

Flexural Strengthening of RC Beams Using Wollastonite-Containing High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite Sheets: Experimental and Numerical Investigation

Reza Khaleghi * 

Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT: Strengthening and rehabilitation of reinforced concrete (RC) beams are essential for extending service life and improving structural performance under increased loading demands, deterioration, and design deficiencies. Although externally bonded fiber-reinforced polymer (FRP) systems have been widely used for flexural strengthening, their application is often associated with brittle failure modes, bond-interface sensitivity, and durability concerns under severe environmental conditions. This study proposes an alternative strengthening system based on high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) sheets containing wollastonite powder and reinforced with GFRP bars. The research consisted of material development, experimental characterization, and numerical investigation. Different wollastonite replacement ratios were considered to identify the optimum mixture. The mechanical behavior of the selected HPFRCC was then evaluated through tensile and flexural tests. A finite element model was developed in ABAQUS and validated against experimental results. After validation, a parametric study was conducted to assess the influence of sheet thickness and GFRP reinforcement arrangement on the flexural response of strengthened beams. The results showed that the mixture containing 20% wollastonite provided the best overall performance due to improved matrix densification and fiber-matrix interaction. The proposed strengthening system significantly enhanced both load-carrying capacity and energy absorption. The maximum load increased from 120.05 kN for the control beam to 267.41 kN for the strengthened specimen, while energy absorption increased from 1479.35 J to 2921.84 J. The numerical results also showed that increasing sheet thickness and reinforcement ratio generally improved structural performance, although the efficiency gain became less pronounced at higher reinforcement levels. The proposed system can therefore be considered a compatible and effective cement-based alternative for flexural strengthening of RC beams.

Review History:

Received: Mar. 11, 2026
Revised: Jul. 01, 2026
Accepted: Jul. 14, 2026
Available Online: Jul. 17, 2026

Keywords:

HPFRCC
Wollastonite Powder
RC Beams
Flexural Strengthening
Finite Element Modeling

1- Introduction

Reinforced concrete beams often require strengthening because of increased service loads, changes in structural use, aging, construction defects, or environmental deterioration [1]. In recent decades, FRP-based strengthening systems have been widely adopted as an efficient solution for upgrading RC beams because of their high strength-to-weight ratio and ease of installation [2]. However, the relatively brittle behavior of these materials, the sensitivity of adhesive bonding, and their reduced performance under severe temperature or moisture exposure have limited their long-term reliability. Consequently, the use of advanced cementitious composite materials has attracted increasing attention [3].

Among these materials, HPFRCC has emerged as a promising option because of its strain-hardening response, multiple microcracking behavior, and improved

compatibility with concrete substrates [4]. Previous studies have demonstrated the potential of cement-based and fiber-reinforced composite laminates for strengthening RC members under flexural loading [5,6]. Nevertheless, limited research has addressed the structural application of wollastonite-containing HPFRCC sheets combined with GFRP bars as a hybrid strengthening system for RC beams.

Wollastonite, owing to its acicular microstructure and beneficial physicochemical interaction with cementitious matrices, can improve packing density, crack resistance, and fiber-bridging efficiency. The present study aims to develop an HPFRCC sheet containing wollastonite powder and to evaluate its effectiveness for flexural strengthening of RC beams through experimental and numerical investigations. The main contribution of this research is the introduction and assessment of a hybrid cement-based strengthening system

*Corresponding author's email: re.khaleghi@iau.ac.ir

that combines a wollastonite-modified HPFRCC matrix with GFRP bar reinforcement, together with a validated finite element framework for predicting its structural behavior.

2- Methodology

The study was carried out in three main stages: material design, experimental characterization, and numerical simulation. First, several HPFRCC mixtures were prepared using Type II Portland cement, silica fume, silica sand, quartz powder, superplasticizer, and hybrid fibers consisting of micro-steel fibers and PVA fibers. Wollastonite powder was introduced as a partial replacement for cement at different ratios to identify the optimum mixture.

The mechanical properties of the developed material were then evaluated experimentally. Direct tensile tests were performed on dog-bone specimens to assess tensile strength, strain-hardening behavior, and cracking response in accordance with JSCE recommendations [7]. Four-point bending tests were also conducted to examine the flexural behavior of the selected composite mixture. Based on the experimental results, the optimum mixture was adopted for the strengthening layer.

In the numerical phase, finite element models of the control and strengthened beams were developed in ABAQUS using the Concrete Damaged Plasticity model for concrete [8]. The constitutive relationships were defined using established stress-strain models for concrete in compression and tension [9,10]. After calibration and validation against the experimental response of the reference beam, the numerical model was employed for a parametric study. The investigated parameters included HPFRCC sheet thickness and the number and diameter of embedded GFRP bars.

3- Results and Discussion

The experimental investigation showed that incorporating wollastonite powder improved the microstructural quality and mechanical performance of the HPFRCC matrix, with the 20% replacement level providing the most favorable overall response. This mixture exhibited improved tensile behavior and crack distribution compared with the other mixtures, indicating more effective fiber-matrix interaction and improved internal stress transfer.

Figure 1 presents the proposed strengthening configuration, including the RC beam, the HPFRCC sheet, the embedded GFRP bars, and the loading arrangement. This figure is the most suitable choice for the extended abstract because it clearly illustrates the strengthening concept and test configuration in a compact format.

The validated numerical model predicted the control beam behavior with good accuracy, with a peak-load error of about 2.8%, indicating acceptable agreement with the experimental results. The parametric study showed that the proposed strengthening technique significantly enhanced flexural performance; increasing sheet thickness improved stiffness, delayed crack propagation, and raised ultimate load, while increasing the diameter and number of GFRP bars improved load-carrying capacity and energy absorption,

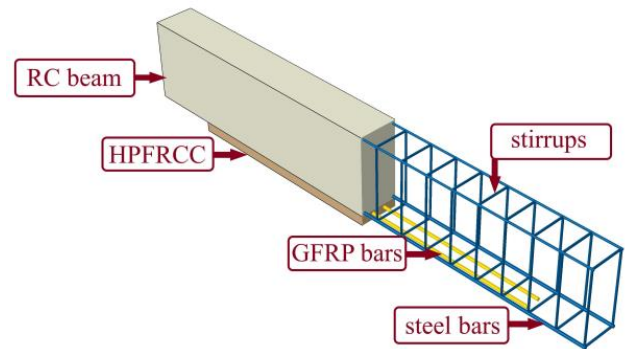


Fig. 1. Strengthened RC beam configuration with HPFRCC sheet and embedded GFRP bars.

though with diminishing gains at higher reinforcement levels. Table 1 provides a concise summary of these key structural results and clearly demonstrates the overall effectiveness of the strengthening system.

Compared with the control beam, the strengthened configuration increased the load-carrying capacity by more than 120% and nearly doubled the absorbed energy. These findings indicate that the proposed hybrid HPFRCC-GFRP strengthening layer provides not only higher strength but also improved deformability and post-cracking performance. From a practical point of view, the use of a cement-based strengthening layer may also offer better compatibility with the concrete substrate than conventional bonded FRP systems

4- Conclusions

Based on the experimental and numerical results, the following conclusions can be drawn:

- The HPFRCC mixture containing 20% wollastonite powder as a partial cement replacement exhibited the best overall mechanical performance among the investigated mixtures.
- The developed finite element model predicted the flexural response of the control and strengthened beams with acceptable accuracy, with a peak-load error of about 2.8% for the reference beam.
- The proposed HPFRCC-GFRP strengthening system significantly improved the structural behavior of RC beams, increasing the maximum load from 120.05 kN to 267.41 kN and the energy absorption from 1479.35 J to 2921.84 J.
- Increasing the thickness of the strengthening sheet and the amount of GFRP reinforcement generally improved beam performance; however, the efficiency of additional reinforcement decreased at higher reinforcement levels.
- The proposed cement-based hybrid strengthening technique can be considered a durable and compatible alternative to conventional FRP-based systems for the flexural rehabilitation of RC beams.

Table 1. Summary of key structural performance results.

Specimen	Peak Load (kN)	Energy Absorption (J)
Control beam	120.05	1479.35
Strengthened beam	267.41	2921.84

References

- [1] I. Khan, Strengthening of reinforced concrete structures using FRP composites: A state-of-the-art review, *Composite Structures*, 92(12) (2010) 2793–2815.
- [2] A. Shaikh, L.J. Butler, Self-sensing fabric reinforced cementitious matrix systems for combined strengthening and monitoring of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 331 (2022) 127243.
- [3] J.A. Barros, A. Fortes, Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits, *Cement and Concrete Composites*, 27(4) (2005) 471-480.
- [4] V.C. Li, H.-C. Wu, Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, *Applied Mechanics Reviews*, 45(8) (1992) 390-398.
- [5] H. Tanarslan, Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates, *Engineering Structures*, 151 (2017) 337-348.
- [6] M. Hussein, M. Kunieda, H. Nakamura, Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 34(9) (2012) 1061-1066.
- [7] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPRCC), in, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 2008, pp. 16.
- [8] R. Hawileh, H. Musto, J. Abdalla, M. Naser, Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 173 (2019) 106952.
- [9] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 3(5) (1973) 583-599.
- [10] A. Belarbi, & Hsu, T. T. C, Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete., *Aci Structural Journal*, 91 (1994) 465 - 474.



تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با ورقه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی ولاستونیت: مطالعه آزمایشگاهی و عددی

رضا خالقی* 

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶

کلمات کلیدی:

کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند

پودر ولاستونیت

تیر بتن آرمه

تقویت خمشی

تحلیل عددی

خلاصه: در این پژوهش، یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی پودر ولاستونیت به منظور تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه توسعه یافته است. با وجود پیشرفت‌های اخیر در به کارگیری مواد معدنی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مکانیسم دقیق هم‌افزایی فیزیکی-شیمیایی ولاستونیت و نقش آن در بهبود ناحیه انتقالی فصل مشترک میان الیاف و ماتریس در ورقه‌های تقویت‌کننده، همچنان به عنوان یک خلأ پژوهشی مطرح است. بدین منظور، تأثیر جایگزینی صفر تا ۲۰ درصدی ولاستونیت بر رفتار مکانیکی کامپوزیت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که نسبت جایگزینی بهینه ۲۰ درصد، به دلیل ساختار سوزنی شکل ولاستونیت و نقش آن در بهبود ریزساختار ماتریس، رفتار شبه کرنش سخت‌شوندگی مطلوبی را نشان می‌دهد. نوآوری اصلی این مطالعه، علاوه بر تبیین مکانیسم میکروساختاری ولاستونیت در بهبود یکپارچگی ماتریس سیمانی، ارائه یک مدل عددی معتبر جهت پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای تقویت‌شده با این ورقه‌ها و میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه است. مطالعات پارامتریک انجام‌شده نشان داد که افزایش ضخامت ورقه تقویتی و نیز افزایش قطر و تعداد میلگردهای پلیمری، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد خمشی سیستم تقویت‌شده دارند. در نهایت، اعمال این سیستم تقویتی موجب ارتقای چشمگیر ظرفیت باربری تیرها از ۱۲۰/۰۵ به ۲۶۷/۴۱ کیلونیوتن و افزایش ظرفیت جذب انرژی از ۱۴۷۹/۳۵ به ۲۹۲۱/۸۴ ژول شد که گویای پتانسیل بالای این کامپوزیت به عنوان یک راهکار کارآمد، پایدار و نوین در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی است.

۱- مقدمه

پلیمری مسلح به الیاف به عنوان روشی کارآمد برای بهسازی تیرهای بتن آرمه گسترش یافته است. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ورقه‌ها و لمینیت‌های FRP، به ویژه انواع CFRP و GFRP، قادرند ظرفیت باربری و سختی خمشی تیرها را به طور قابل توجهی افزایش دهند [۲]. با این حال، رفتار نسبتاً ترد این مصالح، حساسیت اتصال چسبی و افت عملکرد در شرایط دمایی یا رطوبتی بالا، از جمله محدودیت‌های این سیستم‌ها محسوب می‌شود. به همین دلیل، در سال‌های اخیر گرایش به استفاده از مصالح مرکب سیمانی پیشرفته افزایش یافته است [۳].

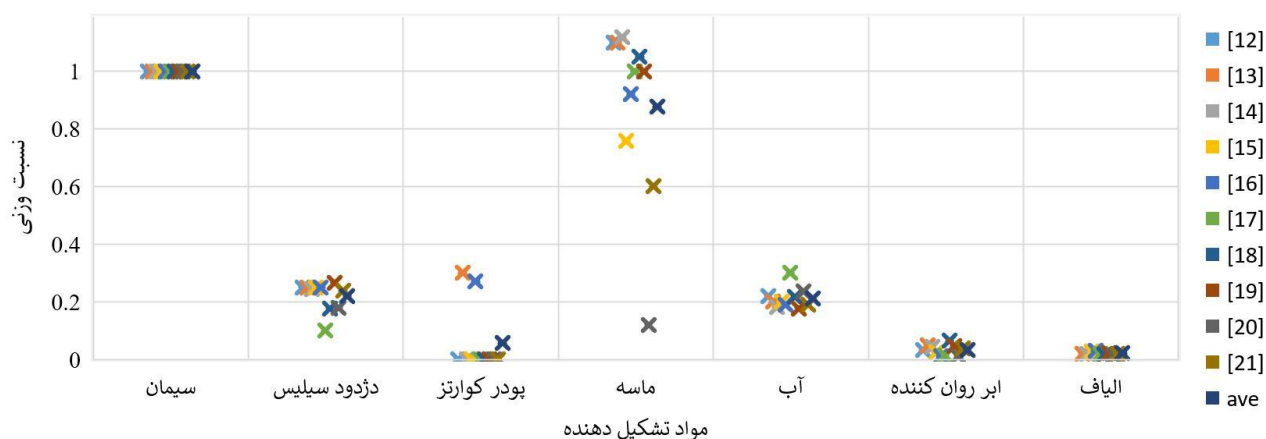
در این میان، کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند HPFRCC به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای جایگزینی یا تکمیل سیستم‌های پلیمری مطرح شده‌اند. این مصالح به دلیل توانایی ایجاد ریزترک‌های متعدد، رفتار کششی کرنش‌سخت‌شونده و ظرفیت جذب انرژی بالا شناخته می‌شوند [۴]. نتایج

تیرهای بتن آرمه از مهم‌ترین اعضای باربر در سازه‌های بتنی به شمار می‌آیند و نقش اساسی در انتقال بارهای ثقلی و جانبی ایفا می‌کنند. با این حال، بتن به دلیل مقاومت کششی پایین و کرنش نهایی محدود، مستعد ترک‌خوردگی است و این مسئله می‌تواند در طول دوره بهره‌برداری بر دوام و عملکرد سازه تأثیر منفی بگذارد. عواملی نظیر افزایش بارهای بهره‌برداری، تغییر کاربری سازه، خطاهای طراحی و نیز شرایط محیطی نامساعد از جمله سیکل‌های یخ‌زدگی و ذوب یا پدیده خوردگی، می‌توانند موجب کاهش مقاومت و سختی تیرهای بتن آرمه شوند [۱]. از این رو، توسعه روش‌های مؤثر برای افزایش ظرفیت خمشی و بهبود دوام این اعضا همواره مورد توجه مهندسان سازه بوده است.

در دهه‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های تقویتی مبتنی بر کامپوزیت‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: re.khaleghi@iau.ac.ir





شکل ۱. درصد اجزای HPFRCC بر اساس مطالعات پیشین و میانگین مقادیر گزارش شده.

Fig. 1. Proportions of HPFRCC constituents based on previous studies and the average of reported values.

پایرجاست.

همزمان، میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه GFRP به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن کم و مدول الاستیسیته مناسب، به عنوان جایگزینی مطلوب برای میلگردهای فولادی در محیطهای خورنده مطرح شده‌اند [۱۰]. هرچند رفتار الاستیک خطی و گسیختگی ترد این میلگردها مستلزم ملاحظات ویژه در طراحی است، نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که ترکیب این آرماتورها با سیستم‌های سیمانی می‌تواند به افزایش دوام و پایداری سازه‌ها منجر شود. ترکیب HPFRCC و میلگردهای GFRP در قالب ورقه‌های تقویتی پیش‌ساخته، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود عملکرد تیرهای بتن‌آرمه دارد. با این حال، مطالعات انجام‌شده در این زمینه محدود بوده و اغلب بر بررسی HPFRCC یا آرماتورهای کامپوزیتی به صورت مجزا تمرکز داشته‌اند [۱۱]. از این‌رو، بررسی همزمان اثر ضخامت ورقه‌های HPFRCC و ویژگی‌های میلگردهای GFRP شامل تعداد و قطر آن‌ها بر رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه، می‌تواند بخشی از این خلأ پژوهشی را پوشش دهد.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر مطالعه عددی رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP است. در گام نخست، مدل عددی تیر مرجع بر اساس داده‌های آزمایشگاهی توسعه یافت و صحت آن ارزیابی شد. سپس تحلیل پارامتریک در نرم‌افزار Abaqus به منظور بررسی اثر پارامترهایی نظیر ضخامت ورقه و تعداد و قطر میلگردهای GFRP بر ظرفیت باربری و ظرفیت جذب انرژی تیرها انجام

مطالعات آزمایشگاهی متعدد نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌ها یا ژاکت‌های HPFRCC می‌تواند موجب افزایش مقاومت خمشی، بهبود شکل‌پذیری، کاهش گسیختگی ترد و ارتقای دوام اعضای بتن‌آرمه شود [۵، ۶].

در سال‌های اخیر، استفاده از لایه‌ها و ورقه‌های کامپوزیت سیمانی به عنوان روشی کارآمد برای تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، سان کوانشننگ و ژانگ ککسین (۲۰۱۶) با اجرای یک لایه ملات کامپوزیت سیمانی به ضخامت ۶۰ میلی‌متر در ناحیه کششی تیر T شکل پل بتنی یون‌لینگ در شهر هاربین چین، به بهبود عملکرد خمشی این عضو سازه‌ای دست یافتند [۷]. همچنین بی‌طرف، خیرالدین و شربتدار (۱۴۰۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد خمشی تیرهای سراسری بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های پیش‌ساخته کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند را بررسی کردند [۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ورقه‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی موجب افزایش ظرفیت باربری تیرها می‌شود و کاشت میلگرد فولادی درون ورقه، ضمن تقویت ظرفیت خمشی، از کاهش قابل ملاحظه شکل‌پذیری جلوگیری می‌کند. افزون بر این، احسانی، شربتدار و خیرالدین (۲۰۲۲) به تقویت درجا تیرهای سراسری دوده‌دانه با استفاده از HPFRCC و میلگرد فولادی پرداختند [۹]. با وجود آنکه در تمامی پژوهش‌های یادشده هدف اصلی، بهبود رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه از طریق افزودن لایه یا ورقه‌های کامپوزیت سیمانی بوده است، بررسی مستقل رفتار خمشی ورقه‌های ملات کامپوزیتی پیش از نصب بر روی تیر به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته و این خلأ پژوهشی همچنان

جدول ۱. طرح اختلاط (درصد).

Table 1. Mix proportions (%).

نام ترکیب	سیمان پرتلند	ولاستونیت	دژدود سیلیس	پودر کوارتز	ماسه	آب	ابروانکننده
W0	۱	۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W5	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W10	۰/۹	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W15	۰/۸۵	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W20	۰/۸	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳

شد. نتایج این تحلیل می‌تواند در طراحی بهینه سیستم‌های تقویتی ترکیبی HPFRCC و GFRP برای افزایش دوام و بهبود عملکرد سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش انجام پژوهش

فرآیند اجرای این پژوهش و ارائه نتایج آن در سه مرحله اصلی سازمان‌دهی شد. در مرحله نخست، کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی پودر ولاستونیت ساخته شد و ویژگی‌های مکانیکی آن از طریق یک برنامه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، رفتار فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ساخته‌شده ارزیابی شد. همچنین به منظور درک دقیق‌تر رفتار خمشی این کامپوزیت، یک مدل عددی توسعه داده شد و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا دقت و اعتبار مدل مورد سنجش قرار گیرد.

در مرحله دوم، به منظور ارزیابی قابلیت مدل‌سازی عددی در تحلیل رفتار تیرهای بتن‌آرمه، یک نمونه تیر که نتایج آزمایشگاهی آن در مطالعات پیشین گزارش شده بود، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus شبیه‌سازی شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های آزمایشگاهی متناظر مقایسه شد تا توانایی مدل در بازتولید رفتار خمشی تیر مورد ارزیابی قرار گیرد.

در مرحله سوم، با بهره‌گیری از مدل عددی اعتبارسنجی‌شده، رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت‌شده مورد مطالعه قرار گرفت. در این مرحله، تقویت خمشی از طریق نصب ورقه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی در ناحیه کششی تیرها اعمال شد. همچنین تأثیر استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه با قطرهای مختلف در این ورقه‌های کامپوزیتی بر عملکرد خمشی تیرهای تقویت‌شده به صورت عددی بررسی و تحلیل شد.

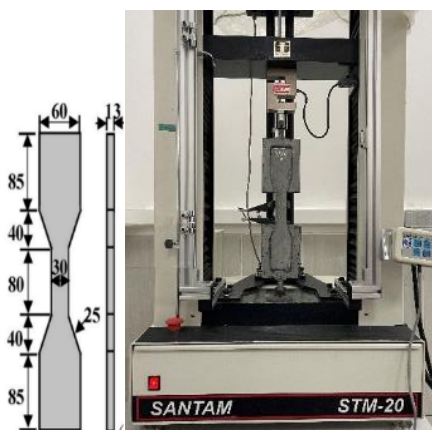
۲-۱- مطالعه آزمایشگاهی HPFRCC

۲-۱-۱- روش ساخت

طرح اختلاط پایه کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) بر پایه بررسی مطالعات پیشین تدوین شد. در این راستا، با تحلیل میانگین مقادیر گزارش‌شده در پژوهش‌های اخیر [۱۲-۲۱]، ترکیب اولیه انتخاب گردید (شکل ۱). در این طرح از سیمان پرتلند نوع ۲ با حداقل مقاومت فشاری ۴۲/۵ مگاپاسکال استفاده شد. برای بهبود مقاومت مکانیکی، افزایش تراکم خمیر و ارتقای کارایی رئولوژیکی، دوده سیلیسی با وزن مخصوص ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب به مخلوط افزوده گردید.

به‌منظور تأمین مقاومت فشاری و افزایش چسبندگی میان اجزای ماتریس، ماسه سیلیسی (با دانه‌بندی ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر) و پودر کوارتز نیز به کار رفت. این مواد نقش مؤثری در ارتقای عملکرد مکانیکی و دوام کامپوزیت دارند. در گام بعد، پودر ولاستونیت به‌عنوان یک ماده معدنی طبیعی از خانواده سیلیکات‌های کلسیم با ساختار بلوری سوزنی‌شکل به مخلوط اضافه شد. سطح ویژه بالای این ماده و ساختار سوزنی آن، نقش مؤثری در افزایش تراکم خمیر سیمانی، بهبود کارایی و ایجاد قابلیت پل‌زنی در ریزترک‌ها ایفا می‌کند. جهت ارزیابی، نسبت‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با پودر ولاستونیت بررسی شد. ترکیب دقیق اجزای طرح اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، سیستم الیافی کامپوزیت بر اساس مقادیر بهینه در مطالعات معتبر (شکل ۱) طراحی و مقدار کل الیاف ۲/۳ درصد حجمی تعیین شد. برای دستیابی به توازن مطلوب میان مقاومت و شکل‌پذیری، ترکیبی از الیاف فولادی میکرو و الیاف پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به کار رفت. نسبت حجمی الیاف فولادی میکرو ۱/۸ درصد و الیاف PVA ۰/۵ درصد در نظر گرفته شد. الیاف فولادی دارای طول ۱۶ میلی‌متر و قطر ۰/۲۵



شکل ۳. تجهیزات آزمایش و ابعاد نمونه کششی دمبلی شکل (میلی متر).

Fig. 3. Test setup and dimensions of the dumbbell-shaped tensile specimen (mm).

در نظر گرفته شد. برای اندازه گیری دقیق تغییر طول در ناحیه مؤثر، یک اکسنسومتر با طول گیج ۸۰ میلی متر در بخش میانی نمونه نصب گردید. برای بررسی رفتار خمشی، که به عنوان شکلی از آزمون کشش غیرمستقیم نیز شناخته می شود [۲۳]. آزمایش خمش بر روی نمونه هایی با سه مجموعه ابعاد مختلف شامل $50 \times 125 \times 25$ و $150 \times 150 \times 25$ میلی متر انجام شد. آزمایش خمش چهارنقطه ای برای نمونه های با ابعاد $50 \times 125 \times 25$ میلی متر مطابق با مراجع [۲۴، ۲۵] اجرا گردید. در این آزمایش، فاصله دهانه برابر با ۳۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد و دهانه به سه بخش مساوی تقسیم گردید. برای تأمین شرایط تکیه گاهی صلب، از یک ورق فولادی با ضخامت ۲۰ میلی متر به عنوان بستر استفاده شد. جابجایی در وسط دهانه با استفاده از یک مبدل جابجایی خطی (LVDT) اندازه گیری شد و بارگذاری با نرخ 0.5 میلی متر بر دقیقه و مطابق با مطالعات پیشین [۱۵، ۲۴، ۲۶، ۲۷] اعمال گردید.

برای بررسی عملکرد ترکیبی HPFRCC به همراه میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP)، آزمایش خمش چهارنقطه ای بر روی ورقه های پیش ساخته در مقیاس واقعی با ابعاد $150 \times 150 \times 25$ میلی متر انجام شد. در این مرحله، فاصله بین تکیه گاه ها برابر با 1300 میلی متر در نظر گرفته شد. اندازه گیری نیرو و جابجایی به ترتیب با استفاده از نیروسنج و یک LVDT نصب شده در مرکز دهانه صورت گرفت. اعمال بار توسط یک پنوماتیکی با کنترل بار انجام شد؛ در نتیجه امکان کنترل مستقیم نرخ جابجایی وجود نداشت و بارگذاری با نرخ ثابت 0.25 نیوتن بر ثانیه اعمال



شکل ۲. شکل ظاهری الیاف پلی وینیل الکل و میکرو فولادی.

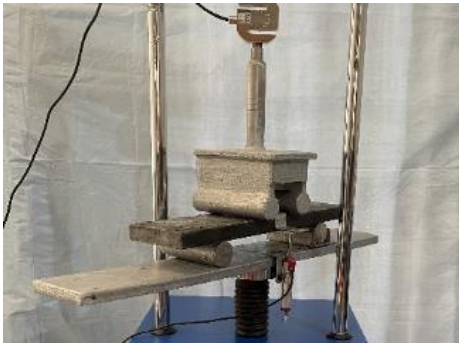
Fig. 2. Appearance of polyvinyl alcohol and micro-steel fibers.

میلی متر هستند. مشخصات مکانیکی این الیاف شامل مقاومت کششی 2720 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته 210 گیگاپاسکال و چگالی $7/85$ گرم بر سانتی متر مکعب است.

الیاف PVA به کاررفته دارای طول 12 میلی متر، قطر 0.15 میلی متر، مقاومت کششی 1250 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته 33 گیگاپاسکال و چگالی $1/18$ گرم بر سانتی متر مکعب هستند. همچنین، به منظور تقویت عملکرد خمشی ورقه های کامپوزیتی، از میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه (GFRP) در ساخت نمونه ها استفاده شد. این میلگردها دارای مقاومت کششی 800 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته 40 گیگاپاسکال و چگالی $1/8$ گرم بر سانتی متر مکعب هستند. استفاده از این میلگردها نقش مؤثری در افزایش سختی خمشی و کنترل گسیختگی ترد ورقه های کامپوزیتی دارد. تصاویر الیاف در شکل ۲ ارائه شده اند.

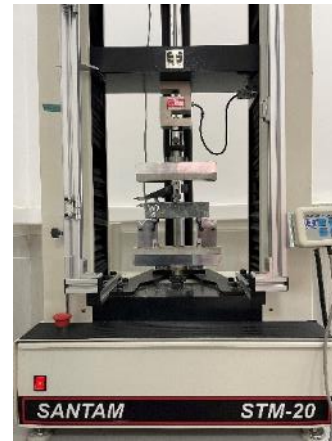
۲-۱-۲ روش انجام آزمایش

برای ارزیابی رفتار کششی HPFRCC، آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه های دمبلی شکل انجام شد. ساخت نمونه ها و روش اجرای آزمایش مطابق با دستورالعمل پیشنهادی انجمن مهندسين عمران ژاپن (JSCE 2008) انجام گرفت [۲۲]. به منظور اعمال یکنواخت بار کششی، فک های فولادی متناسب با هندسه نمونه ها طراحی و ساخته شد. آزمایش ها با استفاده از دستگاه یونیورسال سرووالکتریکال با ظرفیت 20 کیلونیوتن انجام گردید (شکل ۳). نرخ جابجایی اعمال شده برابر با 0.5 میلی متر بر دقیقه



شکل ۵. تجهیزات و نحوه بارگذاری خمشی نمونه $25 \times 125 \times 500$ میلی‌متر.

Fig. 5. Test setup and flexural loading configuration of the $25 \times 125 \times 500$ mm specimen.



شکل ۴. تجهیزات آزمایش و ابعاد نمونه خمشی $160 \times 40 \times 40$ (میلی‌متر).

Fig. 4. Test setup and dimensions of the $160 \times 40 \times 40$ mm flexural specimen.



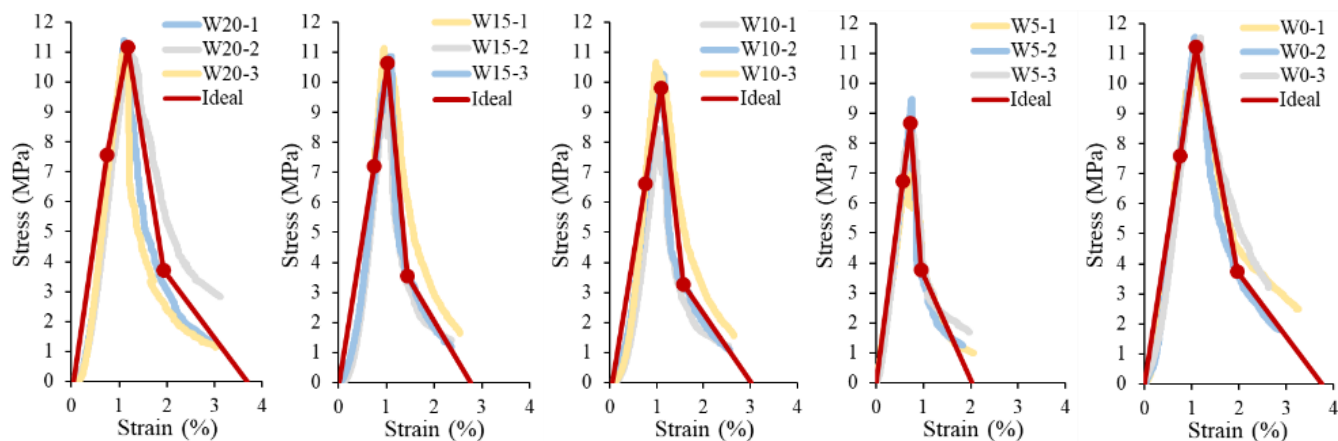
شکل ۶. تجهیزات و نحوه بارگذاری خمشی نمونه $25 \times 125 \times 500$ میلی‌متر.

Fig. 6. Test setup and flexural loading configuration of the $25 \times 125 \times 500$ mm specimen.

۲-۱-۳- بررسی نتایج

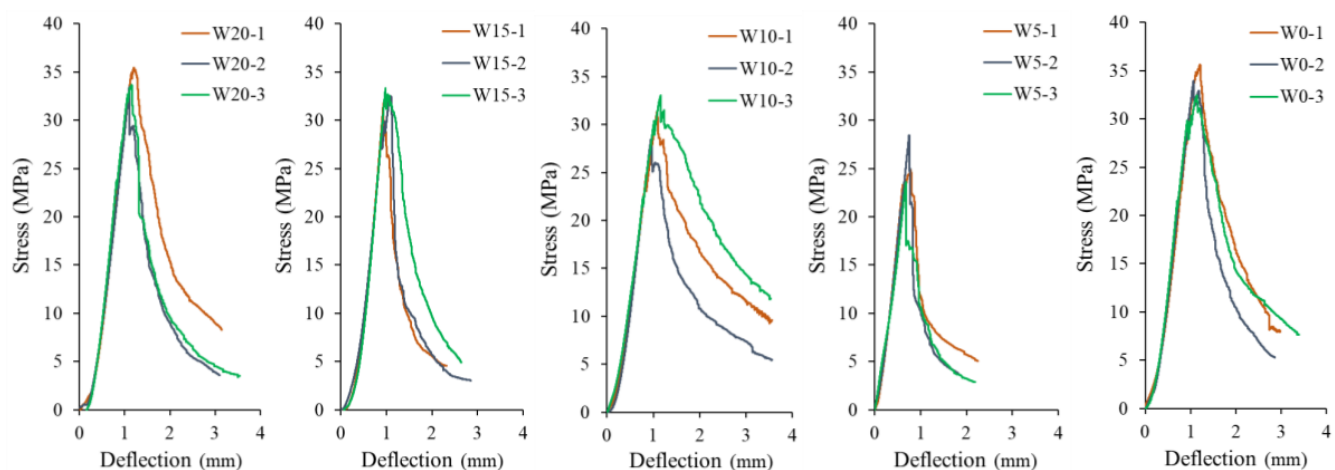
مطابق مراجع [۲۹-۳۳] سه نمونه دمبلی‌شکل از هر طرح اختلاط تحت آزمون کشش مستقیم قرار گرفتند. منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در کنار منحنی ایده‌آل هر نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. تعیین منحنی ایده‌آل رفتار کششی از اهمیت ویژه‌ای در مدل‌سازی عددی ورقه‌های کامپوزیت سیمانی برخوردار است. نتایج بیانگر آن است که طرح اختلاط فاقد ولاستونیت (W0) و طرح اختلاط حاوی ۲۰ درصد

گردید. آرایش تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش‌های خمشی در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. در نهایت، به‌منظور تعیین مقاومت فشاری کامپوزیت HPFRCC، پنج نمونه مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شدند. این آزمایش مطابق با دستورالعمل انجمن مهندسين عمران ژاپن (JSCE) [۲۲] و استاندارد BSI BS EN 12390 [۲۸] انجام گرفت. آزمایش فشاری با استفاده از دستگاه بتن‌شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن اجرا شد که به یک LVDT برای ثبت جابجایی مجهز بود.



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش آزمون‌های دمبلی شکل تحت کشش مستقیم به همراه منحنی ایده‌آل برای پنج ترکیب.

Fig. 7. Stress-strain curves of the dumbbell-shaped specimens under direct tension, together with the idealized curve, for the five mixtures.



شکل ۸. نمودار تنش-تغییر مکان آزمون‌های منشوری ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر تحت خمش برای درصدهای مختلف جایگزینی ولاستونیت.

Fig. 8. Stress-displacement curves of the 160 × 40 × 40 mm prismatic specimens under flexure for different wola-tonite replacement ratios.

دارد. همچنین، تطابق قابل توجه بین نتایج نمونه‌های W0 و W20 نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۰ درصد ولاستونیت به جای سیمان، مناسب‌ترین ترکیب را برای دستیابی به عملکرد مکانیکی مطلوب فراهم می‌کند.

بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش مستقیم نمونه‌های دمبلی‌شکل و نیز آزمون خمش نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که بهترین عملکرد مکانیکی مربوط به جایگزینی ۲۰ درصد ولاستونیت است. بر این اساس، در ادامه پژوهش تنها ترکیب W20 مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمون خمش

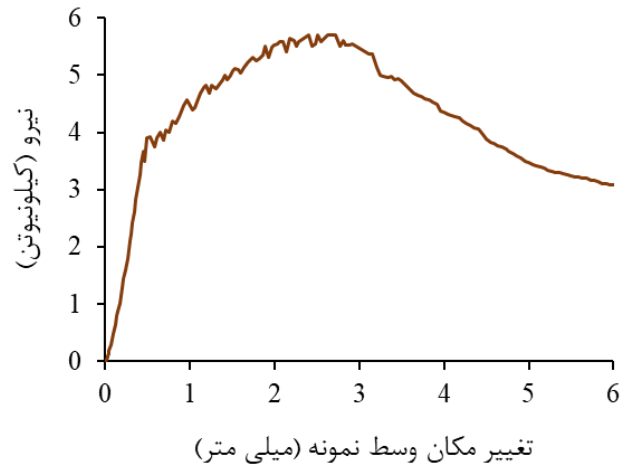
ولاستونیت (W20) عملکردی بسیار نزدیک به یکدیگر دارند؛ با این حال، در محدوده جایگزینی ۵ تا ۱۵ درصد ولاستونیت کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

بر اساس مطالعات پیشین [۳۴-۳۸] برای هر طرح اختلاط سه نمونه تهیه و آزمایش شد. شکل ۸ نیز نمودار تنش-تغییر مکان حاصل از آزمون خمش چهارنقطه‌ای نمونه‌ای با ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رفتار مکانیکی نمونه‌ها در آزمون خمش چهارنقطه‌ای با نتایج حاصل از آزمون کشش مستقیم هم‌خوانی مناسبی

فاصله ۶ میلی‌متری از کف قالب و با فاصله ۴۵ میلی‌متر از یکدیگر در مرکز مقطع قرار داده شدند. رفتار ورقه تا زمان ایجاد اولین ترک به صورت خطی مشاهده شد. نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه مسلح به دو میلگرد GFRP در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه از ظرفیت تغییر شکل قابل توجهی برخوردار است؛ با این حال، به دلیل محدودیت طول دستگاه LVDT امکان ثبت و بررسی تغییر مکان‌های بزرگ‌تر فراهم نبوده است. هدف از انجام این آزمایش، تعیین ویژگی‌های رفتاری ورقه در ابعاد واقعی و بررسی اثر مقیاس، پیش از به‌کارگیری آن به‌عنوان عضو تقویت‌کننده است [۵].

میانگین مقاومت فشاری پنج نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای طرح اختلاط W20، برابر با ۱۰۱ مگاپاسکال به‌دست آمد. در شکل ۱۱، منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از این پنج آزمون فشاری به‌همراه منحنی ایده‌آل متناظر ارائه شده است. همچنین، مدول الاستیسیته از طریق آزمایش فشاری روی نمونه‌های منشوری تعیین شد که مقدار آن ۳۸/۹۱ گیگاپاسکال گزارش گردید.

عملکرد مکانیکی HPRCC مورد مطالعه، نتیجه یک تعامل هم افزای ماتریس بهینه‌شده شامل سیمان، دژدود سیلیسی و پودر کوارتز است. در حالی که تراکم بالای ماتریس که با ناشی از فعالیت پوزولانی دژدود سیلیسی و اثر پرکنندگی پودر کوارتز است، مقاومت پایه را تأمین می‌کند، افزودن ولاستونیت مکانیسم‌های سخت‌شوندگی مضاعفی را ایجاد می‌نماید.

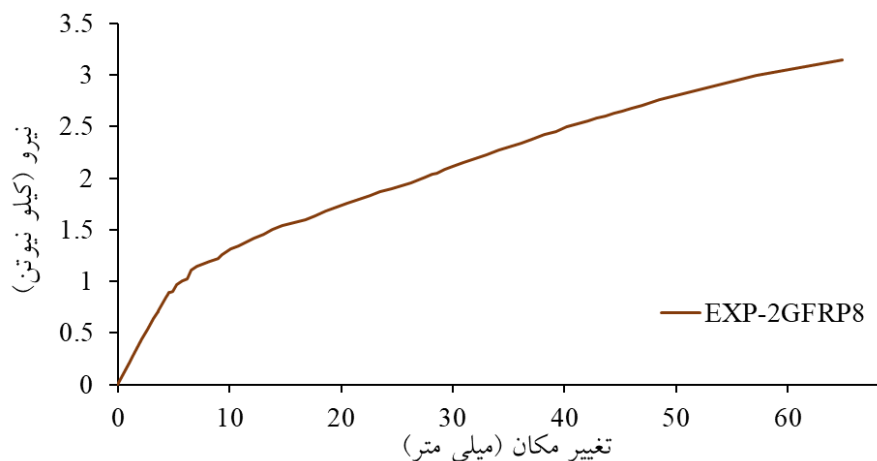


شکل ۹. نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایش خمشی.

Fig. 9. Load-displacement curve from the flexural test.

چهار نقطه‌ای نمونه W20 با ابعاد ۵۰۰×۱۲۵×۲۵ میلی‌متر در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین، مقدار بیشینه نیروی تحمل‌شده تحت بارگذاری یکنواخت برابر با ۴۲/۵ کیلونیوتن به‌دست آمد.

در ادامه، ورقه‌ای با ابعاد واقعی و با استفاده از طرح اختلاط W20 با طول ۱۵۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شد و با دو میلگرد GFRP به قطر ۸ میلی‌متر مسلح گردید. میلگردها در



شکل ۱۰. نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه مسلح به دو عدد GFRP با قطر ۸ میلی‌متر و ابعاد ۱۵۰۰×۱۵۰×۲۵ میلی‌متر.

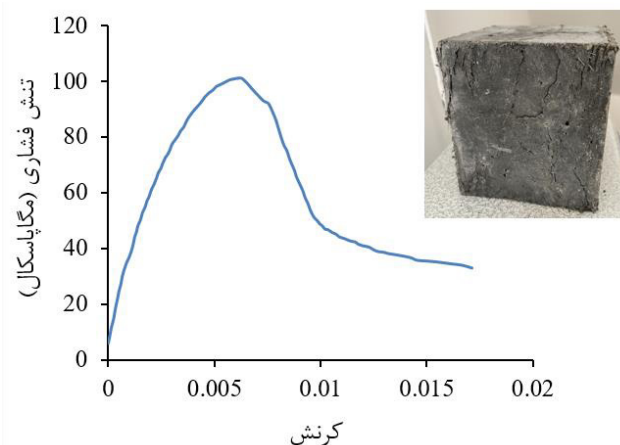
Fig. 10. Load-displacement curve of the specimen reinforced with two 8 mm diameter GFRP bars and dimensions of 25 × 150 × 1500 mm.

۲-۲- مطالعه عددی

مطالعه عددی و تحلیل پارامتریک در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شد. در گام نخست، تیر بتن مسلح حاصل از مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۴۳] مدل‌سازی شده و صحت‌سنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. در مرحله بعد، ورقه‌های کامپوزیت سیمانی مورد نظر، شبیه‌سازی شده و پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شدند. در ادامه، رفتار تیر بتن مسلح تقویت‌شده با ورقه‌های HPFRCC در قالب یک مطالعه پارامتریک بررسی گردید. در این بخش، تأثیر پارامترهای شامل ضخامت ورقه تقویتی، تعداد و همچنین قطر میلگردهای GFRP بر عملکرد سازه‌ای تیر تحلیل شده است.

۲-۲-۱- صحت‌سنجی تیر بتن مسلح

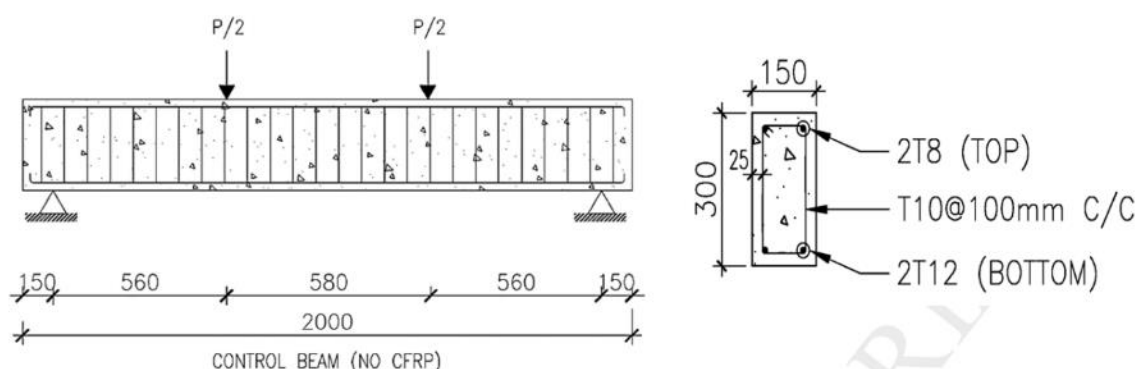
در این بخش، مدل عددی تیر بتن مسلح ارائه‌شده در مرجع [۴۳]، به‌منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی توسعه یافت. مشخصات هندسی تیر و شرایط انجام آزمون خمش چهارنقطه‌ای تحت بارگذاری یکنواخت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقاومت فشاری بتن به‌کاررفته در این تیر، $47/2$ مگاپاسکال گزارش شده است. همچنین، تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد کششی به‌ترتیب $551/5$ و $640/2$ مگاپاسکال است. به‌منظور بررسی دقت مدل عددی، تحلیل حساسیت نسبت به اندازه مش انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که اندازه مش ۲۵ میلی‌متر،



شکل ۱۱. منحنی ایده‌آل تنش-کرنش فشاری به همراه شکل ظاهری یک آزمون.

Fig. 11. Idealized compressive stress-strain curve and appearance of a specimen.

ولاستونیت به دلیل ساختار سوزنی خود، به‌عنوان یک ریزتقویت‌کننده عمل کرده و به پل‌زنی ریزترک‌ها کمک می‌کند [۳۹-۴۲]. این پدیده در کنار بهبود ساختار حفرات، منجر به انتقال بهتر تنش و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به نمونه شاهد می‌شود. بنابراین، ولاستونیت به‌عنوان یک افزودنی راهبردی عمل می‌کند که ضمن بهبود عملکرد کلی سیستم، ویژگی‌های ذاتی ماتریس سیمانی را تکمیل می‌نماید [۴۰، ۴۱].



شکل ۱۲. مقطع عرضی و جزئیات آرماتورگذاری تیر مرجع [۴۳].

Fig. 12. Cross-section and reinforcement details of the reference beam [43].

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت اندازه مش برای تیر بتن مسلح.

Table 2. Sensitivity analysis results of mesh size for the reinforced concrete beam.

نام ترکیب	اندازه مش (سانتی متر)	خطا (%) برای نیروی بیشینه نسبت مدل ۳
۱	۱۰	۱۴/۱۰
۲	۵	۵/۱۲
۳	۲/۵	۰
۴	۱/۲۵	۰/۱۴
۵	۱	۰/۱۱

جدول ۳. پارامترهای مدل خرابی پلاستیک بتن.

Table 3. Parameters of the concrete damage plasticity model.

viscosity	Shape factor (Kc)	Stress ratio (σ_b/σ_c)	Eccentricity (ϵ)	Dilation angle (ψ) (degree)
۰/۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

بهترین انطباق را بین نیروی بیشینه حاصل از تحلیل عددی و داده‌های آزمایشگاهی فراهم می‌کند.

در شبیه‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی، از المان‌های سه‌بعدی سالیید هشت‌گه‌ای با انتگرال‌گیری کاهشی (C3D8R) استفاده شد که هر المان دارای ۲۴ درجه آزادی است. میلگردهای فولادی نیز به کمک المان‌های خرابایی سه‌بعدی دوگه‌ای مدل‌سازی شدند. تحلیل مدل با بهره‌گیری از حل‌گر استاتیکی عمومی، با در نظر گرفتن اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و بر اساس الگوریتم تکراری نیوتن-رافسون انجام گرفت. رفتار تنش-کرنش بتن مطابق با روابط استاندارد یوروکد ۲ تعریف شد. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و فرآیند خرابی بتن، از مدل آسیب پلاستیسیته بتن (CDP) استفاده شد که پارامترهای آن بر اساس مطالعات پیشین [۴۴-۴۶] تعیین و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

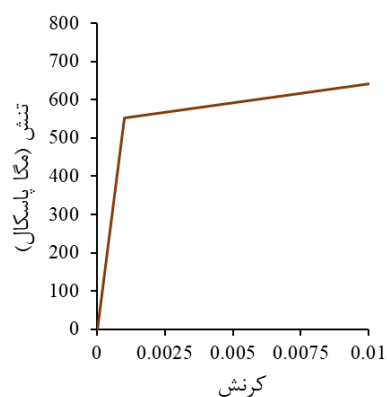
مطابق شکل ۱۳، برای رفتار غیر خطی فشاری بتن از رابطه اصلاح شده پوپوویچ بر اساس مرجع [۴۷] و برای رفتار کششی آن از رابطه بلاری و اچ سو بر اساس مرجع [۴۸] استفاده شد که نمودارهای مربوط به آن‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. همچنین، نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی در

شکل ۱۵ آمده است.

در شکل ۱۶، نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی تیر بتن مسلح مقایسه شده است. نیروی بیشینه برای نمونه آزمایشگاهی برابر ۱۱۶/۸ کیلونیوتن و برای مدل عددی برابر ۱۲۰/۰۵ کیلونیوتن به دست آمد. اختلاف ناچیز ۲/۸ درصدی میان این دو مقدار، حاکی از تطابق مناسب نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی است. همچنین شکل ۱۷، توزیع خسارت کششی تیر بتن مسلح را در لحظه تسلیم میلگردهای طولی تحتانی نمایش می‌دهد.

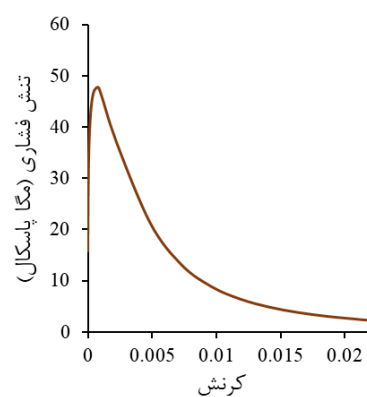
۲-۲-۲- صحت‌سنجی ورقه HPFRCC

رفتار غیرخطی کامپوزیت HPFRCC حاصل از نتایج آزمایشگاهی بخش نخست این تحقیق، در شکل‌های ۷ و ۱۱ ارائه شده و در مدل‌سازی عددی ورقه‌های تقویت‌کننده تیرهای بتن مسلح به‌کار رفته است. با توجه به رفتار الاستیک-خطی میلگردهای GFRP، تعریف مدول الاستیسیته برای مدل‌سازی آن‌ها کفایت می‌کند؛ بر این اساس، مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP طبق نتایج آزمون کشش مستقیم، ۴۵ گیگاپاسکال



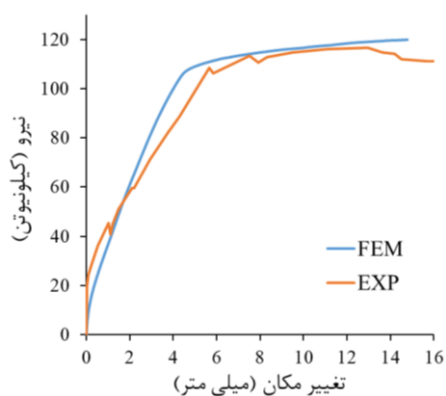
شکل ۱۵. نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی.

Fig. 15. Stress-strain curve of the steel reinforcing bar.



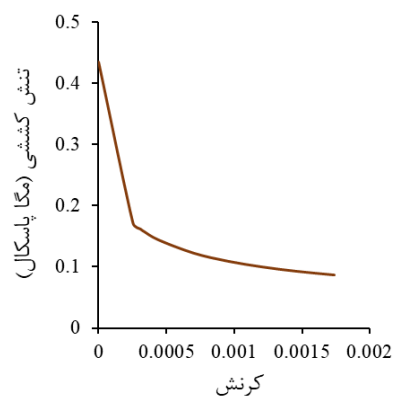
شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش فشاری بتن.

Fig. 13. Compressive stress-strain curve of concrete.



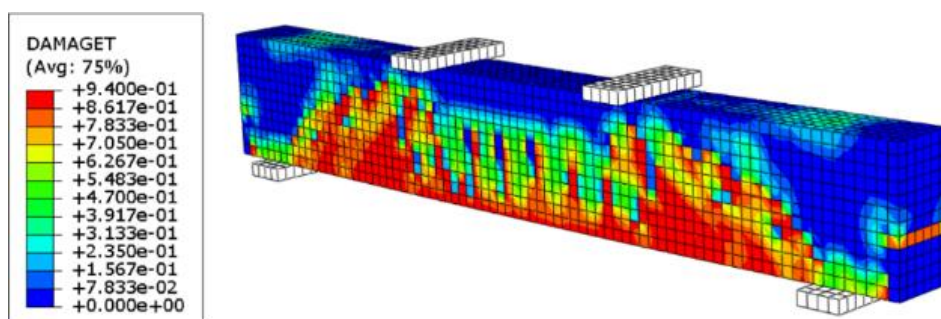
شکل ۱۶. مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان.

Fig. 16. Comparison of the load-displacement curves.



شکل ۱۴. نمودار تنش-کرنش کششی بتن.

Fig. 14. Tensile stress-strain curve of concrete.



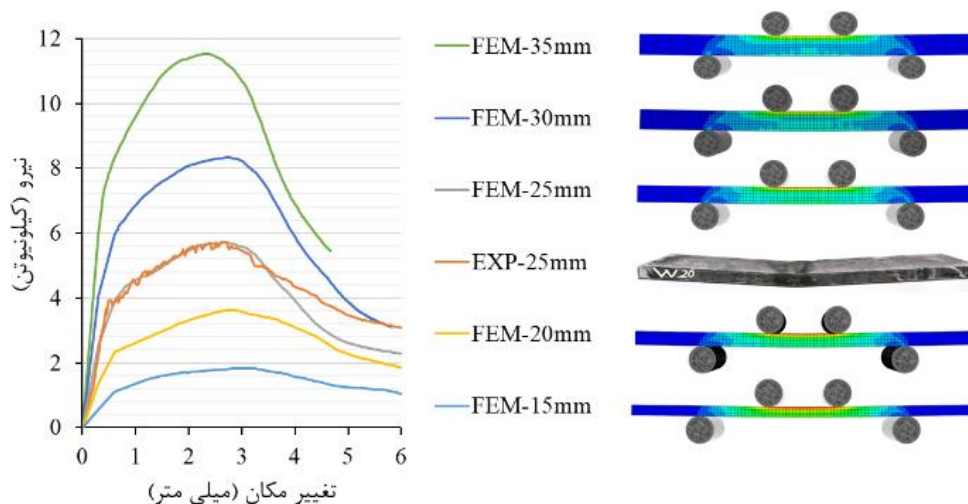
شکل ۱۷. خسارت کششی بتن.

Fig. 17. Tensile damage in concrete.

جدول ۴. پارامترهای مدل خرابی پلاستیک HPFRCC.

Table 4. Parameters of the HPFRCC plastic damage model.

viscosity	Shape factor (Kc)	Stress ratio (σ_b/σ_c)	Eccentricity (ϵ)	Dilation angle (ψ) (degree)
۰/۰۰۰۵	۰/۶۶	۱/۱	۰/۱	۵۵



شکل ۱۸. نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایش خمش ورقه ۵۰۰ میلی متری به همراه مدل سازی عددی.

Fig. 18. Load-displacement curve of the 500 mm sheet bending test along with the numerical simulation.

ضمن آنکه مدل سازی عددی برای حالت های تکمیلی نیز توسعه یافته و نتایج آن در شکل ۱۹ درج شده است.

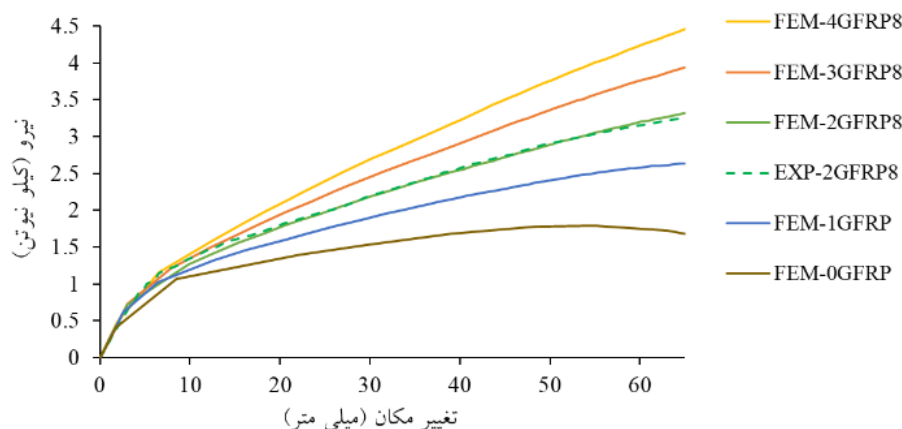
۲-۳- مدل سازی عددی تیرهای تقویت شده

در ادامه، تحلیل عددی تیرهای بتنی تقویت شده ارائه شده است. مطابق جدول ۵، مشخصات میلگردهای پلیمری و ضخامت ورقه تقویتی به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شدند تا رفتار تیرها در شرایط مختلف ارزیابی شود. نمونه های تقویت شده با شناسه های S1 تا S9 نام گذاری شده اند که در ادامه به عنوان شناسه اختصاری نمونه ها به کار می روند. جزئیات مدل سازی عددی این تیرها در شکل ۲۰ مشهود است. شایان ذکر است که اتصال میان ورقه تقویتی و تیر بتنی با استفاده از قید Tie در نرم افزار ABAQUS مدل سازی گردید.

با توجه به اینکه در سیستم تقویتی مورد استفاده در این پژوهش،

لحاظ شد. همچنین، پارامترهای مدل آسیب پلاستیسیته برای شبیه سازی رفتار غیرخطی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، مطابق با مطالعات پیشین [۳۳، ۱۱] استخراج و مقادیر آنها در جدول ۴ درج شده است.

در این بخش از مطالعه، عملکرد ترکیب W20 برای ساخت ورقه های تقویتی بررسی شد. نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از مدل سازی عددی در نرم افزار ABAQUS در کنار نتایج آزمایش خمش چهار نقطه ای نمونه W20 (با ابعاد ۲۵×۱۲۵×۵۰۰ میلی متر) در شکل ۱۸ ارائه شده است. نیروی بیشینه به دست آمده از آزمایش و مدل سازی عددی، به ترتیب ۴۲/۵ و ۳۹/۵ کیلو نیوتن گزارش شد. همچنین، تأثیر ضخامت ورقه های کامپوزیتی با طول ۵۰۰ میلی متر در بازه ۱۵ تا ۳۵ میلی متر (با گام های ۵ میلی متری) در شکل ۱۸ بررسی شده است. در ادامه، شکل ۱۹ نمودار نیرو-تغییر مکان ورقه های تقویتی با طول ۱۵۰۰ میلی متر و ضخامت ۲۵ میلی متر (مسلح به دو عدد میلگرد GFRP) را در مقایسه با نتایج مدل سازی عددی نشان می دهد؛



شکل ۱۹. نمودار نیرو-تغییر مکان ورقه با ابعاد ۲۵×۱۵۰×۱۵۰۰ میلی متر مسلح به میلگردهای GFRP با قطر ۸ میلی متر.

Fig. 19. Load-displacement curve of the 25 × 150 × 1500 mm sheet reinforced with 8 mm diameter GFRP bars.

جدول ۵. نام گذاری تیرها به همراه مشخصات ورقه های تقویتی.

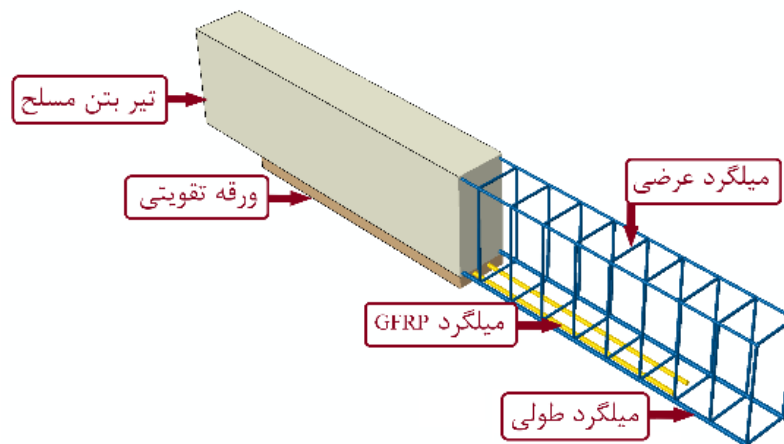
Table 5. Designation of the beams along with the specifications of the strengthening sheets.

شناسه	نام اختصاری تیرها	تعداد میلگرد پلیمری ورقه زیرین	میلگرد پلیمری ورقه تقویتی	ضخامت ورقه تقویتی (میلی متر)
OB	OB	-	-	-
S1	2G6T25- 2G8T25- 2G10T25- 2G12T25	۲	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۲۵
S2	3G6T25- 3G8T25- 3G10T25- 3G12T25	۳	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۲۵
S3	4G6T25- 4G8T25- 4G10T25- 4G12T25	۴	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۲۵
S4	2G6T35- 2G8T35- 2G10T35- 2G12T35	۲	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۳۵
S5	3G6T35- 3G8T35- 3G10T35- 3G12T35	۳	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۳۵
S6	4G6T35- 4G8T35- 4G10T35- 4G12T35	۴	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۳۵
S7	2G6T45- 2G8T45- 2G10T45- 2G12T45	۲	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۴۵
S8	3G6T45- 3G8T45- 3G10T45- 3G12T45	۳	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۴۵
S9	4G6T45- 4G8T45- 4G10T45- 4G12T45	۴	۱۲∅-۱۰∅-۸∅-۶∅	۴۵

شده‌اند. متغیرهای در نظر گرفته شده در تحلیل عددی تیرهای بتن مسلح، شامل ضخامت ورقه تقویتی و همچنین تعداد و قطر میلگردهای GFRP تعبیه شده در ورقه تقویتی است. ضمن آنکه ابعاد و سایر مشخصات هندسی تیر در تمامی مدل‌ها ثابت فرض شد. بررسی عملکرد تیرها با ضخامت‌های مختلف ورقه تقویتی، با در نظر گرفتن امکان جانمایی مناسب میلگرد، از اهداف این پژوهش است. با این حال، ضخامت‌های کمتر از ۲۰ میلی متر امکان تأمین پوشش مناسب را برای میلگردهای GFRP با قطر ۱۰ و ۱۲ میلی متر فراهم نمی کنند. از سوی دیگر، در مطالعات پیشین [۵، ۱۵، ۴۹-

اتصال ورقه HPFRCC به تیر بتنی از طریق چسب اپوکسی به همراه مهار مکانیکی توسط رول بولت‌ها تأمین شده است و مطابق گزارش‌های آزمایشگاهی موجود در منابع پیشین [۱۱، ۳۳]، جداشدگی یا لغزش سطحی به عنوان مود گسیختگی مشاهده نشده است، فرض اتصال کامل در مدل سازی عددی به عنوان یک ساده سازی متعارف و مبتنی بر شواهد تجربی در نظر گرفته شد.

به منظور مقایسه دقیق تیرهای تقویت شده با تیر مرجع (OB)، تمامی نمونه‌ها تا رسیدن به بیشینه تغییر مکان ثبت شده در تیر آزمایشگاهی بارگذاری



شکل ۲۰. جزئیات مدل عددی تیرهای تقویت شده.

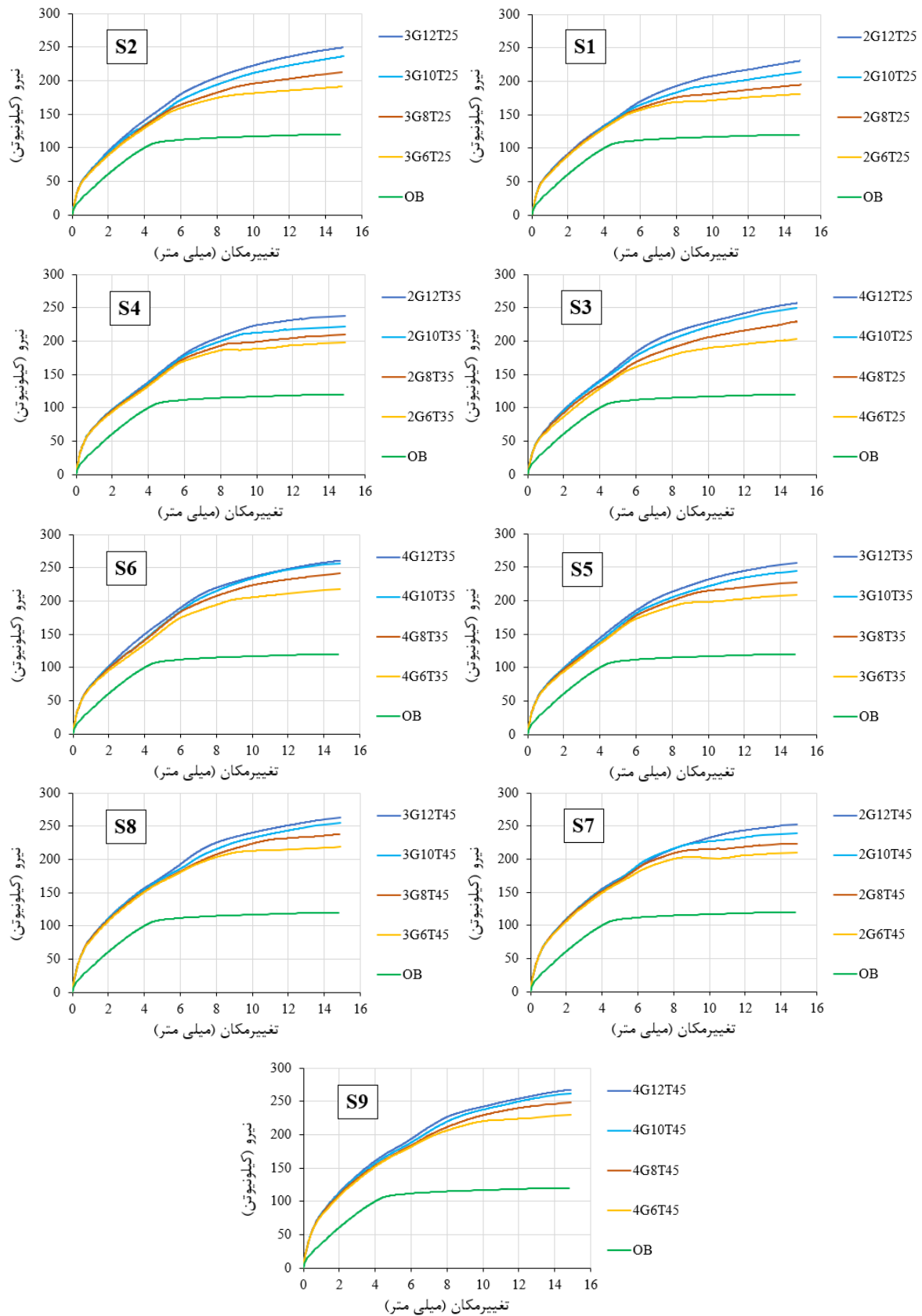
Fig. 20. Details of the numerical model of the strengthened beams.

نتایج ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده در جدول ۶ ارائه شده است. ظرفیت باربری تیر مرجع (OB) برابر با ۱۲۰/۰۵ کیلونیوتن به دست آمد؛ در حالی که استفاده از ورقه های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، منجر به افزایش چشمگیر این ظرفیت شده است. برای میلگردهای GFRP با قطر ۶ میلی متر، ظرفیت باربری در بازه ۱۸۰/۷۸ تا ۲۲۹/۸۸ کیلونیوتن قرار دارد. با افزایش قطر میلگردهای GFRP به ۸ میلی متر، این محدوده به ۱۹۴/۶۰ تا ۲۴۷/۶۳ کیلونیوتن ارتقا یافته است. این روند صعودی در نمونه های دارای میلگردهای با قطر ۱۰ و ۱۲ میلی متر نیز تکرار شده، به طوری که ظرفیت باربری آنها به ترتیب در بازه های ۲۱۳/۸۰ تا ۲۶۱/۰۱ کیلونیوتن و ۲۳۰/۳۸ تا ۲۶۷/۴۱ کیلونیوتن گزارش شده است. اگرچه افزایش ظرفیت باربری با به کارگیری آرماتورهای تقویتی از نظر تئوری مورد انتظار است، نتایج این پژوهش امکان ارزیابی کمی تأثیر قطر میلگردهای GFRP را فراهم می سازد. مقایسه داده ها نشان می دهد که با افزایش قطر میلگردها، ظرفیت باربری به طور محسوس ارتقا یافته و کارایی سیستم تقویتی بهبود می یابد؛ موضوعی که گویای نقش مؤثر پارامترهای طراحی در ارتقای عملکرد سازه های تیرهای بتن آرمه است.

نتایج ظرفیت جذب انرژی در جدول ۷ ارائه شده است. انرژی جذب شده برای تیر مرجع (OB) ۱۴۷۹/۳۵ ژول محاسبه شد. به کارگیری ورقه های تقویتی HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، منجر به افزایش چشمگیر این ظرفیت در تیرها گردید. در نمونه های تقویت شده با میلگردهای

۵۵]، ساخت ورقه هایی با ضخامت بیش از ۵۰ میلی متر گزارش نشده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر از ورقه های تقویتی با ضخامت های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی متر برای تقویت بخش زیرین تیرهای بتنی استفاده شده است. پس از تکمیل تحلیل های عددی، نمودارهای نیرو-تغییر مکان در شکل ۲۱ ارائه شده است؛ همچنین برای مقایسه بهتر، نتایج تیر بدون تقویت (OB) نیز در همین شکل نمایش یافته است. در نام گذاری نمونه های تقویت شده، عدد پیش از حرف G نشان دهنده تعداد میلگردهای GFRP، عدد پس از آن بیانگر قطر این میلگردها و عدد درج شده پس از حرف T معرف ضخامت ورقه HPFRCC است. مقادیر نیروی بیشینه تیرهای مدل سازی شده نیز در جدول ۶ گردآوری شده است.

در این بخش، عملکرد تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورقه های HP-FRCC مسلح به میلگردهای GFRP بر پایه دو شاخص «ظرفیت باربری» و «ظرفیت جذب انرژی» ارزیابی شده است. ظرفیت باربری که به عنوان نیروی بیشینه قابل تحمل تعریف می شود، از پارامترهای کلیدی در تحلیل رفتار خمشی است. همچنین، ظرفیت جذب انرژی به منزله یکی از معیارهای مهم در رفتار سازه های بتن آرمه، از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان به دست می آید. در پژوهش حاضر، این پارامتر تا نقطه نیروی بیشینه تعیین شده است که بیانگر پتانسیل جذب انرژی توسط عضو پیش از وقوع گسیختگی است. افزایش این شاخص، نشان دهنده توانمندی بیشتر تیر در جذب انرژی و در نتیجه بهبود عملکرد سازه ای تحت بارگذاری است.



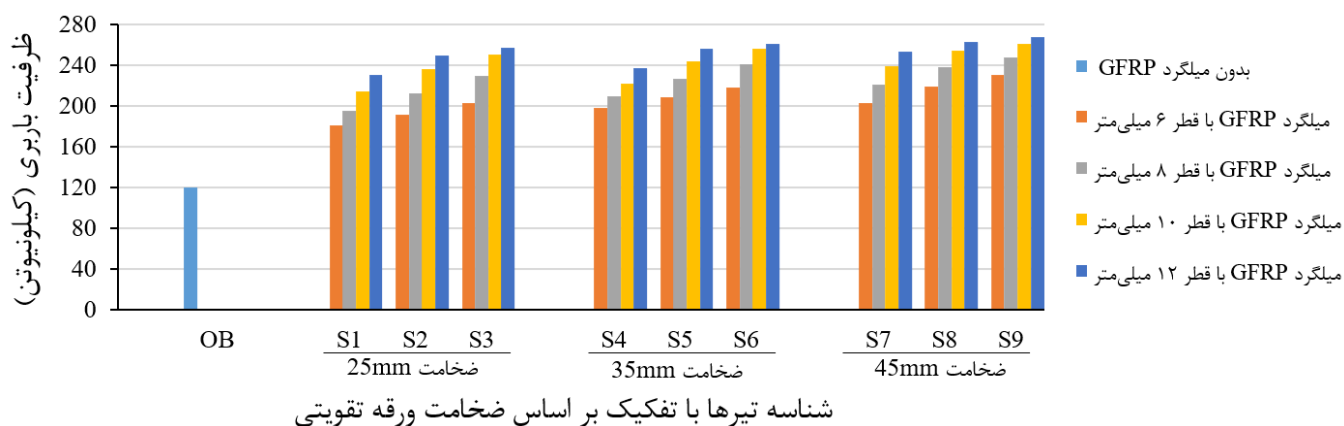
شکل ۲۱. نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای تیرهای S1 تا S9.

Fig. 21. Load-displacement curves for beams S1 to S9.

جدول ۶. نیروی بیشینه هر تیر (کیلو نیوتن).

Table 6. Peak load of each beam (kN).

S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	OB	نامگذاری تیرها
-	-	-	-	-	-	-	-	-	120.05	بدون میلگرد GFRP (تیر مرجع)
229.88	218.46	203	217.83	208.11	198.01	203.01	191.13	180.78	-	میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی متر
247.63	237.81	221.11	240.98	226.55	209.52	229.37	212.01	194.60	-	میلگرد GFRP با قطر ۸ میلی متر
261.01	254.32	239.15	255.85	243.86	221.95	250.02	236.21	213.80	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی متر
267.41	262.85	252.68	260.57	255.98	237	256.91	249.28	230.38	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۲ میلی متر



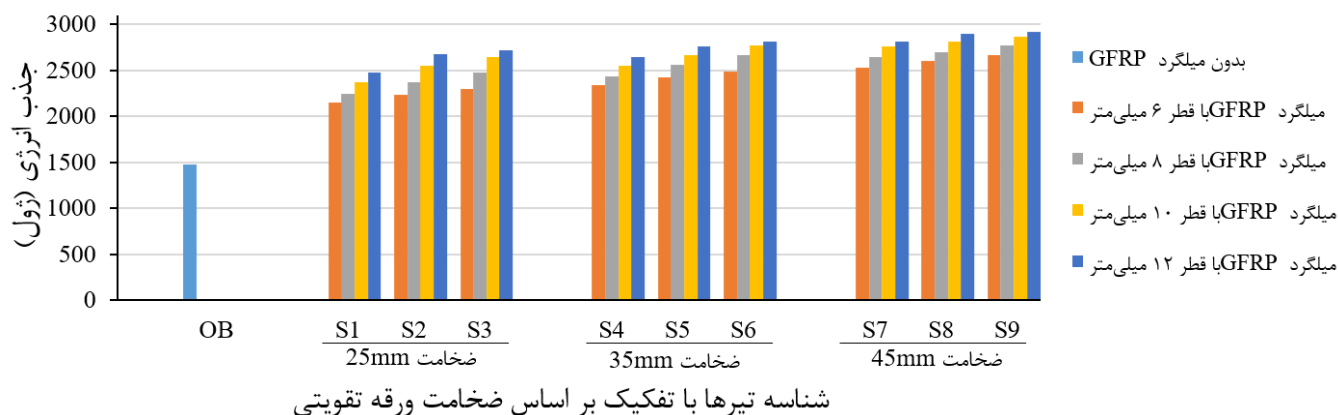
شکل ۲۲. ظرفیت باربری بر حسب نام اختصاری تیرها.

Fig. 22. Load-carrying capacity versus beam designation.

جدول ۷. ظرفیت جذب انرژی (ژول) برای هر تیر.

Table 7. Energy absorption capacity (J) for each beam.

S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	OB	نامگذاری تیرها
-	-	-	-	-	-	-	-	-	1479.35	بدون میلگرد GFRP (تیر مرجع)
2662.66	2598.18	2524.91	2482.30	2423.18	2340.05	2298.76	2234.73	2152.79	-	میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی متر
2770.27	2693.32	2645.20	2667.78	2559.59	2438.28	2477.42	2368.15	2247.99	-	میلگرد GFRP با قطر ۸ میلی متر
2867.27	2810.95	2754.89	2772.56	2660.66	2543.85	2648.22	2548.43	2368.62	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی متر
2921.84	2894.93	2807.62	2817.14	2759.79	2646.61	2721.47	2673.48	2478.59	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۲ میلی متر



شکل ۲۳. ظرفیت جذب انرژی بر حسب نام اختصاری تیرها.

Fig. 23. Energy absorption capacity versus beam designation.

دقت مدل، یک مطالعه پارامتریک برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، شامل ضخامت ورقه‌های تقویتی و مشخصات میلگردهای GFRP، بر عملکرد تیرهای بتن‌آرمه انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که مخلوط حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت (W20) بهترین عملکرد مکانیکی را در میان طرح‌های اختلاط بررسی‌شده داراست. این ترکیب با مقاومت فشاری ۱۰۱ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۳۸/۹۱ گیگاپاسکال، به دلیل رفتار مطلوب در کشش و خمش، به‌عنوان ماده بهینه برای ساخت ورقه‌های تقویتی HPFRCC انتخاب شد.

۲. مدل عددی توسعه‌یافته برای تیر بتن‌آرمه مرجع توانست رفتار بار-تغییر مکان تیر را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. تحلیل حساسیت اندازه‌مش نشان داد که اندازه المان ۲۵ میلی‌متر بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی فراهم می‌کند. همچنین استفاده از مدل آسیب پلاستیسیته بتن برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی کامپوزیت سیمانی و در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی برای میلگردهای GFRP، امکان بازتولید مناسب رفتار واقعی سیستم را فراهم ساخت.

۳. نتایج تحلیل پارامتریک نشان داد که به‌کارگیری ورقه‌های تقویتی HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، ظرفیت باربری تیرهای بتن‌آرمه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. ظرفیت باربری تیر مرجع ۱۲۰/۰۵ کیلو نیوتن محاسبه شد، در حالی که این مقدار در تیرهای

GFRP با قطر ۶ میلی‌متری، ظرفیت جذب انرژی در بازه ۲۱۵۲/۷۹ تا ۲۶۶۲/۶۶ ژول قرار گرفت. با افزایش قطر میلگردها به ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر، این بازه‌ها به‌ترتیب به ۲۲۴۷/۹۹ تا ۲۷۷۰/۲۷ ژول، ۲۳۶۸/۶۲ تا ۲۸۶۷/۲۷ ژول و نهایتاً ۲۴۷۸/۵۹ تا ۲۹۲۱/۸۴ ژول ارتقا یافت. این روند صعودی، به‌وضوح حاکی از نقش مؤثر افزایش قطر میلگردهای GFRP در ارتقای ظرفیت جذب انرژی تیرهای بتن‌آرمه است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی تیرهای بتن‌آرمه تحت بارگذاری یکنواخت شده است. این افزایش جذب انرژی ناشی از ارتقای مقاومت و سختی سیستم تقویت‌شده است و نه بیانگر افزایش اتلاف انرژی یا بهبود شکل‌پذیری. با توجه به ماهیت الاستیک میلگردهای GFRP و نوع بارگذاری به‌کاررفته در این پژوهش، تفسیر نتایج صرفاً در چارچوب افزایش ظرفیت مقاومتی و سختی سازه‌ای قابل بیان است.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP به‌صورت عددی بررسی شد. در ابتدا، ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های مختلف حاوی ولاستونیت از طریق آزمایش‌های مکانیکی تعیین گردید. سپس مدل عددی تیر مرجع در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. پس از تأیید

بارگذاری و روند توسعه ترک‌ها با دقت مناسب ثبت شد و مبنای صحت‌سنجی مدل عددی قرار گرفت. همچنین، در مدل‌سازی عددی حاضر اثرات وابسته به زمان نظیر جمع‌شدگی و خزش، و نیز عدم قطعیت‌های اجرایی لحاظ نشده‌اند و تحلیل‌ها تحت شرایط ایده‌آل انجام شده‌اند. علاوه بر این، ارزیابی جذب انرژی در این پژوهش صرفاً بر اساس بارگذاری استاتیکی یکنواخت انجام شده و تعمیم نتایج به بارگذاری‌های دینامیکی یا لرزه‌ای نیازمند مطالعات تکمیلی است. بررسی این موارد می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد.

منابع

- [1] I. Khan, Strengthening of reinforced concrete structures using FRP composites: A state-of-the-art review, *Composite Structures*, 92(12) (2010) 2793–2815.
- [2] A. Shaikh, L.J. Butler, Self-sensing fabric reinforced cementitious matrix systems for combined strengthening and monitoring of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 331 (2022) 127243.
- [3] J.A. Barros, A. Fortes, Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits, *Cement and Concrete Composites*, 27(4) (2005) 471-480.
- [4] V.C. Li, H.-C. Wu, Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, *Applied Mechanics Reviews*, 45(8) (1992) 390-398.
- [5] H. Tanarslan, N. Alver, R. Jahangiri, Ç. Yalçinkaya, H. Yazıcı, Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 45-55.
- [6] H.M. Tanarslan, Ç. Yalçinkaya, N. Alver, C. Karademir, Shear strengthening of RC beams with externally bonded UHPFRC laminates, *Composite Structures*, 262 (2021) 113611.
- [7] Z. Kexin, S. Quansheng, Strengthening of a reinforced concrete bridge with polyurethane-cement composite (PUC), *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1) (2016).
- [8] A. Bitaraf, A. Kheyroddin, M.K. sharbatdar, Flexural Strengthening of Continuous RC Beams Using HPFRCC Precast Laminates, (2021).

تقویت‌شده تا ۲۶۷/۴۱ کیلونیوتن ارتقا یافت که حاکی از بهبود چشمگیر عملکرد خمشی اعضای تقویت‌شده است.

۴. افزایش قطر میلگردهای GFRP در ورقه‌های تقویتی تأثیر مستقیمی بر افزایش ظرفیت باربری تیرها دارد. نتایج تحلیل عددی نشان داد که با افزایش قطر میلگردها از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، ظرفیت باربری تیرهای تقویت‌شده به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً ناشی از افزایش سطح مقطع آرماتورهای تقویتی و در نتیجه بهبود توزیع تنش در ناحیه کششی تیر است که به افزایش ظرفیت خمشی عضو منجر می‌شود.

۵. بررسی تأثیر تعداد میلگردهای GFRP نیز نشان داد که افزایش تعداد میلگردها موجب افزایش ظرفیت باربری تیر می‌شود. با این حال، اختلاف ظرفیت باربری بین حالت‌های دارای سه و چهار میلگرد نسبتاً محدود بوده، در حالی که اختلاف بین حالت‌های دارای دو و سه میلگرد بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تعداد میلگردهای تقویتی تا یک حد مشخص موجب بهبود قابل توجه عملکرد خمشی تیر می‌شود، اما پس از رسیدن به سطحی از تقویت مؤثر، میزان تأثیر افزایش بیشتر میلگردها کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این مطالعه اثر قطر و تعداد میلگردها به‌صورت پارامتریک و در حالت‌های مستقل بررسی شده و مقایسه مستقیم این دو پارامتر بر اساس سطح مقطع کل یکسان مدنظر نبوده است.

۶. نتایج حاصل از ظرفیت جذب انرژی نشان داد که استفاده از ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، موجب افزایش قابل توجه توانایی تیرها در جذب انرژی می‌شود. ظرفیت جذب انرژی تیر مرجع برابر با ۱۴۷۹/۳۵ ژول به دست آمد، در حالی که در تیرهای تقویت‌شده این مقدار تا حدود ۲۹۲۱/۸۴ ژول افزایش یافته است. این افزایش، ناشی از بهبود ظرفیت باربری و افزایش سختی سیستم تحت بارگذاری یکنواخت است که منجر به افزایش سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان شده است. در واقع، استفاده از مقاطع تقویت‌شده، توانایی سازه را در برابر بارگذاری‌های شدید از طریق افزایش مقاومت و ظرفیت جذب انرژی تحت بارگذاری‌های استاتیکی بهبود می‌بخشد.

لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش تحت برخی محدودیت‌ها به دست آمده‌اند. در آزمایش خمش ورقه بزرگ‌مقیاس، به دلیل محدودیت دامنه اندازه‌گیری LVDT، ثبت کامل پاسخ نمونه در تغییرشکل‌های بزرگ امکان‌پذیر نبود؛ با این حال، بخش اصلی رفتار سازه‌ای شامل مراحل اولیه

- modeling of tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with freezing-thawing actions, 174 (2019) 136983.
- [19] M.S.M.A. M. Singh Sheikh, P. Visintin, M.C. Griffith, Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 15-25.
- [20] M.K. Mohamed Husseina, Hikaru Nakamura., Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 34(9) (2012) 1061-1066.
- [21] H.A.B. Othman, PERFORMANCE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE PLATES UNDER IMPACT LOADS, Toronto, Ontario, Canada, 2016.
- [22] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), in, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 2008, pp. 16.
- [23] F. Lo Monte, L. Ferrara, Tensile behaviour identification in Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites: indirect tension tests and back analysis of flexural test results, *Materials and Structures*, 53(6) (2020) 145.
- [24] W. Li, J. Zhao, X. Huang, J. Zheng, T. Shi, E.D. Shumuye, Mechanical properties of SAC-ECC reinforced with fiber-reinforced polymer mesh, *Construction and Building Materials*, 344 (2022) 128279.
- [25] G. Tan, Z. Zhu, W. Wang, X. He, A fractal-based approach for cracking characterization and whole process prediction exploration of PP fiber reinforced ECC containing sustainable ingredients, *Construction and Building Materials*, 318 (2022) 126015.
- [26] R.D. Toledo Filho, F. de Andrade Silva, E. Fairbairn, J. de Almeida Melo Filho, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Construction and building materials*, 23(6) (2009) 2409-2420.
- [27] Q. Zhang, Q.-C. Yang, W.-J. Li, X.-L. Gu, H.-H. Dai, [9] R. Ehsani, M.K. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Estimation of the moment redistribution and plastic hinge characteristics in two span beams cast with high-performance fiber reinforced Cementitious composite (HPFRCC), *Structures*, 35 (2022) 1175-1190.
- [10] R. Zhang, J. Wu, L. Jin, X. Du, Influence of elevated temperatures on bond performance between BFRP bars and concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 287 (2023) 109303.
- [11] M.M. Kadhim, A. Jawdhari, W. Nadir, L.S. Cunningham, Behaviour of RC beams strengthened in flexure with hybrid CFRP-reinforced UHPC overlays, *Engineering Structures*, 262 (2022) 114356.
- [12] A. Farhat Farhat, D. Nicolaides, A. Kanellopoulos, L. Karihaloo Bhushan, Behavior of RC Beams Retrofitted with CARDIFRC after Thermal Cycling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1) (2010) 21-28.
- [13] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh, Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25(11) (2011) 4144-4155.
- [14] M.A. Al-Osta, M.N. Isa, M.H. Baluch, M.K. Rahman, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 279-296.
- [15] H. Tanarslan, Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates, *Engineering Structures*, 151 (2017) 337-348.
- [16] M. Hussein, M. Kunieda, H. Nakamura, Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 34(9) (2012) 1061-1066.
- [17] S.E.-T. K. Will, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement & Concrete Composites*, 48 (2014) 53-66.
- [18] R.X. Zhidong Zhou, Pizhong Qiao, Linjun Lu, On the

- Journal of Building Engineering, 40 (2021) 102734.
- [36] M. Khan, M. Cao, A. Hussain, S. Chu, Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites, *Construction and Building Materials*, 300 (2021) 124046.
- [37] S. Li, O.M. Jensen, Q. Yu, Mechanism of rate dependent behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete containing coarse aggregates under flexural loading, *Construction and Building Materials*, 301 (2021) 124055.
- [38] M. Mercuri, M. Vailati, A. Gregori, Lime-based mortar reinforced with randomly oriented polyvinyl-alcohol (PVA) fibers for strengthening historical masonry structures, *Developments in the Built Environment*, 14 (2023) 100152.
- [39] M. Dutkiewicz, H.E. Yücel, F. Yıldızhan, Evaluation of the performance of different types of fibrous concretes produced by using wollastonite, *Materials*, 15(19) (2022) 6904.
- [40] S. Wang, G. Li, F. Luo, Influence of Natural Wollastonite Microfibers on the Mechanical Behavior of Ultra-High-Toughness Cementitious Composites Containing Polyethylene Fibers, *Materials*, 19(9) (2026) 1717.
- [41] C. Hu, X. Lin, Y. Liu, M. Pellicciari, A.M. Tarantino, H. Jiang, T. Ji, Physical-chemical synergistic toughening mechanism of wollastonite powder in MgO-K₂HPO₄-SiO₂ cement system, *Construction and Building Materials*, 514 (2026) 145581.
- [42] M.-Y. Xuan, Y.-S. Wang, R. Lin, S.-J. Kwon, X.-Y. Wang, Strength enhancement–carbon emission reduction–autogenous shrinkage mitigation of cement-slag-limestone ultra-high-performance concrete by using natural wollastonite, *Journal of Building Engineering*, (2025) 114598.
- [43] R. Hawileh, H. Musto, J. Abdalla, M. Naser, Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 173 (2019) 106952.
- Study on model of flexure response of carbon fiber textile reinforced concrete (CTRC) sheets with short AR-glass fibers, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023) e01791.
- [28] B.S. EN, Testing hardened concrete–Part 3: Compressive strength of test specimens English version of DIN EN 12390-3:2009-07, British Standard Institution, London, UK, (2009).
- [29] L.-S. Wu, Z.-H. Yu, C. Zhang, T. Bangi, RETRACTED: Effect of CaCO₃ whiskers on tensile properties of ultra-high-performance engineered cementitious composites, in, Elsevier, 2022.
- [30] B.-T. Huang, J.-X. Zhu, K.-F. Weng, V.C. Li, J.-G. Dai, Ultra-high-strength engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Material design and effect of fiber hybridization, *Cement and Concrete Composites*, 129 (2022) 104464.
- [31] L.-Y. Xu, B.-T. Huang, J.-C. Lao, J.-G. Dai, Tailoring strain-hardening behavior of high-strength Engineered Cementitious Composites (ECC) using hybrid silica sand and artificial geopolymers aggregates, *Materials & Design*, 220 (2022) 110876.
- [32] A.M. Tawfek, Z. Ge, H. Yuan, N. Zhang, H. Zhang, Y. Ling, Y. Guan, B. Šavija, Influence of fiber orientation on the mechanical responses of engineering cementitious composite (ECC) under various loading conditions, *Journal of Building Engineering*, 63 (2023) 105518.
- [33] R. Khaleghi, M. TahamouliRoudsari, Flexural strengthening of concrete beams using prefabricated mortar laminates reinforced with GFRP bars and hybrid fibers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 26(6) (2025) 2585-2604.
- [34] Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Construction and building materials*, 103 (2016) 8-14.
- [35] J. Li, J. Yan, G. Xue, J. Niu, Acoustic emission behavior of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced calcium sulfoaluminate cement mortar under flexural load,

- concrete beams strengthened with reinforced mortar layer, *Engineering Structures*, 245 (2021) 112884.
- [51] P. Zhang, Y. Su, Y. Liu, D. Gao, S.A. Sheikh, Flexural behavior of GFRP reinforced concrete beams with CFRP grid-reinforced ECC stay-in-place formworks, *Composite Structures*, 277 (2021) 114653.
- [52] K.-D. Peng, B.-T. Huang, L.-Y. Xu, R.-L. Hu, J.-G. Dai, Flexural strengthening of reinforced concrete beams using geopolymer-bonded small-diameter CFRP bars, *Engineering Structures*, 256 (2022) 113992.
- [53] H. Al-Mashgari, Y. Abdullah, F. Hejazi, M.Y. Alkhateeb, Retrofitting of corroded reinforced concrete beams in flexure using CFRP rods and anchor bolt, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1819-1827.
- [54] Y. Zhang, S. Huang, Y. Liu, W. Fan, X. Shao, Flexural behavior of damaged RC beams strengthened with prestressed UHPC layer, *Engineering Structures*, 283 (2023) 115806.
- [55] M.M.A. Kadhim, A. Jawdhari, W. Nadir, A. Majdi, Experimental study on RC beams strengthened in flexure with CFRP-Reinforced UHPC overlays, *Engineering Structures*, 285 (2023) 116066.
- [44] G.K. Mohammed, K.F. Sarsam, I.N. Korkess, Modeling the flexural performance of reinforced concrete built-up beams, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, pp. 012108.
- [45] H. Cheng, C.M. Paz, B.C. Pinheiro, S.F. Estefen, Experimentally based parameters applied to concrete damage plasticity model for strain hardening cementitious composite in sandwich pipes, *Materials and Structures*, 53(4) (2020) 78.
- [46] S.A. Mohammed, A.I. Said, Analysis of concrete beams reinforced by GFRP bars with varying parameters, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1) (2022) 767-774.
- [47] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 3(5) (1973) 583-599.
- [48] A. Belarbi, & Hsu, T. T. C, Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete., *Aci Structural Journal*, 91 (1994) 465 - 474.
- [49] E. Esmaeeli, J.A. Barros, H. Baghi, Hybrid composite plates (HCP) for shear strengthening of RC beams, (2013).
- [50] Y.M. Alharthi, M. Emara, A.S. Elamary, I.A. Sharaky, Flexural response and load capacity of reinforced

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Khaleghi, *Flexural Strengthening of RC Beams Using Wollastonite-Containing High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite Sheets: Experimental and Numerical Investigation*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 58(3) (2026) 437-460.

DOI: [10.22060/ceej.2026.25574.8433](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.25574.8433)



