

Investigating the Effects of Rebars and Stirrup Made of Glass Fiber Reinforced Polymers on the Behavior of Reinforced Concrete Beams*

Research Article

Mohammad Mirzaei Fathkouhi¹ Farzad Hatami²
Hamid Reza Rabieefar³

1. Introduction

One of the most important issues discussed in the engineering fields is the innovation of reinforced concrete structures. With the development and emergence of new technologies in the civil industry, the use of new innovations in reinforced concrete structures is inevitable. Beam is one of the most important members of reinforced concrete structures, which for various reasons such as cracking, corrosion of concrete and stirrup of the beam tensile zone, high deflection, lack of proper implementation of the structure at the time of construction, change in structure use and non-compliance with new rules and regulations, need to use new materials to be able to increase the service life of the structure and any infrastructure at a lower cost and to continue the operation for them. In the past, methods such as concrete and steel armor have been used to compensate for the weaknesses of the abovementioned cases.

With the increasing development of technology and the need to use new materials, today FRP materials have a special place in the construction industry. Proper and principled use of these materials requires knowing the issues related to them. FRP rebars and sheets have, over time, found a special place in the construction industry. FRP rebars will eventually replace steel rebars due to their lighter weight, up to one-third of similar steel rebars, and ten times resistance to them, while they are also cheaper. These rebars have better corrosion resistance due to the properties of the materials used in them, and perhaps the only weakness of these rebars compared to steel rebars is their lower bonding to concrete.

Various studies have been conducted on the bonding effect of FRP rebars and sheets in concrete structures, including the study of Saad Farid in 2002, the research of Xi Wang Sun et al., and the study of Qader Ahmad et al.. In all of them, FRP rebars have been used instead of steel rebars, while the stirrups are still made of steel. Since stirrups are effective factors against shear cracks in beams and the use of these members will have a significant effect on reducing beam cracking and deflection and possibly increasing bonding, in this study an attempt was made to determine the behavior of a concrete beam made by glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars and stirrups.

The aim of this study was to investigate the effects of GFRP rebars and stirrups on the behavior and service life of concrete beams to be replaced with steel rebars and stirrups in order to increase the service life of concrete beams in corrosive environments.

2. Method

In this research, an investigation and comparison between steel rebars and stirrups with GFRP rebars and stirrups was made by making several concrete beams in which the main variables were rebars and stirrups. Therefore, according to Figure 1, to achieve this goal, three concrete beams with cross-sectional dimensions of 200 by 300 mm with a length of 2000 mm were constructed. The main variables in these beams are rebars and stirrups so that the first beam be reinforced by steel rebars and stirrups, the second beam by GFRP rebars and steel stirrups, and the third beam by GFRP rebars and stirrups. The resistance of concrete in all three beams was assumed to be constant. These beams were subjected to a four-point loading in the laboratory, and the four beams were compared based on the P-delta curve and the obtained results of the strain gauge data that were installed on the beams.

* Manuscript received: 26, February, 2022, Revised, March, 9, 2022, Accepted, 21, March, 2022.

¹. PhD Candidate, Construction Management, Islamic Azad University, Kish International Branch, Kish, Iran.

². Corresponding author. Assistant Professor, Structure and Earthquake Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. **Email:** hatami@aut.ac.ir

³. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

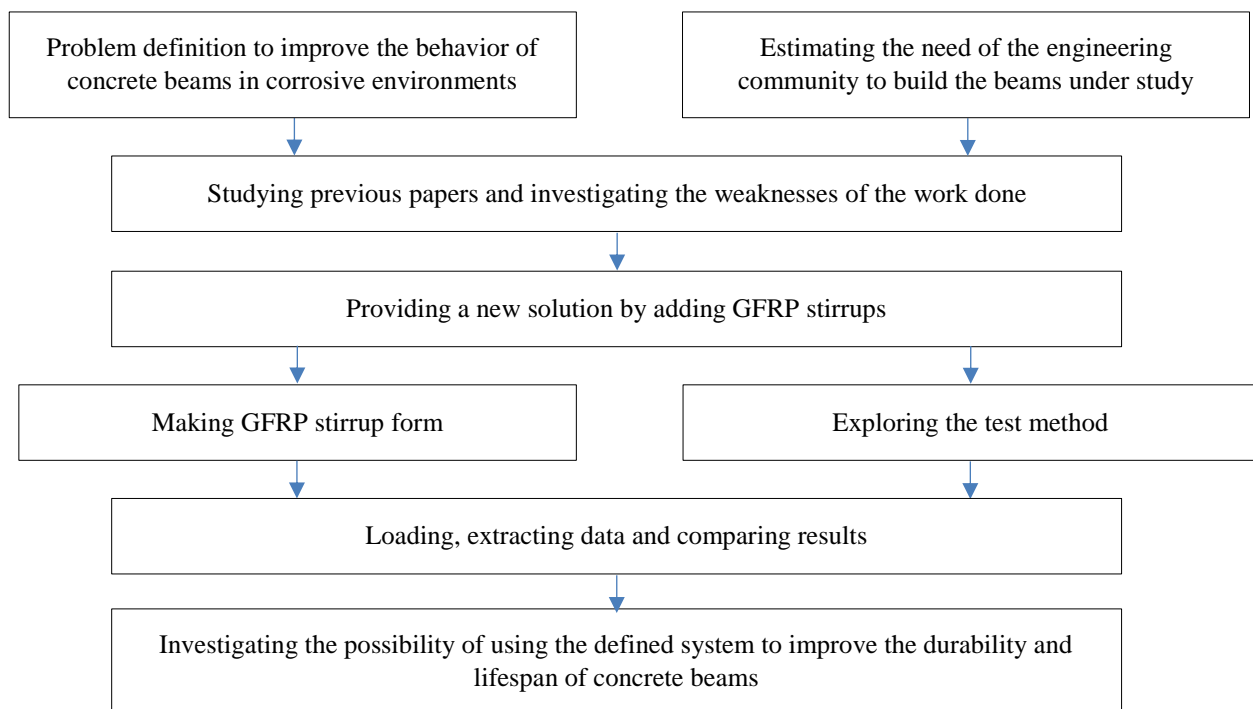


Figure 1. Steps of the research method

3. Results

By studying and summarizing the diagrams obtained from the load-displacement test of three concrete beams, the extracted points can be summarized as follows:

- Using GFRP rebars instead of steel rebars reduces the bending capacity of concrete beams by 55%;
- Reduction of bending capacity of concrete beams as a result of using GFRP rebars instead of steel rebars can be eliminated by increasing the diameter of GFRP rebars up to 55%;
- Using GFRP stirrups instead of steel stirrups increases the shear strength and reduces the ductility by up to one third in concrete beams;
- To increase the ductility in concrete beams in which GFRP stirrups are used, the distance of the stirrups can be increased up to three times, and at the same time, CFRP fibers can be used under the tensile zone of the beam as a jacketing around the concrete beam.

بررسی اثر میلگرد و خاموت‌های ساخته‌شده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف شیشه‌ای بر رفتار تیرهای بتن آرمه*

مقاله پژوهشی

محمد میرزایی فتح کوهی^(۱) فرزاد حاتمی برق^(۲) حمیدرضا ربیعی فر^(۳)

چکیده تیر از مهم‌ترین اعضای سازه‌های بتن‌آرمه است که به دلایل مختلفی، نیاز به استفاده از مواد و مصالح جدید دارد. یکی از راهکارهای افزایش مقاومت باربری تیرهای بتن‌آرمه، جایگزینی مصالح مصرفی با مواد جدید می‌باشد. میلگردهای پلیمری مسلح‌شده با الیاف (FRP) یکی از مصالح ساختمانی جدید می‌باشد که با وزنی کمتر و مقاومتی بیشتر نسبت به میلگردهای معمولی، می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی بتن، سبب بهبود عملکرد آن‌ها در مقابل ترک‌های برشی گردد. در این مطالعه از میلگردهای FRP با الیاف شیشه (GFRP) برای ساخت تیرهای بتنی با ابعاد مقطع ۲۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام آزمایش نیز از روش آزمایش بارگذاری چهارنقطه‌ای در آزمایشگاه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از خاموت‌های GFRP باعث افزایش مقاومت برشی تا سه برابر و کاهش شکل‌پذیری تیرهای بتنی تا ۵۵ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی بتن، میلگرد، خاموت، تیرهای بتن‌آرمه، پلیمر مسلح‌شده با الیاف شیشه‌ای (GFRP).

مقدمه

FRP به دلیل وزن سبک‌تر تا یک‌سوم میلگردهای فولادی مشابه و مقاومت ۱۰ برابری نسبت به آن‌ها به‌مرور جای میلگردهای فولادی را خواهد گرفت ضمن آن‌که از نظر اقتصادی کم‌هزینه‌تر نیز هستند. این میلگردها به‌خاطر خصوصیات مواد به‌کار رفته در آن مقاومت بهتری نسبت به خوردگی دارد و شاید بتوان تنها ضعف این میلگردها را نسبت به میلگردهای فولادی پیوستگی کمتر آن‌ها به بتن دانست.

مطالعات متعددی درباره بررسی اثر پیوستگی میلگردها و ورقه‌های FRP در سازه‌های بتنی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی توسط محققان داخلی و خارجی ارائه شده‌است که از آن جمله می‌توان به مطالعه سعد فرید و جبار [6] در سال ۲۰۰۲ با مقاله‌ای تحت عنوان جای‌گذاری میلگردهای GFRP با میلگردهای فولادی در سازه‌های بتنی اشاره نمود زی‌وانگ‌سان، و همکاران [7] مقاله‌ای با عنوان مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای بسته‌های FRP فولادی و قادر احمد، دیشاد کاکاسور و عبدالخالق یاسین مقاله‌ای تحت عنوان مقاومت و شکست خمشی تیرهای بتن الیافی مسلح‌شده با میلگردهای CFRP اشاره نمود. در تمامی آن‌ها از میلگردهای FRP به‌جای میلگردهای فولادی استفاده شده است؛

یکی از مهم‌ترین مسائل مورد بحث در جامعه مهندسی، نوآوری سازه‌های بتن مسلح می‌باشد [1]. با گسترش تکنولوژی و ظهور فناوری‌های جدید در صنعت عمران، استفاده از نوآوری‌های جدید در سازه‌های بتن مسلح امری اجتناب‌ناپذیر است [2,3]. تیر از مهم‌ترین اعضای سازه‌های بتن‌آرمه است که به دلایل مختلفی از قبیل ایجاد ترک، خوردگی بتن و آرماتورهای ناحیه کششی تیر، خیز زیاد و عدم اجرای اصولی سازه در زمان ساخت، تغییر کاربری سازه و عدم تطابق با قوانین و آیین‌نامه‌های جدید، نیاز به استفاده از مواد و مصالح جدید دارد تا بتوان با هزینه‌ای کمتر طول عمر مفید سازه و هرگونه زیرساخت را افزایش داد و زمینه بهره‌برداری را برای آن‌ها استمرار بخشید [4,5]. در گذشته برای جبران نقاط ضعف موارد ذکرشده، از روش‌هایی هم‌چون زره‌پوش بتنی و فولادی استفاده می‌شد.

با گسترش روز افزون تکنولوژی و نیاز به استفاده از مصالح جدید امروزه مواد FRP جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان پیدا کرده‌است. استفاده درست و اصولی از این مواد، مستلزم شناخت مسایل مرتبط با آن‌هاست. میلگردها و ورقه‌های FRP به‌مرور جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان پیدا کرده‌است. میلگردهای

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱/۷ می‌باشد.

(۱) گروه مهندسی عمران، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات سازه و زلزله، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

قادر احمد و همکاران [9] رفتار و مقاومت خمشی تیرهای با بتن معمولی و بتن الیافی را که هر دو با میلگردهای CFRP مسلح شده بودند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش خیز و افزایش اولین بار ترک‌خوردگی با افزایش مقاومت فشاری، افزایش اندکی در خیز تیر بتن الیافی و نزدیک به همان مقدار بار نهایی مشاهده شد.

دجیان شن و همکاران [10] رفتار پیوستگی اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای BFRP را تحت نرخ‌های مختلف کرنش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها و آنالیزهای مربوط نشان داد که مقاومت اتصال اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای BFRP با افزایش نرخ‌های کرنش افزایش پیدا کرد و یک مدل برای مقاومت چسبندگی با توجه به نرخ کرنش پیشنهاد شد.

فیاض جواد و همکاران [11] رفتار سازه‌ای تیرها و ستون‌های بتنی مسلح‌شده با میلگردهای ساخته‌شده از ترکیب پلاستیک‌های زائد WPGFRP را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پلاستیک زائد در میلگردهای GFRP که منجر به تولید میلگردهای WPGFRP می‌شود مقاومت کششی و فشاری میلگردها را به ترتیب $17/2\%$ و $19/3\%$ افزایش می‌دهد و از این رو مقاومت مواد اضافه‌شده اثبات شد.

ژیکیانگ دانگ و همکاران [12] رفتار تیرهای هیبریدی ترکیب‌شده از بتن آب شور دریا و پوسته‌های پیش‌ساخته مسلح‌شده با میلگردهای FRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت خمشی تیرهای مورد آزمایش بهبود قابل توجهی نیافت اما بار ترک‌خوردگی و جذب انرژی به ترتیب حدود 70% درصد و 24% درصد بهبود یافت.

بهرروز قاضی و علی یوسف [13] شش تیر بتنی با مقاومت بالا در مقیاس بزرگ که با میلگردها و خاموت‌های BFRP مسلح شده بود و سه تیر متناظر بدون خاموت ساختند و آن‌ها را برای شکست برشی تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که اثر اندازه در شکست برشی نمی‌تواند به‌طور کامل حذف شود، چراکه ترک برشی اولیه، عرض ترک برشی، تحلیل اجزای مقاوم در برابر برش، کرنش خاموت‌های BFRP و مقاومت برشی عادی شده هنوز به عمق تیر مرتبط هستند.

توماس آنتونیو و مارکو [14] پیزانی رفتار بلندمدت میلگردهای مسلح GFRP را مورد بررسی قرار دادند. میلگردهای

درحالی‌که هم‌چنان خاموت‌ها از نوع فولادی می‌باشند. از آن‌جا که خاموت‌ها، عوامل مؤثر در برابر ترک‌های برشی تیرها هستند، استفاده از این اعضا اثر قابل توجهی بر کاهش ترک‌خوردگی تیر و کاهش خیز و احتمالاً افزایش چسبندگی خواهد داشت، در این تحقیق سعی خواهد شد تا رفتار یک تیر بتنی که با استفاده از میلگردها و خاموت‌های کامپوزیت پلیمری-الیاف شیشه‌ای (GFRP) ساخته شده، مورد بررسی قرار گیرد.

درواقع هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر میلگردها و خاموت‌های GFRP بر رفتار و طول عمر مفید تیرهای بتنی است تا در صورت اثبات توانایی این نوع میلگردها و خاموت‌ها در برآورده کردن انتظارات خمشی و برشی، برای افزایش طول عمر مفید تیرهای بتنی در محیط‌های خورنده، بتوان آن‌ها را جایگزین میلگردها و خاموت‌های فولادی نمود.

مطالعات پیشین

سعد فرید در سال ۲۰۰۲ چهار نمونه شامل بتن غیرمسلح، بتن مسلح‌شده با الیاف GFRP با سطح صاف، بتن مسلح‌شده با الیاف GFRP پوشش داده‌شده با ماسه و بتن مسلح‌شده با میلگردهای فولادی را مورد آزمایش قرار داد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی میلگردهای GFRP، 593 و مقاومت چسبندگی 760 مگاپاسکال است و مقاومت فشاری در حد معقول بتن در حدود $25/67$ مگاپاسکال است [6].

زی‌وانگ سان و همکاران ۵ تیر بتنی مسلح‌شده با بسته‌های هیبریدی را مورد آزمایش قرار دادند. نمونه‌ها توسط میلگردهای فولادی و میلگردهای بسته‌ای FRP فولادی مسلح شده بود. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که همه تیرها مدهای شکست خردشدگی بتن را پس از تسلیم میلگردهای فولادی نشان می‌دهند که توسعه پلاستیک میلگردهای فولادی توسط میلگردهای FRP مهار شده است [7].

رامی حمد و همکاران [8] نقش استفاده از کلاهک‌های انتهایی فولادی برای افزایش رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح‌شده با FRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از تکنیک پیشنهادی به‌طور محسوسی مقاومت اتصال بین میلگردهای FRP و بتن آسیب‌دیده از گرما را بهبود بخشیده است و پاسخ خمشی تیرهای متناظر را ارتقا داده است.

تغییر شکل یافته بیشتر است و زمانی که قطر میلگرد افزایش یابد، استحکام میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه تغییر شکل داده شده با پوشش ماسه کاهش می یابد.

لیو و همکاران [20] میلگردهای کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را که تحت تکنولوژی جدید به پیچاندن سعی بر افزایش مقاومت آن‌ها داشتند، مورد بررسی قرار دادند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی میلگردهای GFRP با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر با قطر هسته ۲۰ میلی‌متر برای تعیین بهبود مقاومت فشاری، شکل‌پذیری و رفتار شکست انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میلگردهای GFRP با قطر هسته ۲۰ میلی‌متر، نتایج امیدوارکننده‌ای را در مقاومت فشاری و شکل‌پذیری با افزایش تعداد لایه‌های پیچ داده شده نشان داده‌اند که در آن مقاومت فشاری میلگردهای با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۷۴ و ۶۳ درصد افزایش یافته است.

روش شناسی

در این تحقیق سعی خواهد شد تا با ساخت چندین تیر بتنی که متغیر اصلی در آن‌ها میلگردها و خاموت‌ها هستند، به بررسی و مقایسه میان میلگردها و خاموت‌های فولادی با میلگردها و خاموت‌های GFRP دست یافت. از همین رو مطابق شکل (۱) برای نیل به این هدف سه تیر بتنی با ابعاد مقطع ۲۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر ساخته خواهد شد. متغیر اصلی در این تیرها میلگردها و خاموت‌ها هستند به نحوی که تیر اول توسط آرماتورها و خاموت‌های فولادی، تیر دوم توسط آرماتورهای GFRP و خاموت‌های فولادی و تیر سوم توسط آرماتورها و خاموت‌های GFRP مسلح خواهند شد. مقاومت بتن در هر سه تیر ثابت فرض می‌شود. سپس این تیرها در آزمایشگاه تحت بار چهار نقطه‌ای قرار خواهند گرفت و از روی منحنی P-delta و نتایج حاصل از اطلاعات کرنش‌سنج‌هایی که بر روی تیرها نصب خواهند شد به مقایسه چهار تیر معرفی شده پرداخته خواهد شد.

تقویت شده با الیاف شیشه نشان‌دهنده یک راه حل معتبر به عنوان تقویت داخلی اعضای بتنی برای برخی از کاربردهای خاص است. میلگردهای GFRP نسبت به وزنشان مقاومت بالا و همچنین مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارند.

حمید صدرایی و همکاران [15] تأثیر مواد به‌کاررفته در میلگردها، مقدار و نحوه آرایش آن‌ها و مقاومت بتن و ضخامت دال را بر روی رفتار دینامیکی دال‌های بتنی مسلح به روش‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که افزایش نسبت تقویت یا ضخامت دال رفتار دال‌های بتنی مسلح را تحت بارهای ضربه‌ای افزایش می‌دهند.

عثمان حامد و همکاران [16] نتایج ۹ تیر بتنی عمیق پیوسته دو دهنه مسلح شده با میلگردهای GFRP و یک نمونه مسلح شده با میلگردهای فولادی را منتشر کردند. دو نسبت ۱ و ۱/۷ درصد و سه ارتفاع مقطع ۳۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و همچنین دو نسبت آرماتورگذاری شبکه ۰ و ۰/۴ درصد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نسبت آرماتورگذاری شبکه ظرفیت باربری را تا حدود ۱۰ و ۱۸ درصد به ترتیب برای نمونه‌ها با نسبت ۱ و ۱/۷ بهبود بخشیده است.

ناجیه صالح و همکاران [17] خواص پیوستگی بین میلگردهای GFRP کار گذاشته شده در بتن با مقاومت بالا را به صورت آزمایشگاهی از طریق تست کشش مورد بررسی قرار دادند. بررسی چشمی نمونه‌های آزمایش شده مسلح شده با میلگردهای GFRP نشان داد که گسیختگی ناشی از کشش به علت آسیب سطح بیرونی میلگردها بوده است در حالی که قسمت پوشیده شده با ماسه نتایج قابل قبولی در پیوستگی نمونه‌های مسلح شده با الیاف GFRP از خود نشان داد.

چنگ و همکاران [18] به بررسی مقاومت برشی و رفتار شکست دال‌های بتنی مسلح تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ورقه‌های GFRP به طور قابل توجهی ظرفیت برشی پانچ اتصالات دال-ستون را افزایش می‌دهد.

ژو و همکاران [19] رفتار میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه با پوشش شن و ماسه را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استحکام میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای با پوشش شن و ماسه به طور متوسط ۵۹ تا ۱۲۷ درصد نسبت به میلگردهای فولادی



شکل ۱ فلوچارت مطالعه حاضر

خورنده در اثر حمله سولفات‌ها، کلریدها و انواع مواد خورنده دیگر، دچار خرابی‌های مختلفی از قبیل ریزش بتن پوشش و خوردگی آرماتورها می‌شوند. تعمیر این سازه‌ها هزینه بسیار زیادی را در بر خواهد داشت؛ به طوری که تعمیر و تعویض سازه‌های بتن آرمه خسارت دیده در سراسر دنیا هر ساله میلیون‌ها دلار هزینه دارد. شکل (۲) نمونه‌ای از میلگرد FRP را نشان می‌دهد [13].

از آنجا که میلگردهای FRP در ایران عموماً از نوع الیاف شیشه است و از الیاف کربن بیشتر برای تولید ورقه‌های CFRP استفاده می‌شود و با توجه به قیمت پایین‌تر و در نتیجه اقتصادی بودن میلگردهای GFRP که قیمتی تقریباً مشابه میلگردهای فولادی دارند، سعی شد تا از این نوع میلگردها استفاده شود.

مواد و مصالح مصرفی

به منظور ساخت تیرهای بتن آرمه در این مطالعه از انواع میلگردها و خاموت‌های فولادی و GFRP، مصالح پایه (شن، ماسه، سیمان) با طرح اختلاط مشخص استفاده شده است که در ادامه هر یک از آن‌ها شرح داده می‌شوند.

میلگردهای پلیمری الیافی

استفاده از مواد مرکب ساخته‌شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف FRP (Fiber Reinforced Polymer) به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه‌های موجود معرفی شده است.

یکی از کاربردهای FRP استفاده از آن به صورت میلگرد است. بسیاری از سازه‌های بتن آرمه در محیط‌های

دارای مقطع مستطیلی بودند، هم‌چون خاموت‌های ستون‌های دایره‌ای به صورت مارپیچ ساخته شدند.

میلگردهای مصرفی مطالعه حاضر

در این تحقیق برای نمونه شاهد از میلگرد فولادی آج‌دار سایز ۱۲ و برای نمونه‌های دوم و سوم از میلگردهای GFRP سایز ۱۲ استفاده شده‌است. طول میلگردهای فولادی ۱۹۰ سانتی‌متر با ۵ سانتی‌متر خم در انتها و طول میلگردهای GFRP نیز ۱۹۰ سانتی‌متر بود. میلگردهای GFRP برخلاف خاموت‌های GFRP نیاز به طراحی و ساخت قالب خاصی نداشتند و به صورت آماده خریداری شدند. نکته بسیار مهم در بحث میلگردهای GFRP عدم داشتن خم انتهایی این میلگردها به علت خم نشدن میلگردهای GFRP بود. از آن‌جا که نمونه اول که در آن از میلگردهای فولادی استفاده شده بود دارای خم ۹۰ درجه بودند، باید فکری به حال این مسئله می‌شد تا هر سه تیر مورد مطالعه در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گیرند. بدین منظور از بست‌های کربنی برای ایجاد خم میلگردهای GFRP استفاده شد.

مصالح پایه (شن و ماسه، سیمان و آب)

برای ساخت بتن از شن نخودی و ماسه دو بار شور و سیمان فله‌ای پرتلند تیپ ۲ و آب شرب استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

عملیات اختلاط بتن و بتن‌ریزی

برای ساخت نمونه‌ها از یک کارگاه ساخت تیرچه بتنی در شهرستان شهریار استان تهران استفاده شد. از مزیت‌های این کارگاه داشتن بتونیر ۱۰۰۰ لیتری برای اختلاط مناسب بتن، ترازو برای توزین شن و ماسه و سیمان و آب، دستگاه اسلامپ برای سنجش روانی بتن و قالب‌های مکعبی برای آزمایش نمونه بتن و فضایی باز برای ساخت راحت و بهتر نمونه‌ها بود. برای اختلاط بتن از طرح اختلاط مطابق با جدول (۲) استفاده شد.



شکل ۲ انواع میلگردهای FRP

خاموت‌های مصرفی مطالعه حاضر

در این مطالعه از دو نوع خاموت فولادی و GFRP استفاده شده‌است. خاموت‌های فولادی مورد استفاده در این تحقیق به روش معمول و از قطر ۱۰ میلی‌متر و با فاصله پشت تا پشت ۱۵×۲۵ سانتی‌متر ساخته شدند. مسئله اصلی در ساخت تیرهای مذکور، ساخت خاموت‌های GFRP می‌باشد. از آن‌جا که میلگردهای GFRP قابلیت خم‌شوندگی ندارند برای ساخت خاموت‌ها، ابتدا قالبی ساخته شد که با استفاده از این قالب در زمان پخت، حرارت‌دهی و ساخت میلگردهای GFRP امکان خم کردن خاموت‌ها به شکل و ابعاد مورد نظر، فراهم می‌شد [12]. نکته مهم در ساخت خاموت‌های GFRP این بود که از آن‌جا که فرایند ساخت به صورت پیوسته بود، خاموت‌های حاصل که

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

مشخصات شیمیایی	نتایج	حدود استاندارد	مشخصات فیزیکی	نتایج	حدود استاندارد
%SiO ₂	20.7±0.3	حداقل: ۲۰	Blaine	3200±100	حداقل: ۲۸۰۰
%Al ₂ O ₃	5.2±0.2	حداکثر: ۶	Auto Clave Method	0.08±0.02	حداکثر: ۰.۸
%Fe ₂ O ₃	4.6±0.2	حداکثر: ۶	Setting Time In	140±20	حداقل: ۴۵
%CaO	65±0.5	-	Setting Time Fi	240±20	حداکثر: ۳۶۰
%MgO	1.8±0.2	حداکثر: ۵	مقاومت فشاری ۳ روزه	270±20	حداقل: ۱۰۰
%SO ₃	2.2±0.4	حداکثر: ۳	مقاومت فشاری ۷ روزه	440±20	حداقل: ۱۷۵
%K ₂ O	0.5±0.05	-	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	530±20	حداقل: ۳۱۵
%Na ₂ O	0.15±0.05	-	الک ۰.۹ میلی متر	1.1±0.1	-
%L.O.I (Loss Of Ignition)	1±0.5	حداکثر: ۳	چگالی	3.12±0.01	-
%IR (Insoluble Residue)	0.4±0.1	حداکثر: ۰.۷۵			
%Free CaO	1.3±0.2	-			
%C ₃ S	59.47	-			
%C ₂ S	14.48	-			
%C ₃ A	6	حداکثر: ۸			
%C ₄ AF	14	-			

علامت‌گذاری استرین‌گیج‌ها بر روی نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط جرثقیل بر روی ست‌آپ قرار گرفت. به دلیل شرایط ست‌آپ موجود در آزمایشگاه، تیر به صورت برعکس بر روی ست‌آپ قرار می‌گرفت؛ بدین صورت که ناحیه کششی و تکیه‌گاه‌های تیر در بالا و دو بار متمرکز میانی در پایین تیر قرار می‌گرفت. محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها در فاصله ۱۰ سانتی متری از انتهای تیر و در آکس محل قرارگیری پلیت‌ها بود.

پس از انتقال نمونه‌ها بر روی ست‌آپ و قرارگیری در محل مناسب مطابق شکل (۴) استرین‌گیج‌ها توسط چسب مخصوص بر روی نمونه بتنی نصب می‌شدند. این استرین‌گیج‌ها توسط رشته سیم‌هایی به دستگاه دیتا لاگر به منظور استخراج داده‌ها متصل می‌شدند. هم‌چنین قبل از شروع آزمایش، ضریب مقیاس استرین‌گیج‌ها به کامپیوتر داده می‌شد تا با استفاده از این ضریب، مقدار عددی کرنش‌ها به صورت مستقیم از دیتا لاگر استخراج شود. پس از طی این مراحل دستگاه LVDT که وظیفه آن سنجش خیز تیر به صورت مکانیکی در وسط دهانه تیر می‌باشد، بر روی تیر نصب می‌شد. پس از طی این مراحل، تیر آماده آزمایش بود. دمای آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با دمای محیط آزمایشگاه به میزان حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد بود. نرخ بارگذاری اعمال‌شده نیز برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه بود.

جدول ۲ مشخصات وزنی مصالح برای طرح اختلاط بتن

نوع مصالح	مقدار	واحد
آب	۲۲۵	لیتر
سیمان	۴۰۰	کیلوگرم
شن	۸۲۵	کیلوگرم
ماسه	۸۸۰	کیلوگرم

هم‌چنین برای انجام این آزمایش از شن‌های نخودی و ماسه دوبرار شور برای ساخت بتن استفاده شد. باتوجه به این‌که برای ساخت نمونه‌ها و قالب‌های مکعبی به کمی کمتر از نیم متر مکعب بتن نیاز بود، عملیات توزین شن و ماسه توسط فرغون برای نصف اوزان جدول فوق صورت پذیرفت. هم‌چنین از ۲۰۰ کیلوگرم سیمان و ۱۱۲/۵ کیلوگرم آب برای ساخت بتن استفاده شد.

دستگاه آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های مطالعه حاضر، از دستگاه بارگذاری چهار نقطه مطابق شکل (۳) استفاده شد. دمای آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با دمای محیط آزمایشگاه به میزان حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد بود. نرخ بارگذاری اعمال‌شده نیز برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر دقیقه بود. پس از



شکل ۳ آزمایش چهار نقطه‌ای



شکل ۴ انجام بارگذاری بر روی نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه بارگذاری چهار نقطه‌ای

تحلیل نتایج

LVDT خود را نشان می‌دهد. در واقع می‌توان گفت که رفتار تیر در این محدوده کاملاً خطی می‌باشد.

پس از آن منحنی تیر تا بارگذاری حدود $10/7$ تن به صورت کاملاً خطی رفتار کرده و خیز وسط دهانه تیر تا این نقطه به 10 میلی‌متر رسید. نکته بسیار مهم در بارگذاری نمونه شاهد این است که در حین بارگذاری ترک‌هایی به صورت کاملاً منظم و با تعداد زیاد (حدود 15 عدد ترک) در طول تیر رخ داد که این ترک‌ها با افزایش مقدار بار به یک نسبت بزرگ شدند و در عمق تیر گسترش یافتند.

پس از این مرحله تیر وارد رفتار غیرخطی شد و با اعمال بار، خیز تیر افزایش چشم‌گیری پیدا کرد؛ به نحوی که تا رسیدن بار به عدد $16/35$ تن، خیز تیر به عدد 63 میلی‌متر رسید. در طی این مرحله تعداد ترک‌ها ثابت (همان 15 عدد) بود ولی ترک‌ها در حال عریض‌تر شدن بودند که این عریض‌تر شدن با گسترش ترک در عمق تیر یا عمق ناحیه فشاری همراه بود که این امر منجر

پس از انجام تمامی عملیات قبل از آزمایش، نمونه شاهد آماده بارگذاری شد. نرخ بارگذاری برای هر سه نمونه ثابت و برابر با 700 کیلوگرم بر دقیقه به کامپیوتر داده شد. نتایج به دست آمده از منحنی P-Delta مطابق با شکل (۵) نشان می‌دهد که تیر مذکور تا بارگذاری 300 کیلوگرم به صورت کاملاً خطی و خیز بسیار ناچیز و پس از آن تا بارگذاری $1/5$ تن با جابه‌جایی قابل ملاحظه-ای در حدود چهار میلی‌متر همراه بود که مرحله دوم به صورت غیرخطی رخ داد؛ البته قطعاً تیر تا این محدوده هنوز وارد رفتار غیرخطی نشده بود و این امر که در نمونه‌های دیگر نیز رخ داد به این علت اتفاق می‌افتد که تکیه‌گاه‌های تیر و نقاط اعمال بار متمرکز در شروع بارگذاری به صورت صد درصد ثابت و پایدار نیست و کمی پس از بارگذاری وضعیت ثابتی پیدا می‌کند که این امر همراه با جابه‌جایی‌های کوچک در کل تیر اتفاق می‌افتد و خیز مذکور نه در وسط دهانه که در کل تیر نسبت به دستگاه

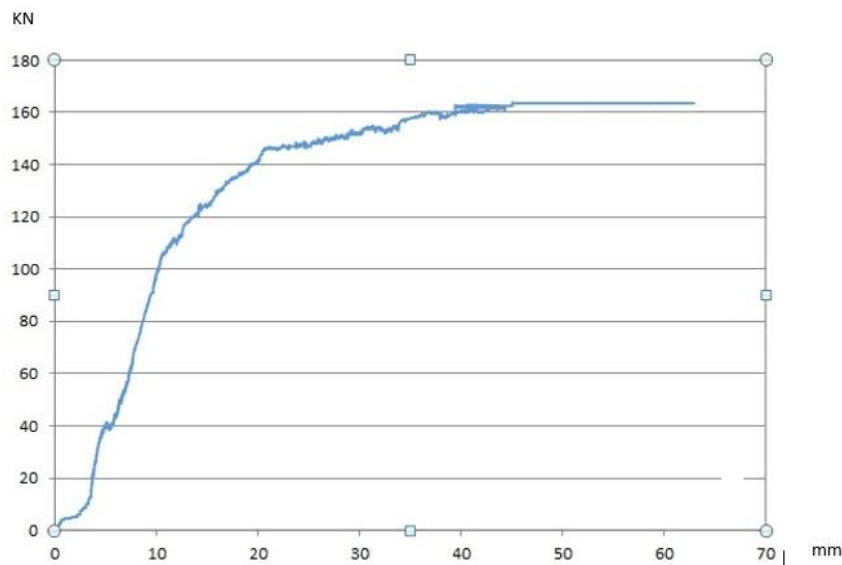
افزایش پیدا کرد. پس از آن تیر سه بار حرکت مقاومت خمشی در برابر افزایش بار و سپس خالی کردن ظرفیت بارپذیری را تکرار کرد که خالی کردن ظرفیت بارپذیری هر بار با شنیده شدن صدای گسترش دو ترک تیر همراه بود. طبق نمودار حاصل از منحنی P-Delta بار اول و بار دوم تیر نتوانست حد اولیه بارپذیری خود را بشکند و در بار اول به عدد $6/5$ تن در جابه‌جایی 31 میلی‌متر و در بار دوم به عدد $6/2$ تن در جابه‌جایی 41 میلی‌متر رسید اما در بار سوم منحنی P-Delta به عدد $7/35$ تن در جابه‌جایی 64 میلی‌متر رسید که ماکزیمم بار قابل تحمل توسط تیر مورد نظر بود.

با مقایسه نمونه دوم و نمونه شاهد می‌توان به این نتیجه رسید که در خیز نهایی دو تیر که برای هر دو نمونه شاهد و تیر دوم برابر 63 میلی‌متر می‌باشد قابلیت تحمل بار تیر شاهد حدود دو برابر تیر نمونه دوم می‌باشد. از سوی دیگر نکته بسیار مهمی که از آن در نتایج این تحقیق استفاده خواهد شد این است که با مشاهده ترک‌های روی دو تیر می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار تیر نمونه دوم متفاوت از رفتار تیر نمونه شاهد است. به بیان دیگر استفاده از آرماتورهای GFRP نه تنها ظرفیت بارپذیری تیر را کاهش می‌دهد که حتی نوع رفتار و عملکرد تیر را نیز به گونه‌ای دیگر رقم می‌زند.

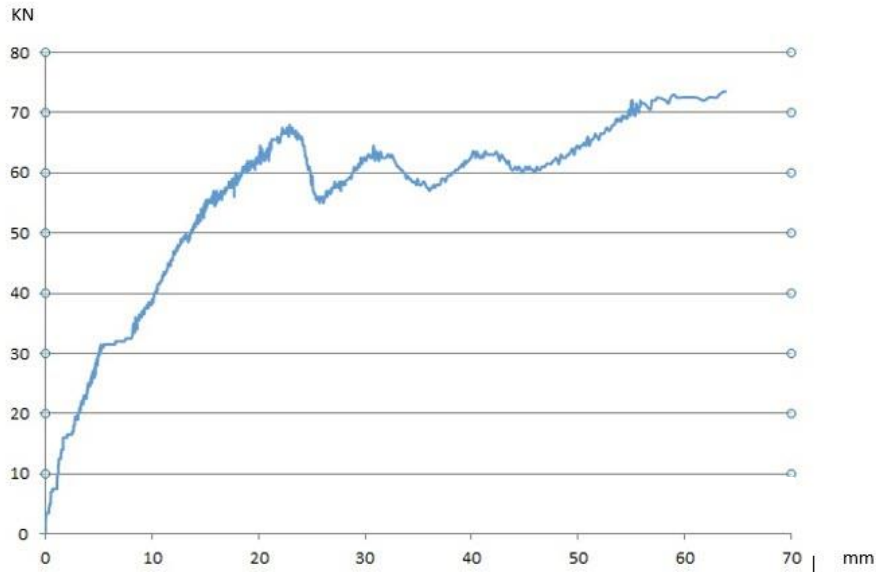
به کاهش مقطع مقاومت فشاری بتن و در نتیجه کاهش مقاومت خمشی تیر بتنی شد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد تیر دوم از لحاظ تمامی پارامترهای هندسی و مقاومتی مانند نمونه شاهد بوده، با این تفاوت که در آن به جای میلگردهای طولی فولادی، از میلگردهای GFRP استفاده شده است. پس از انجام عملیات قبل از آزمایش برای نمونه دوم و قراردادن تیر مذکور بر روی ست‌آپ، بارگذاری با نرخ 700 کیلوگرم بر دقیقه به تیر اعمال شد. مطابق با شکل (۶) نتایج حاصل از منحنی P-Delta تیر نمونه دوم نشان‌دهنده خطی بودن این نمودار تا بار $3/1$ تن می‌باشد که این میزان بار، خیز 5 میلی‌متری را برای تیر به دنبال داشت. پس از این مرحله تیر به مقدار کمی وارد ناحیه غیرخطی شده و میزان خیز تیر با ثابت بودن بار، حدود 4 میلی‌متر افزایش یافته و به 9 میلی‌متر رسیده و دوباره تیر شروع به مقاومت کرده است.

پس از این مرحله منحنی بارگذاری تیر با شیب تقریباً ثابتی از بار $3/5$ تن تا $6/7$ تن حرکت کرد و خیز متناظر با این بار حدود 23 میلی‌متر بود. در این لحظه بارپذیری تیر با شنیده شدن صدای مهیب ترک تیر در آزمایشگاه حدود 1 تن کاهش پیدا کرد و به عدد $5/8$ تن رسید که خیز تیر نیز تا حدود 25 میلی‌متر



شکل ۵ منحنی بار تغییر مکان نمونه شاهد در اثر بارگذاری



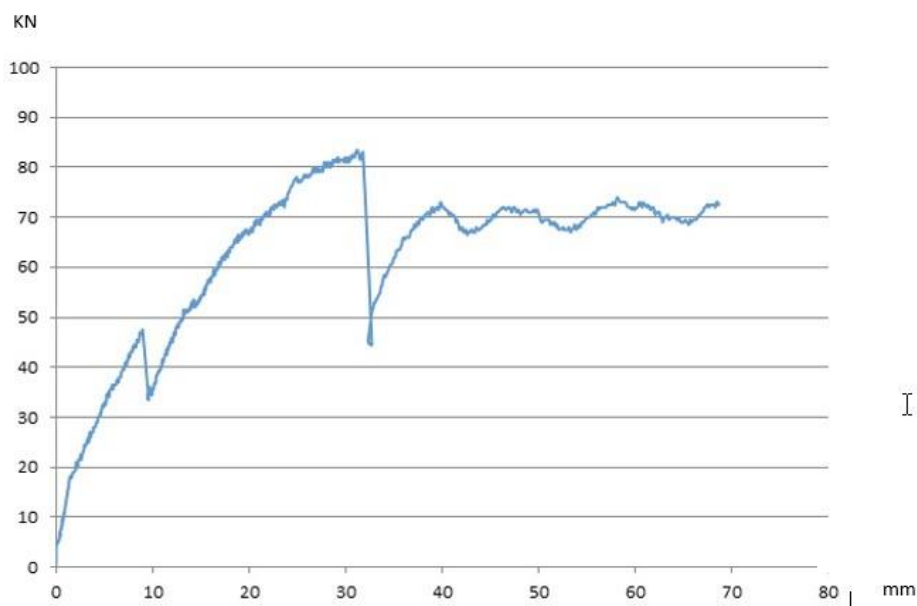
شکل ۶ منحنی بار تغییر مکان نمونه دوم در اثر بارگذاری

مقاومت و کاهش آن را طی کرد که هر مرحله با گسترش و بزرگتر شدن ترکها اتفاق افتاد و ترک جدیدی در تیر بتنی رخ نداد و مهم‌تر این‌که در هیچ کدام از مراحل جدید رکورد ظرفیت بارپذیری شکسته نشد و در نهایت فرایند بارگذاری در بار $7/25$ تن در خیز $6/6$ میلی‌متر متوقف گردید. از نکات مهم آزمایش نمونه سوم مقدار و گسترش ترکها در تیر بود که همانند نمونه دوم به تعداد خیلی کم رخ داد که این امر نشان‌دهنده رفتار متفاوت تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردها و خاموت‌های GFRP در مقایسه با تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردها و خاموت‌های فولادی می‌باشد.

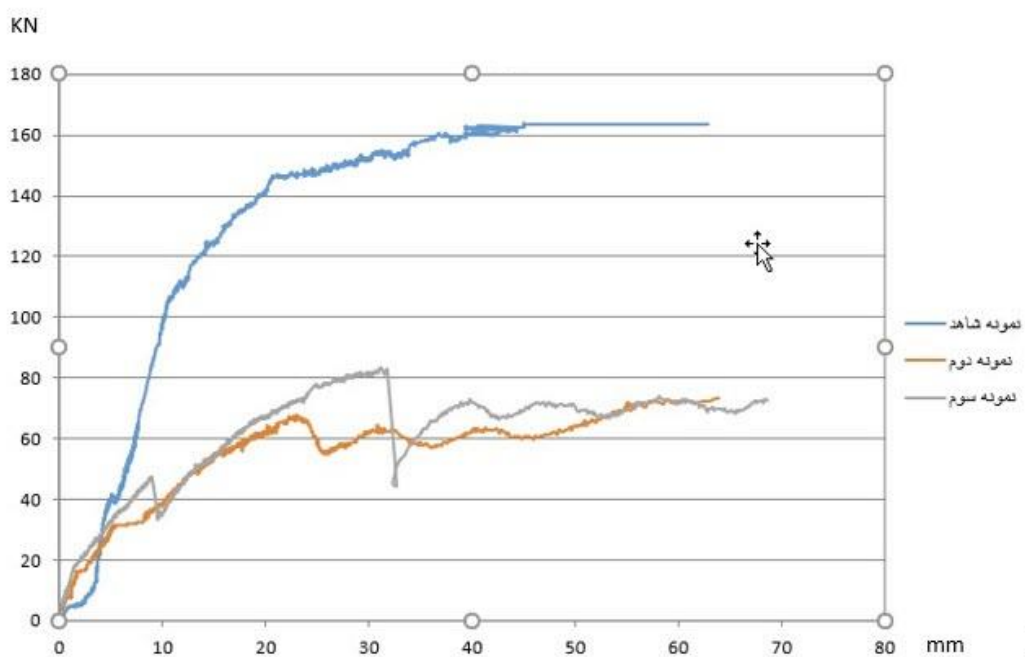
با مشاهده و مقایسه نمودارهای سه نمونه مورد آزمایش مطابق شکل (۸) به راحتی می‌توان دریافت که ظرفیت تحمل بار در نمونه‌های دوم و سوم به نصف کاهش پیدا کرده و پرش‌های ناگهانی نمودار در نمونه‌های دوم و سوم نشان‌دهنده افزایش ظرفیت برشی و کاهش شکل‌پذیری این دو نمونه نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. هر کدام از پرش‌های بزرگ نمودار نشان‌دهنده بروز ناگهانی ترکی بزرگ با عرض زیاد در نمونه‌های دوم و سوم بود که باعث شد تعداد کل ترکها از سه عدد تجاوز نکند، درحالی‌که در نمودار نمونه شاهد، نموداری یک‌نواخت را شاهد هستیم که نشان‌دهنده بروز مرحله‌ای ترکها با تعداد زیاد و عرض کم است.

نمونه سوم نیز از لحاظ تمامی پارامترهای هندسی و مقاومتی مانند نمونه شاهد بوده، با این تفاوت که در آن به جای میلگردهای فولادی از خاموت‌های GFRP استفاده شده است. پس از انجام عملیات قبل از آزمایش برای نمونه سوم و قراردادن تیر مذکور بر روی ست‌آپ، بارگذاری با نرخ 700 کیلوگرم بر دقیقه به تیر اعمال شد. مطابق با شکل (۷) نتایج حاصل از منحنی P-Delta تیر نمونه سوم نشان‌دهنده خطی بودن این نمودار تا بار $4/7$ تن می‌باشد که این میزان بار، خیز $8/5$ میلی‌متری را برای تیر به دنبال داشت. تا این لحظه می‌توان دریافت که محدوده بارگذاری و تغییر مکان خطی نمونه سوم نسبت به نمونه دوم افزایش پیدا کرده است. پس از این مرحله، شاهد کاهش ظرفیت بارپذیری تیر همراه با شنیده شدن صدای مهیب دو ترک در آن بودیم به گونه‌ای که منحنی بار از $4/7$ تن به حدود $3/3$ تن رسید و خیز تیر تا حدود 10 میلی‌متر افزایش یافت.

سپس تیر دوباره شروع به مقاومت کرد و این بار تا رسیدن به بار $8/35$ تن در جابه‌جایی 31 میلی‌متری به صورت یک‌نواخت و منظم حرکت کرد و پس از آن با وقوع ترک سوم و گسترش دو ترک اول، منحنی بارگذاری به $4/4$ تن در جابه‌جایی 33 میلی‌متری کاهش پیدا کرد. پس از این مرحله منحنی بار-تغییر مکان دوباره شروع به مقاومت کرد و چهار بار روند افزایش



شکل ۷ منحنی بار تغییر مکان نمونه سوم در اثر بارگذاری



شکل ۸ مقایسه منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده (دوم و سوم) در اثر بارگذاری

نتیجه‌گیری

۱. استفاده از میلگردهای GFRP به جای میلگردهای فولادی باعث کاهش ظرفیت خمشی ۵۵ درصدی تیر بتنی می‌شود.
۲. کاهش ظرفیت خمشی تیر بتنی در نتیجه استفاده از میلگردهای GFRP به جای میلگردهای فولادی را می‌توان با افزایش قطر

با مطالعه و جمع‌بندی نمودارهای حاصل از آزمایش بار- تغییر مکان سه تیر بتنی می‌توان نکات استخراج شده را به صورت زیر خلاصه کرد:

۳. استفاده از خاموت‌های GFRP به جای خاموت‌های فولادی باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش شکل پذیری تا یک سوم در تیرهای بتنی می‌شود.
۴. برای افزایش شکل پذیری در تیرهای بتنی که در آن‌ها از خاموت‌های GFRP استفاده شده است می‌توان فاصله خاموت‌ها را تا سه برابر بیشتر کرد و هم‌زمان از الیاف CFRP در زیر ناحیه کششی تیر و به صورت غلاف دور تیر بتنی استفاده کرد.

مراجع

1. Najafi Moghaddam Gilani, V., Hosseinian, S. M., & Nikookar, M., "Presentation of a New Deicer with the Least Moisture and Fatigue Failures in Asphalt Mixtures", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 46, No.11, pp. 10457-10471, (2021).
2. Adeli, S., Salehfard, R., & Amini, B., "The Influence of Asphalt Mixture Components on Pavement Skid Resistance and Accident Rate in Urban Un-Signalized Intersections", *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 1-11. (2021).
3. Gilani, V. N. M., Hosseinian, S. M., Hamed, G. H., & Safari, D., "Presentation of Predictive Models for Two-Objective Optimization of Moisture and Fatigue Damages Caused by Deicers in Asphalt Mixtures", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 49, No. 6, pp. 31-53, (2021).
4. Nikookar, M., Bagheri Movahhed, M., Ayoubinejad, J., Najafi Moghaddam Gilani, V., & Hosseinian, S. M., "Improving the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures by Simultaneous Modification of Asphalt Binder and Aggregates with Carbon Nanofiber and Carbon Nanotube", *Advances in Civil Engineering*, Vol 2021. pp.1-11 (2021).
5. Hamed, G. H., Esmaeeli, M. R., Najafi Moghaddam Gilani, V., & Hosseinian, S. M., "The Effect of Aggregate-Forming Minerals on Thermodynamic Parameters Using Surface Free Energy Concept and Its Relationship with the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures", *Advances in Civil Engineering*, Vol 2021, pp.1-15, (2021).
6. Jabbar, S. A., & Farid, S. B., "Replacement of Steel Rebars by GFRP Rebars in the Concrete Structures", *Karbala international journal of modern science*, Vol. 4, No. 2, pp. 216-227, (2018).
7. Sun, Z., Fu, L., Feng, D. C., Vatuloka, A. R., Wei, Y., & Wu, G., "Experimental Study on the Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Bundled Hybrid Steel/FRP Bars", *Engineering Structures*, Vol. 197, pp. 109443, (2019).
8. Hamad, R. J., Haddad, R. H., & Johari, M. M., "New Anchorage System of Bars to Improve the Mechanical Performance of Post-Heated FRP-Reinforced Concrete Beams", *Construction and Building Materials*, Vol. 229, pp. 117090, (2019).
9. Ahmed, H. Q., Jaf, D. K., & Yaseen, S. A., "Flexural Strength and Failure of Geopolymer Concrete Beams Reinforced with Carbon Fibre-Reinforced Polymer Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 231, pp. 117185, (2020).
10. Shen, D., Li, C., Feng, Z., Wen, C., & Ojha, B., "Influence of Strain Rate on Bond Behavior of Concrete Members Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Rebars", *Construction and Building Materials*, Vol. 228, pp. 116755, (2019).
11. Jawad, F., Adarsha, C. Y., Raghavendra, T., Udayashankar, B. C., & Natarajan, K., "Structural Behavior of Concrete

- Beams and Columns Reinforced with Waste Plastic Incorporated GFRP (WPGFRP) Rebars", *Journal of Building Engineering*, Vol. 23, No. , pp. 172-184, (2019).
12. Dong, Z., Wu, G., Zhao, X. L., Zhu, H., & Shao, X., "Behaviors of Hybrid Beams Composed of Seawater Sea-Sand Concrete (SWSSC) and a Prefabricated UHPC Shell Reinforced with FRP Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 213, pp. 32-42, (2019).
 13. Jumaa, G. B., & Yousif, A. R., "Size Effect on the Shear Failure of High-Strength Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP Bars and Stirrups", *Construction and Building Materials*, Vol. 209, pp. 77-94, (2019).
 14. D'Antino, T., & Pisani, M. A., "Long-Term Behavior of GFRP Reinforcing Bars", *Composite Structures*, Vol. 227, pp. 111283, (2019).
 15. Sadraie, H., Khaloo, A., & Soltani, H., "Dynamic Performance of Concrete Slabs Reinforced with Steel and GFRP Bars under Impact Loading", *Engineering Structures*, Vol. 191, pp. 62-81, (2019).
 16. Zinkaah, O. H., Ashour, A., & Sheehan, T., "Experimental Tests of Two-Span Continuous Concrete Deep Beams Reinforced with GFRP Bars and Strut-and-Tie Method Evaluation", *Composite Structures*, Vol. 216, pp. 112-126, (2019).
 17. Saleh, N., Ashour, A., & Sheehan, T., "Bond between Glass Fibre Reinforced Polymer Bars and High-Strength Concrete", In *Structures*, Vol. 22, pp. 139-153, Elsevier, (2019, December).
 18. Chen, C. C., & Li, C. Y., "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Laminates", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 535, (2005).
 19. Xue, W., Zheng, Q., Yang, Y., & Fang, Z., "Bond Behavior of Sand-Coated Deformed Glass Fiber Reinforced Polymer Rebars", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 10, pp. 895-910, (2014).
 20. Liu, Y., Zhang, H. T., Tafsirojjaman, T., Dogar, A. U. R., AlAjarmeh, O., Yue, Q. R., & Manalo, A., "A Novel Technique to Improve the Compressive Strength and Ductility of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite Bars", *Construction and Building Materials*, Vol. 326, pp. 126782, (2022).