بتن آزما تحکیم پردیس تشکر و قدردانی می‌نمایم.

مراجع

[1] Matthys S. Taerwe L. Concrete slabs reinforced with FRP grids. I: One-way bending, ASCE Journal of Composites for Construction. 2000; 4(3): 145-153.

[2] Pilakoutas K. Neocleous K. Guadagnini M. Design philosophy issues of fiber reinforced polymer

- [19] Sijavandi K. Sharbatdar MK. Kheyroddin A. Experimental evaluation of flexural behavior of high-performance fiber reinforced concrete beams using GFRP and high strength steel bars. In Structures. 2021; 33:4256-4268.
- [20] Qu ZY. Yu QL. Synthesizing super-hydrophobic ground granulated blast furnace slag to enhance the transport property of lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2018; 191:176-186.
- [21] Miralami SM. Hajati Ziabari S. Esfahani MR. The Effect of GGBFS with Steel and Carbon Fibers on the Mechanical Properties and Durability of Concrete. AUT Journal of Civil Engineering. 2022; 6(2): 319-336.
- [22] ASTM C138/C138M-16a. Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete, West Conshohocken, PA, 2016.
- [23] BS EN 12390-3. Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens. British Standards, London, UK, 2009.
- [24] ASTM C496/C496M-11. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken, PA, 2011.
- [25] ACI Committee Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute, 2019.
- [26] American Concrete Institute, ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 440R.1R, Farmington Hills, MI, 2015.
- [27] Mander JB. Priestley MJ, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering. 1988; 114(8): 1804-1826.
- [10] Pal SC. Mukherjee A. Pathak SR. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. Cement and Concrete Research. 2003; 33(9): 1481-1486.
- [۱۱] محتاج خراسانی، امیر؛ اصفهانی، محمدرضا. اثر مقاومت بتن و آرایش و نسبت میلگرد بر رفتار خمشی و ترک خوردگی تیرهای بتن آرمه مسلح شده با میلگردهای GFRP. مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ۱ (پیاپی ۳۰)، ۱۳۹۹: ۸۸-۱۰۷.
- [12] Khorasani AM. Esfahani MR. Sabzi J. The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams. Composites Part B: Engineering. 2019; 161:530-546.
- [13] Hong ZHU. Zhiqiang DONG. Gang WU. Zhisheng W. Experimental study and theoretical calculation on the flexural stiffness of concrete beams reinforced with FRP bars. China Civil Engineering Journal. 2015; 48(11): 44-53.
- [14] Gribniak V. Caldentey AP. Kaklauskas G. Rimkus A. Sokolov A. Effect of arrangement of tensile reinforcement on flexural stiffness and cracking. Engineering Structures. 2016; 124: 418-428.
- [15] Mustafa SA. Hassan HA. Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites. HBRC journal. 2018; 14(3): 300-308.
- [16] Qin R. Zhou A. Lau D. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. Composites Part B: Engineering. 2017; 108: 200-209.
- [17] ABAQUS, Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA, 2022.
- [18] El-Nemr A. Ahmed EA. Benmokrane B. Flexural Behavior and Serviceability of Normal-and High-Strength Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI structural journal. 2013; 110(6): 107-1088.