



University Of Qom



Investigation of the Bar–Anchor–Fiber System for Preventing Concrete Cover Delamination in Flexural Strengthening of RC Beams with FRP

Seyed Hossein Mazaheri¹, Seyed Ahmad Mobinipour², Seyed Mohammad Banijamali³

1. Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: Hossein.Mazaheri@stu.qom.ac.ir
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: mobinipour@qom.ac.ir
3. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: Mohammad.Banijamali@stu.qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 01 Oct 2025
Revised 26 Dec 2025
Accepted 06 Jan 2026
Published 13 Jan 2026

Keywords:
Concrete Cover
Delamination,
Externally Bonded
Reinforcement on
Grooves,
Near-surface mounted
technique,
Bar–Anchorage–Fiber
system.

ABSTRACT

Flexural strengthening of reinforced concrete structures using fiber-reinforced polymers is an effective technique for rehabilitation and performance enhancement. However, premature failure modes, including debonding of the FRP laminate from concrete and concrete cover delamination at the tensile face, limit utilization of FRP capacity. A two-phase experimental program was conducted. Twelve RC beams were fabricated and tested under four-point bending. In the first phase, eight beams comprised four groups: reference beams, beams strengthened using externally bonded reinforcement on grooves, near-surface mounted beams without anchorage (NU115), and NSM beams strengthened using the Bar-Anchor-Fiber technique (NA115). In the second phase, four NSM beams strengthened with BAF were fabricated with anchorage lengths of 150 and 200 cm (NA150 and NA200) to evaluate anchorage length effects. Results demonstrated that BAF completely eliminated CCD and significantly enhanced ultimate load capacity and ductility. NA115 load capacity increased by up to 71% compared with reference beams. Increasing anchorage length improved flexural capacity and ultimate deformation, with NA200 exhibiting the highest performance. Accordingly, the end-anchorage system of HMFRP bars and bar length in the Bar-Anchor-Fiber configuration play decisive roles in fully mobilizing CFRP capacity, while BAF provides an effective solution for enhancing the load-carrying capacity of FRP-strengthened RC structures.

Cite this article: Mazaheri SH, Mobinipour SA, Banijamali SM. Investigation of the Bar–Anchor–Fiber System for Preventing Concrete Cover Delamination in Flexural Strengthening of RC Beams with FRP. Civil Infrastructure Researches. 2026; 12(1): 47-58. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.14023.1658>



Introduction

Fiber-reinforced polymers (FRP) constitute one of the most important composite materials firmly established in the modern construction industry. They are employed in a wide range of forms and configurations, including laminates, fabrics, strips, and I-shaped or box-shaped sections. Among the available application techniques, externally bonded reinforcement (EBR) remains the most commonly used method due to its ease of installation and its effectiveness in enhancing the flexural capacity of reinforced concrete (RC) members.

However, a principal drawback of the EBR technique is the premature occurrence of debonding, in which the FRP sheet separates from the concrete surface. This failure mode can cause the strengthening system to fail before a substantial portion, or even the full capacity, of the FRP material is mobilized. To address this undesirable behavior, various alternative techniques have been proposed, including grooving-based methods such as externally bonded reinforcement on grooves (EBROG), holing techniques, mechanically fastened EBR (MF-EBR), near-surface mounted (NSM) installations, and other approaches. Although these methods have been shown to delay debonding failures, many of them remain susceptible to another unfavorable failure mode characterized by the separation of the entire concrete cover together with the strengthening system from the tensile face of the strengthened member, commonly referred to as concrete cover delamination. This failure mode becomes dominant particularly when high percentages of FRP reinforcement are employed and results in a significant loss of load-carrying capacity of the strengthening system.

To eliminate both undesirable failure modes, a novel strengthening system, known as the Bar–Anchor–Fiber (BAF) system, was proposed by Banijamali and colleagues in 2015. Despite its simple mechanism and ease of fabrication, the BAF system has been shown to effectively prevent the occurrence of these unfavorable failures. Accordingly, the present

study employs the BAF system and compares its performance with that of conventional FRP strengthening techniques. Given that one of the key parameters governing the mobilization of tensile forces and the effectiveness of this system is the effective length of the reinforcing element, the performance of the BAF system is evaluated for different lengths of the strengthening component.

Research Methodology

The primary objective of this study was to evaluate the effectiveness of the Bar–Anchor–Fiber system in eliminating the concrete cover detachment (CCD) failure mode and enhancing the flexural performance of fiber-reinforced polymer–strengthened reinforced concrete beams. To achieve this objective, a comprehensive two-phase experimental program was designed and conducted.

In the first phase, the experimental methodology was formulated to examine the influence of different strengthening techniques—including the Externally Bonded Reinforcement on Grooves method, the Near-Surface Mounted method without anchorage, and the NSM method incorporating BAF anchorage—on the structural behavior of RC beams. In the second phase, the effect of rod length (115, 150, and 200 cm) within the NSM+BAF strengthening scheme was investigated to assess its role in improving load-carrying capacity and deformation characteristics.

A total of twelve RC beam specimens were fabricated with identical geometry, reinforcement layouts, and concrete properties. The only experimental variables were the strengthening technique and the rod length. All specimens were tested under four-point bending until failure. During the tests, crack initiation and propagation, failure modes, and the effects of mechanical restraint and transverse fibers were visually monitored. In addition, load–displacement responses were recorded to quantify flexural strength, ductility, and energy absorption capacity.

Experimental Results

In the first stage of the study, the results of four-point bending tests conducted on beams strengthened using different techniques were evaluated, including the reference group (REF), the grooving-based strengthening group, the near-surface mounted group without anchorage (NU115), and the NSM group strengthened with the BAF system (NA115). For each group, the average failure load and maximum deflection were determined, and the corresponding failure modes were identified.

Initially, visual inspections were performed to examine cracking behavior, crack initiation and propagation, failure locations and mechanisms, as well as the contribution of mechanical restraint and transverse fibers to performance enhancement. Subsequently, laboratory data were collected to construct load–displacement curves, from which the ultimate load-carrying capacity of each specimen was determined.

Conclusion

This experimental study examined the effectiveness of different flexural strengthening techniques for reinforced concrete beams, with particular emphasis on the role of the Bar–Anchorage–Fiber system in mitigating concrete cover detachment failure. The results indicated that strengthening with CFRP using the Externally Bonded Reinforcement on Grooves method enhanced load-bearing capacity and delayed crack propagation compared with the reference specimens. However, premature localized debonding between the CFRP and the concrete surface limited the full utilization of the reinforcement capacity.

Beams strengthened using the Near-Surface Mounted technique without anchorage (NU115) demonstrated improved resistance to environmental effects and achieved higher load capacity relative to the REF and EBROG specimens. Nevertheless, their structural performance remained governed by CCD failure, which restricted the contribution of the CFRP reinforcement, particularly under higher load levels.

In contrast, the implementation of the BAF system effectively suppressed CCD failures. Specimens with an anchorage length of

115 cm (NA115) exhibited a substantial increase in load-bearing capacity and a transition in failure mode from brittle CCD to a mixed tensile–shear response. Furthermore, increasing the anchorage length to 150 and 200 cm led to additional improvements in flexural strength, ductility, and energy absorption capacity, enabling more effective utilization of the CFRP reinforcement. These findings underscore the critical role of anchorage length in mobilizing the reinforcing bars and in transforming the failure mechanism from sudden brittle behavior to a more controlled and predictable response.

Overall, the results confirm that the BAF system provides a highly effective strengthening strategy for RC beams by overcoming the primary limitations of conventional EBR methods. Through improved stress transfer and enhanced anchorage efficiency, the BAF system significantly increases ultimate load-carrying capacity, ductility, and structural safety, offering a reliable solution for the long-term strengthening and durability of RC structures subjected to flexural demands.

Funding Statement

This research received no specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Seyed Hossein Mazaheri:

Experimental work, data analysis, writing-original draft, investigation.

Seyed Ahmad Mobinipour:

Methodology; Supervision; Writing – review & editing.

Seyed Mohammad Banijamali:

Conceptualization (main idea); methodology; review & editing.

بررسی عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف در حذف مود شکست جداسازی پوشش بتن در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با FRP

سیدحسین مظاهری^۱، سیداحمد مبینی پور^۲، سید محمد بنی‌جمالی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: Hossein.Mazaheri@stu.qom.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: mobinipour@qom.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: Mohammad.Banijamali@stu.qom.ac.ir

چکیده

تقویت خمشی سازه‌های بتن آرمه با استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهسازی و ارتقای عملکرد سازه‌ها شناخته می‌شود. با این حال، وقوع شکست‌های زودرس نظیر جداسازی ورقه FRP از سطح بتن و جداسازی پوشش بتن از وجه کششی عضو تقویت‌شده، مانع بهره‌برداری کامل از ظرفیت FRP است. در این پژوهش، یک برنامه آزمایشگاهی در دو مرحله طراحی و اجرا گردید. در این برنامه، ۱۲ نمونه تیر بتن آرمه در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. در مرحله اول، هشت تیر در قالب چهار گروه اصلی شامل تیرهای شاهد، تیرهای تقویت‌شده با روش شیارزنی با نصب ورقه بر روی شیار، تیرهای تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح و بدون مهاری (NU115) و تیرهای NSM مجهز به روش میله-مهاری-الیاف (NA115) دسته‌بندی شدند. در مرحله دوم، به منظور ارزیابی اثر طول نمونه بر روی عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف، چهار نمونه تیر تقویت‌شده با تکنیک میله-مهاری-الیاف با طول‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر (NA150، NA200) ساخته شدند. نتایج نشان داد روش BAF موجب حذف کامل CCD شده و ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری تیرها را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. به‌طور خاص، ظرفیت باربری گروه NA115 نسبت به تیر شاهد تا ۷۱٪ افزایش یافت. همچنین، افزایش طول نمونه موجب ارتقای عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف در زمینه بهبود ظرفیت خمشی و تغییر شکل نهایی شد، به‌گونه‌ای که تیرهای NA200 بالاترین عملکرد را ثبت کردند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم مهاری انتهایی در میله‌های HMFPR و نیز طول این میله‌ها در سیستم میله-مهاری-الیاف، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهره‌برداری کامل از ظرفیت CFRP داشته و روش BAF یک راهکار عملی و مؤثر برای افزایش ظرفیت باربری سازه‌های بتن آرمه تقویت‌شده با FRP به‌شمار می‌رود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

کلیدواژه‌ها:

تقویت خمشی با FRP،
جداسازی پوشش بتن،
روش شیارزنی بیرونی،
روش نصب نزدیک به سطح،
سیستم میله-مهاری-الیاف.

استناد: مظاهری سید حسین، مبینی‌پور سید احمد، بنی‌جمالی سید محمد. بررسی عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف در حذف مود شکست جداسازی پوشش بتن در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با FRP. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۴۷-۵۸.

<https://doi.org/10.22091/cer.2026.14023.1658>

۱- مقدمه

بنی جمالی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به نام سیستم میله-مهاریالیاف (BAF^{۱۱}) پیشنهاد گردید که علیرغم مکانیزم ساده و سهولت ساخت، به نحو موفقی از وقوع مودهای شکست نامطلوب جلوگیری می کند [۱]. از همین رو در این پژوهش از این سیستم تقویت در مقایسه با سایر روش های معمول در زمینه تقویت با FRP استفاده گردیده و از آن جا که یکی از پارامترهای محتمل در بسیج نیروهای کششی در این سیستم تقویت و کارایی این تکنیک، طول عامل تقویت کننده^{۱۲} می باشد عملکرد آن در طول ها مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

استفاده از FRP ها در انواع و اشکال مختلف آن در پژوهش های متعددی گزارش گردیده است که رایج ترین نوع کاربرد آن استفاده از ورقه ها و میله های FRP می باشد. استفاده از ورقه های FRP به شکل متداول آن یعنی روش های خانواده EBR با مشکل شکست در سطح تماس چسب و بتن و به دنبال آن جداولی ورقه از وجه عضو تقویت شده روبرو هستند. استفاده از میله های FRP نیز که عمدتاً به روش نصب در نزدیک سطح به کار گرفته می شوند به دلیل ماهیت غیرشکل پذیر و عدم خم پذیری، از مهارهای انتهایی کافی و مناسب در بتن بی بهره هستند و همین مسئله، مهم ترین نقطه ضعف این نوع از اشکال FRP ها می باشد که کاربرد آن ها را به شدت محدود نموده است. از همین رو، برخی پژوهش ها روش های ابداعی جهت تعبیه مهارهای انتهایی بر روی FRP ها پیشنهاد نموده اند که منجر به تولید انواع دست سازی از محصولات FRP شده است. در یکی از این پژوهش ها، جلالی و همکاران، در دانشگاه سمنان با رول نمودن پارچه های CFRP به دور یک میله چوبی و سپس ایجاد مهارهای T شکل با استفاده

یکی از کامپوزیت های بسیار مهم که امروزه جای خود را در صنعت ساختمان به خوبی باز کرده است پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP^۱) هستند که در اشکال و انواع مختلفی نظیر ورقه ها، پارچه ها، تسمه ها و حتی مقاطع I شکل و قوطی شکل مورد استفاده قرار می گیرند. رایج ترین روش استفاده از مصالح FRP که روش تسلیح با اتصال خارجی (EBR^۲) می باشد، به دلیل سهولت اجرا و تأثیر مثبت در بهبود ظرفیت خمشی به طور گسترده به کار می رود. با این حال، یکی از مهم ترین ضعف های عملکردی روش EBR، وقوع زود هنگام مود شکست جداولی ورقه FRP از سطح بتن^۳ است که باعث می شود قبل از آن که از تمام یا بخش قابل توجهی از ظرفیت مصالح FRP استفاده گردد، سیستم تقویت دچار شکست گردد. به منظور مقابله با این مود شکست نامطلوب، روش های گوناگونی نظیر روش های شیارزنی (EBROG^۴)، روش سوراخ زنی^۵، روش نصب با چفت و بست مکانیکی (MF-EBR^۶)، روش نصب در نزدیک سطح (NSM^۷) و دیگر روش ها پیشنهاد گردیده است. اگرچه در این روش ها پژوهشگران موفق گردیده اند که مود شکست نامطلوب جداولی ورقه از سطح بتن را به تعویق بیندازند، ولی با این حال، بسیاری از این روش ها با مود شکست نامطلوب دیگری به نام جداولی مجموعه پوشش بتن و سیستم تقویت از وجه عضو تقویت شده^۸ مواجه می باشند که باعث می شود به ویژه زمانی که از درصدهای بالای تسلیح با FRP استفاده گردد این مود شکست حاکم گردیده و سیستم تقویت از باربری ساقط گردد. برای حذف هر دو مود شکست نامطلوب (جداولی ورقه FRP از سطح بتن^۹ و جداولی ورقه FRP و کاور بتن از وجه کششی^{۱۰}) یک سیستم ابداعی توسط

7- Near-Surface Mounted

8- Cover Delamination

9- Debonding

10- Delamination

11- Bar-Anchor-Fiber

12- Agent

1- Fiber Reinforced Polymers

2- Externally Bonded Reinforcement

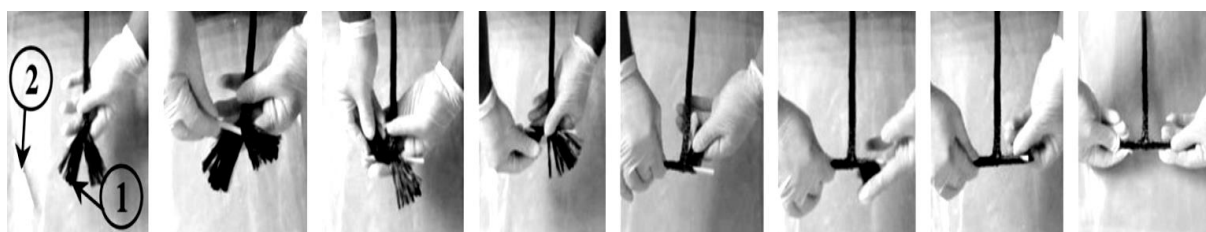
3- Debonding Failure

4- Externally Bonded Reinforcement On Grooves

5- Holing

6- Mechanically Fastened EBR

نوع مود شکست نامطلوب جداشدگی ورقه FRP از سطح بتن و جداشدگی ورقه FRP و کاور بتن غلبه می نمود. آن‌ها این سیستم ابداعی را میله-مهاری-الیاف و میله‌های دست‌ساز به کار رفته در آن را $HMFRP^{14}$ نام‌گذاری نمودند. بر مبنای نتایج گزارش شده در پژوهش آن‌ها، علاوه بر حذف مودهای شکست نامطلوب، از تمامی ظرفیت مصالح FRP استفاده شده (مود شکست مطلوب گسیختگی کامل میله FRP) و افزایش ظرفیتی معادل ۹۶ درصد در مقایسه با نمونه‌های مرجع گزارش گردید (شکل ۲) [۳].

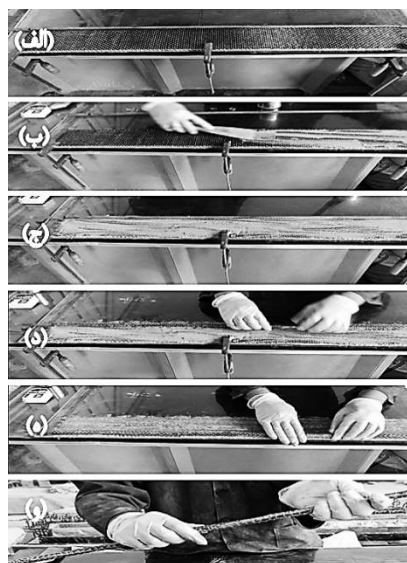


شکل ۱- روش ساخت مهار انتهایی میله‌های MMFRP: (۱) الیاف خشک در انتها (۲) هسته چوبی که الیاف به دور آن پیچیده می‌شوند

[۲]



شکل ۲- الف تا و) نحوه ساخت میله HMFRP، ز) مهار انتهایی میله‌های HMFRP [۱]



و کاور بتن از وجه کششی عبارتند از توزیع تنش برشی و عمودی در لایه چسب و بتن، تمرکز استرس در ناحیه انتهایی FRP یا نزدیکی ترک‌های داخلی و تفاوت سختی بین FRP و بتن. این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که

صلاحات^{۱۵} و همکاران با ترکیب کار تحلیلی و آزمایشگاهی، مود شکست CCD را در تیرهای بتن‌آرمه‌ای که با ورق‌های CFRP تقویت شده‌اند، بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که دلایل اصلی جداشدگی ورقه FRP

15- Salahat

13- Manually Made FRP rods

14- Hand Made FRP rods

در بسیاری از طراحی‌های مرسوم، این مود شکست پیش‌بینی نمی‌شود و به همین دلیل، ظرفیت نظری بالا با شکست واقعی فاصله دارد. نویسندگان پیشنهاد می‌کنند که در طراحی تقویت با FRP باید ضوابط جدید مبتنی بر مکانیک شکست^{۱۶} لحاظ شود، نه فقط مقاومت نهایی FRP یا طول چسبندگی [۴].

الگری^{۱۷} و همکاران، با به‌کارگیری روش‌های داده‌محور (GEP^{۱۸}) مدلی برای پیش‌بینی نیروی برشی لازم برای جدایش پوشش بتن در تیرهای بتن آرمه تقویت‌شده با FRP ارائه کرده‌اند. مدل آن‌ها براساس پارامترهایی مثل ضخامت پوشش بتن، نوع FRP، نوع چسب و شرایط بارگذاری ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر است تقریب قابل قبول (با دقت نسبتاً بالا) برای برآورد نیروی شکست به‌دلیل به‌دلیل جداولدگی ورقه FRP و کاور بتن از وجه کششی بدهد. این امر می‌تواند در طراحی و ارزیابی ایمنی اجرا بسیار مفید باشد [۵].

گنگ^{۱۹} و همکاران، یک مدل تحلیلی جدید برای پیش‌بینی شکست «جداولدگی پوشش بتن» در تیرهای بتن آرمه تقویت‌شده با نوارهای CFRP پیش‌تنیده به‌صورت NSM ارائه کرده‌اند. در این کار، شکل هندسی سطح شکست در ناحیه انتهای FRP با مدل «دندانه بتنی» ترکیب شده و بر این اساس، نمودارهای ممان-انحنای بار-تغییر مکان تا وقوع شکست پوشش بتن استخراج شده است. نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است بار نهایی، شکل منحنی بار-تغییر مکان و مود شکست CCD را با دقت خوبی پیش‌بینی کند. مطالعه پارامتریک آن‌ها تأکید می‌کند که سطح پیش‌تنیدگی CFRP تأثیر بسیار مهمی بر بروز و شدت شکست جداولدگی پوشش دارد و با تنظیم مناسب آن می‌توان شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی تیر تقویت‌شده را بهبود داد [۶].

ژنگ^{۲۰} و همکاران، یک مدل یادگیری ماشین تفسیرپذیر برای پیش‌بینی مود شکست CCD در تیرهای بتن آرمه تقویت‌شده با FRP ارائه کرده‌اند. آن‌ها روی یک پایگاه داده از تیرهای آزمایشگاهی که با مود CCD دچار شکست شده‌اند، چندین الگوریتم مختلف (رگرسیون خطی، SVR، شبکه عصبی، درخت تصمیم، Random Forest و XGBoost) را امتحان کرده و نشان می‌دهند که XGBoost دقیق‌ترین پیش‌بینی را ارائه می‌دهد. با استفاده از روش SHAP، اهمیت پارامترها تحلیل شده و مشخص می‌شود که «سهم بتن در نیروی برشی» و «تنش جاری شدن فولاد کششی» حساس‌ترین متغیرها برای وقوع CCD هستند. این مقاله پل خوبی بین مدل‌های مکانیکی کلاسیک و ابزارهای داده‌محور ایجاد می‌کند و نشان می‌دهد که مدل‌های گدی و پژوهشی موجود، در مقایسه با ML، گاهی بیش از حد محافظه‌کار یا برعکس، غیرایمن تخمین می‌زنند [۷].

سبزی و اصفهانی در یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر آرایش میلگردهای کششی را بر وقوع مود شکست «جداولدگی پوشش بتن» در تیرهای بتن آرمه تقویت‌شده با ورق‌های CFRP بررسی کرده‌اند. متغیرهای اصلی شامل نسبت آرماتور کششی و قطر میلگردها بوده است؛ نتایج نشان می‌دهد که تیرهای «بیش‌مسلح» نسبت به تیرهای با آرماتور متوسط یا کم، به شکل معنی‌داری مستعد CCD هستند. همچنین استفاده از تعداد بیشتر میلگرد با قطر کمتر، تنش‌های کششی متمرکز در پوشش بتنی را کاهش داده و احتمال CCD را کم می‌کند. این مقاله، نقش آرایش میلگرد فولادی را به‌عنوان یک پارامتر طراحی مهم برای کنترل مود جداولدگی پوشش بتن برجسته می‌کند [۸].

فو^{۲۱} و همکاران به‌طور مشخص بررسی می‌کنند که چگونه ژاکت‌های U شکل^{۲۲} FRP می‌توانند مود شکست CCD را در تیرهای بتن آرمه با ورق FRP چسبانده شده به

20- Zheng

21- Fu

22- U-jacket

16- fracture mechanics

17- Al-Ghery

18- Gene Expression Programming

19- Gong

نمونه بر روی عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف، چهار نمونه تیر تقویت شده با تکنیک میله-مهاری-الیاف با طول های ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی متر (NA200, NA150) ساخته شدند. به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمایش و حذف هرگونه خطای ناخواسته احتمالی در هر گروه، دو نمونه تیر مشابه ساخته و آزمایش گردید.

۳-۱- برنامه آزمایشگاهی و طرح اختلاط

۳-۱-۱- مشخصات مصالح

در این تحقیق از بتن با رده مقاومتی ۲۵ مگاپاسکال استفاده گردید. طرح مخلوط بتن مصرفی از شیوه اختلاط استاندارد آیین نامه ACI-211 برداشت شد [۱۰]. جزئیات طرح اختلاط و بعضی از خصوصیات بتن تازه مورد استفاده نظیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، کارایی (اسلامپ) و نسبت آب به سیمان در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای تسلیح تیرها از میلگردهای فولادی آج دار با قطرهای ۸ و ۱۰ میلیمتر و مقاومت مشخصه (f_y) ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده گردید. پارچه های FRP به کار رفته به منظور تقویت خمشی تیرها از نوع کربنی با الیاف تک جهته و با اسم تجاری QUANTOM Wrap 200C می باشد.

اشباع نمودن الیاف این پارچه با استفاده از رزین اپوکسی QUANTOM EPR 3301 صورت گرفته است. ویژگی های CFRP و رزین مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۱-۲- طراحی نمونه ها

پژوهش حاضر شامل ساخت و آزمایش ۱۲ نمونه تیر بتن آرمه، با نام گذاری و ویژگی های ارائه شده در جدول ۳ می باشد. مشخصات هندسی تیرها شامل طول دهانه خالص، مقطع عرضی و آرایش آرماتورهای طولی و خاموت ها به گونه ای انتخاب شد که رفتار خمشی غالب باشد. بتن مصرفی دارای مقاومت مشخصه معین بوده و برای تمامی نمونه ها از یک طرح اختلاط ثابت استفاده شد تا اثر تغییر مقاومت بتن حذف گردد. همانطور که از این جدول مشاهده

زیر تیر کاهش دهند. در برنامه آزمایشی آن ها، تیرهای تقویت شده با پیکربندی های مختلف ژاکت های U شکل (طول، گام، آرایش) تحت بارگذاری خمشی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که حضور ژاکت های U شکل مناسب، تنش های برشی و کششی متمرکز در پوشش بتن نزدیک انتهای ورق را کاهش داده و مود شکست را از CCD به شکست خمشی کلاسیک (خردشدگی بتن یا پارگی FRP) تغییر می دهد. همچنین ظرفیت نهایی و شکل پذیری به طور قابل توجهی افزایش می یابد. مقاله در انتها پیشنهادهایی برای طول و فواصل ژاکت های U شکل جهت جلوگیری عملی از CCD ارائه می کند [۹].

با وجود نوآوری و پتانسیل بالای این روش، تاکنون مطالعات آزمایشگاهی محدودی به بررسی جزئیات اجرایی و رفتار مکانیکی آن پرداخته اند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد سیستم میله-مهاری-الیاف در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه طراحی گردیده و تأثیر آن بر رفتار بار- تغییر مکان، ظرفیت نهایی باربری، شکل پذیری و مود شکست سازه ای مورد تحلیل قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

به منظور بررسی کارایی روش میله-مهاری-الیاف (BAF) در بهبود عملکرد خمشی تیرهای بتن آرمه و جلوگیری از مود شکست جداسازی پوشش بتن (CCD)، یک برنامه آزمایشگاهی جامع در دو مرحله طراحی و اجرا گردید. در این برنامه، ۱۲ نمونه تیر بتن آرمه در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه ای مورد آزمایش قرار گرفتند. در مرحله اول، هشت تیر در قالب چهار گروه اصلی شامل تیرهای شاهد (REF)، تیرهای تقویت شده با روش شیازنی با نصب ورقه بر روی شیار (EBROG)، تیرهای تقویت شده به روش نصب در نزدیک سطح (NSM) و بدون مهار (NU115) و تیرهای NSM مجهز به روش میله-مهاری-الیاف (NA115) دسته بندی شدند. در مرحله دوم به منظور ارزیابی اثر طول

می‌گردد نمونه‌ها در شش گروه انتخاب شده‌اند که جزییات و نتایج مربوط به طراحی آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. این گروه از نمونه‌ها بدون هرگونه تقویت خمشی ساخته شدند و به‌عنوان تیرهای شاهد برای مقایسه با گروه‌های تقویت‌شده در نظر گرفته شدند.

گروه تیرهای مرجع (REF)

جدول ۱- طرح اختلاط و خصوصیات بتن با مقاومت $f'c = 25 \text{ MPa}$

آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن نخودی (kg/m^3)	اسلامپ (cm)	نسبت آب به سیمان (W/C)	مقاومت مشخصه میانگین (MPa)
۲۲۸	۴۸۵	۸۶۷	۷۳۶	۸	۰/۴۷	۲۵

جدول ۲- ویژگی‌های ورق CFRP و رزین مورد استفاده

CFRP	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول ارتجاعی (GPa)	کرنش پارگی (%)
	۰/۱۱۱	۴۹۵۰	۲۴۰	۱/۵
رزین QUANTOM	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول ارتجاعی (GPa)	مدول خمشی (GPa)
	۰/۴	۴۵	۳/۵	۳۰۰۰

جدول ۳ - مشخصات نمونه‌ها

گروه	نماد	تعداد نمونه	طول نمونه (cm)	تعداد لایه‌های FRP	وضعیت مهاری
مرجع (بدون هرگونه آماده سازی)	REF	۲	۱۱۵	صفر	بدون مهاری
شیارزنی	EBROG	۲	۱۱۵	۲	بدون مهاری
نصب نزدیک سطح	NU115	۲	۱۱۵	۲	بدون مهاری
میله-مهاریالیاف	NA115	۲	۱۱۵	۲	مهاری شده
میله-مهاریالیاف	NA150	۲	۱۵۰	۲	مهاری شده
میله-مهاریالیاف	NA200	۲	۲۰۰	۲	مهاری شده

جدول ۴- جزییات ابعادی و میلگردگذاری تیرهای نمونه

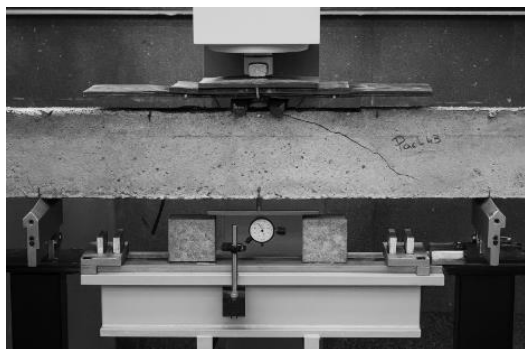
نماد نمونه‌ها	ابعاد تیر				آرماتورهای عرضی
	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	طول (mm)	عمق موثر (mm)	
RFE	۱۵۰	۲۰۰	۱۱۵۰	۱۴۵	۲Φ۱۰
EBROG	۱۵۰	۲۰۰	۱۱۵۰	۱۴۵	۲Φ۱۰
NU115	۱۵۰	۲۰۰	۱۱۵۰	۱۴۵	۲Φ۱۰
NA115	۱۵۰	۲۰۰	۱۱۵۰	۱۴۵	۲Φ۱۰
NA150	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰۰	۱۴۵	۲Φ۱۰
NA200	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۴۵	۲Φ۱۰

شیارزنی را بررسی کرده بودند انتخاب گردید. پس از حفر شیارها، داخل آن‌ها با رزین اپوکسی پر شد و پارچه‌های CFRP روی شیارها چسبانده و کاملاً اشباع شدند.

تیرهای تقویت‌شده به شیوه NSM-HMFRP بدون مهاری (NU)

گروه تیرهای تقویت‌شده به روش شیارزنی (EBROG)

در این گروه، شیارهایی با عرض ۸ و عمق ۱۰ میلی‌متر بر روی سطح کششی تیر ایجاد شد. ابعاد شیارها براساس مطالعات پیشین که بهینه‌سازی ابعاد در روش



شکل ۳- دستگاه جک فشاری با ظرفیت اسمی ۶۰ تن

۴- نتایج مشاهدات

۴-۱- نتایج مرحله اول آزمایش‌ها

در مرحله اول از تحقیق، نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای بر روی تیرهای تقویت‌شده به روش‌های مختلف: شامل گروه مرجع (REF)، گروه شیارزنی (EBROG)، گروه NU115 و گروه NA115 با مشخصات هندسی کاملاً یکسان شامل طول دهانه خالص، مقطع عرضی و آرایش آرماتورها طولی و خاموت‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج میانگین بار شکست و خیز حداکثر مربوط به هر گروه تعیین و توصیف نحوه شکست آنها مشخص گردید. در ابتدا با بررسی تصویری، رفتار ترک‌خوردگی، محل و نوع شکست، و تحلیل درصد بهبود عملکرد در اثر مهار مکانیکی و الیاف عرضی مورد بررسی قرار گرفت و سپس با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، نمودارهای بار-تغییر مکان ترسیم و ظرفیت نهایی تیرها برای هر نمونه تعیین گردید.

۴-۱-۱- نوع و محل مود شکست

نوع مود شکست در گروه‌های مختلف به شرح زیر مشاهده گردید:

چگونگی شکست نمونه مرجع (REF)

در این نمونه اولین ترک در بار حدود ۲۳۳۰ کیلوگرم در وسط دهانه ایجاد شد و به تدریج به سمت تکیه‌گاه‌ها گسترش یافت. در بار ۵۳۲۹ کیلوگرم خردشدگی بتن در ناحیه فشاری آغاز شد و خیز نهایی ۱۴/۶ میلی‌متر ثبت گردید. شکل ۴ نحوه شکست این نمونه را نشان می‌دهد.

در این روش، ابتدا پارچه‌های FRP در ابعاد مشخص بریده شده و با رزین اپوکسی اشباع گردید. سپس پارچه‌ها به دور یک میلگرد فولادی پیچیده شدند تا میله‌های HMFRP تولید شوند. برای نصب، شیارهایی مربعی با ابعاد ۲۰ میلی‌متر در وجه کششی تیر ایجاد شد. شیارها تا نیمه با رزین اپوکسی پر گردید، سپس میله‌ها درون شیارها قرار داده شده و در نهایت فضای باقی‌مانده با اپوکسی پر شد.

تیرها تقویت شده به شیوه NSM-HMFRP مهار شده (NA)

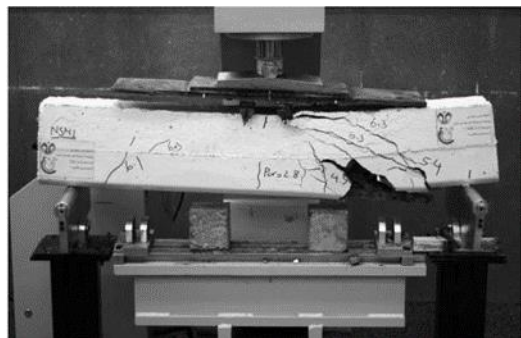
در روش NSM، هر چند از انواع مختلف مصالح FRP نظیر تسمه‌ها و میلگردها استفاده می‌شود، اما محدودیت اصلی این مصالح، ناتوانی در انتقال تنش به اعماق بتن و جداسازی احتمالی سیستم تقویت از سطح کششی تیر است. در این پژوهش، برای رفع این مشکل، میله‌های HMFRP با هسته فولادی مورد استفاده قرار گرفتند. خم کردن دو سر میلگردهای فولادی و نفوذ آن‌ها در بتن، موجب ایجاد یک سیستم مهار مکانیکی شد که از وقوع جدایش پوشش بتنی جلوگیری کرده و اتصال پایدار بین سیستم تقویت و بتن فراهم آورد. علاوه بر این، هسته فولادی ظرفیت باربری تیر را نیز افزایش داد.

۳-۲- آزمایش‌های انجام شده

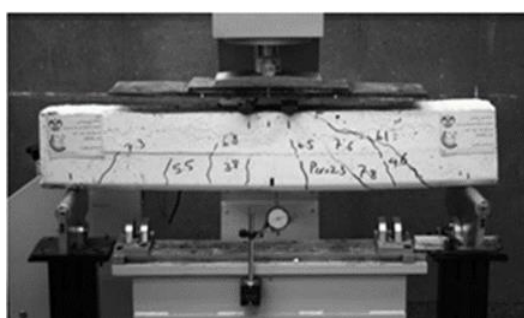
نمونه‌ها تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. به منظور اندازه‌گیری ظرفیت باربری تیرها از جک فشاری با ظرفیت ۶۰ تن طبق استاندارد ASTM C1018 استفاده شد [۱۱]. سرعت بارگذاری دستگاه در حد ۲ mm/min کنترل شده و کرنش‌سنج و دوربین ثبت تصاویر ترک‌ها به کار گرفته شد. شکل ۳ دستگاه تست را نمایش می‌دهد.

ظرفیت باربری نهایی، مودهای شکست و شکل‌پذیری به عنوان شاخص‌های کلیدی در این آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. تغییر مود شکست از CCD به گسیختگی کششی FRP یا خردشدگی کنترل‌شده بتن به طور ویژه تحلیل شد.

جدایش پوشش بتن رخ دهد. خیز نهایی برابر ۷/۴ میلی‌متر ثبت شد.



شکل ۶- چگونگی شکست نمونه NU115-1

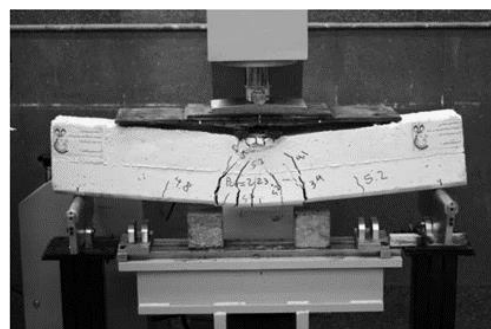


شکل ۷- چگونگی شکست نمونه NA115-1

از جمله دلایل وقوع شکست میله HMFRP در ناحیه یک‌سوم ابتدایی تیر را می‌توان کوتاه بودن طول تیر ذکر کرد. به بیان دیگر، تیرهای مورد بررسی در این گروه و به تبع آن میله‌های HMFRP به کار رفته در آن‌ها (که طول آن‌ها معادل ۸۰ درصد طول کل تیر می‌باشد)، به قدر کافی طولانی نبودند تا نیروی محوری در طول آن‌ها به طور کامل بسیج شود و مطابق انتظار در ناحیه با بیشترین تنش کششی (یعنی وسط دهانه) گسیخته گردند. از همین رو، در نواحی دارای بیشترین تمرکز تنش، نظیر نقطه اتصال مهارهای انتهایی به این میله‌ها که در یک‌سوم ابتدایی و انتهایی تیرها قرار دارند دچار گسیختگی گردید.

۴-۱-۲- نتایج بدست آمده از ظرفیت نهایی باربری

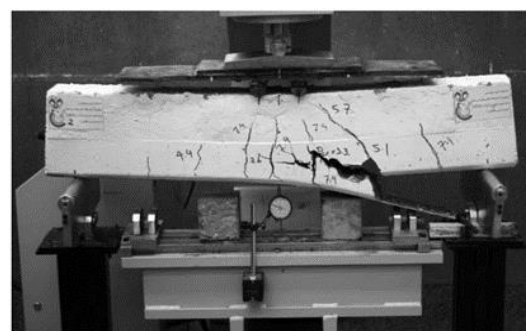
شکل ۸، مقایسه ظرفیت نهایی باربری نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. طول کلیه نمونه‌ها ۱۱۵ سانتی‌متر بوده و به منظور تقویت خمشی تیرهای گروه EBROG از دو لایه ورقه CFRP با ابعاد ۹۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و برای ساخت میله‌های HMFRP نیز از یک ورقه



شکل ۴- نحوه شکست نمونه REF-1

چگونگی شکست نمونه (EBROG)

ترک خوردگی اولیه در بار ۳۶۸۰ کیلوگرم ظاهر شد. در بارهای بالاتر، جدایش موضعی FRP و بتن آغاز و نهایتاً در بار ۶۷۶۶ کیلوگرم سیستم تقویت همراه با پوشش بتن از سطح کششی جدا شد. خیز نهایی ۱۱/۴ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. شکل ۵ نیز مود شکست این تیر را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- چگونگی شکست نمونه EBROG-1

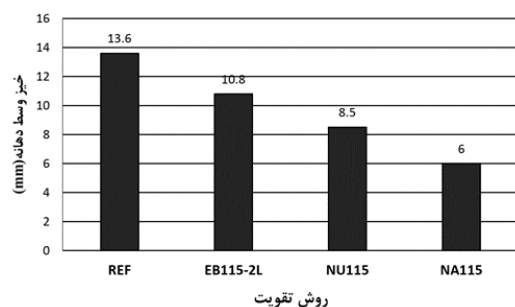
چگونگی شکست نمونه (NU115)

ترک اولیه این نمونه در بار ۲۸۹۴ کیلوگرم مشاهده شد. در بار ۶۳۳۴ کیلوگرم، بیشینه باربری ثبت شد و در این هنگام بخشی از میله HMFRP به همراه پوشش بتن جدا شد. خیز نهایی برابر ۸/۱ میلی‌متر بود (شکل ۶).

چگونگی شکست نمونه (NA115)

ترک اولیه در بار حدود ۲۳۰۰ کیلوگرم رخ داد. نهایتاً در بار ۹۸۳۰ کیلوگرم شکست ناقص میله HMFRP در ناحیه یک‌سوم ابتدایی تیر مشاهده گردید، بدون آنکه

می‌گردد، به نحوی که در گروه تیرهای NA115 در قیاس با نمونه‌های مرجع شاهد کاهش ۵۶٪ خیز هستیم. لازم به ذکر است گروه تیرهای NA115 که بیشترین ظرفیت باربری را از خود نشان دادند در بحث شکل پذیری تردترین حالت را نسبت به گروه‌های دیگر داشتند، به نحوی که نسبت به گروه‌های NU115 و EBROG به ترتیب ۲۹ و ۴۹٪ کاهش خیز حداکثر را نشان می‌دهند.



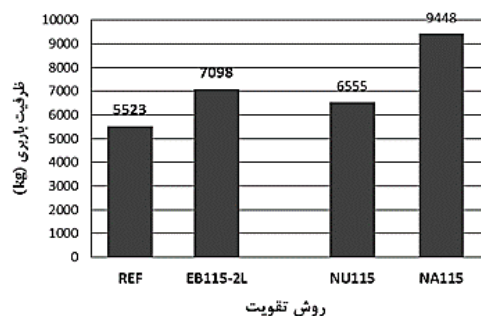
شکل ۹- مقایسه خیز حداکثر نمونه‌ها

جدول ۵ نیز میانگین بار شکست، تغییرمکان و مود شکست نمونه‌ها را ارائه می‌نماید. نتایج حاکی از آن است که اگرچه روش میل-مه‌ار-الیاف (NA115) موفق به حذف کامل شکست ناشی از جداسازی پوشش بتن شد، اما مود شکست به یک گسیختگی ناقص برشی-کششی تغییر یافت و بهره‌برداری کامل از ظرفیت CFRP تحقق نیافت. همچنین، محل شکست در محدوده یک‌سوم ابتدایی تیرها مشاهده شد که ناشی از تمرکز تنش در ناحیه اتصال مه‌ارهای انتهایی است.

جدول ۵- رفتار بار-تغییرمکان و حالت شکست نمونه‌ها

نماد	نمونه	بار (kg)	خیز (mm)	میانگین بار (kg)	میانگین خیز (mm)	مود شکست
مرجع	اول	۵۳۲۹	۱۴/۶	۵۵۲۳	۱۳/۶	خرد شدن بتن ناحیه فشاری
	دوم	۵۷۱۸	۱۲/۵			
EBROG	اول	۶۷۶۶	۱۱/۴	۷۰۹۸	۱۰/۸	در ابتدا جداسازی ورقه FRP و به دنبال آن جداسازی پوشش بتن
	دوم	۷۴۳۰	۱۰/۱			
NU115	اول	۶۳۳۴	۸/۱	۶۵۵۵	۸/۵	جداسازی پوشش بتن
	دوم	۶۷۷۷	۸/۹			
NA115	اول	۹۰۶۶	۷/۴	۹۴۴۸	۶	گسیختگی ناقص میل HMFRP
	دوم	۹۸۳۰	۴/۷			

CFRP با ابعاد ۹۰۰×۲۰۰ میلی متر استفاده گردیده است.



شکل ۸- مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها

نتایج این شکل نشان‌دهنده تأثیر مثبت روش‌های تقویت مختلف بر ظرفیت باربری و رفتار تیرها در برابر بارگذاری است، به نحوی که کمترین ظرفیت باربری مربوط به تیرهای مرجع با میانگین بار شکست ۵۵۲۳ کیلوگرم و بالاترین ظرفیت باربری مربوط به گروه تیرهای NA115 با میانگین بار شکست ۹۴۴۸ کیلوگرم است. این نتایج بیانگر افزایش میانگین ظرفیت نهایی باربری تیرها در نمونه‌های NA115 با بیش از ۷۱ درصد نسبت به نمونه‌های مرجع می‌باشد.

۴-۱-۳- رفتار بار-تغییرمکان

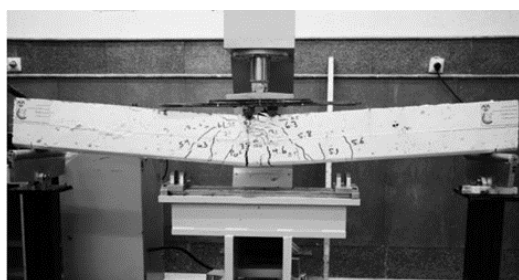
شکل ۹، مقایسه خیز وسط دهانه نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌گردد استفاده از تقویت تیرها با الیاف در هر روش به کار گرفته شده باعث سخت شدن تیر تقویتی و ترد شدن آن

ادامه یافت و در بار ۷۸۴۰ کیلوگرم شواهد اولیه جدایش چسب در ناحیه میانی دهانه ثبت شد.



شکل ۱۰- چگونگی شکست نمونه NA150-1

با افزایش بارگذاری، فرآیند گسیختگی الیاف بیرونی FRP و توسعه ترک‌ها از یک‌سوم میانی تیر به سمت تکیه‌گاه‌ها ادامه داشت. در نهایت، در بار ۴۳۹۸۰ کیلوگرم میلگرد HMFRP و ورقه FRP پیچیده شده به دور آن به طور همزمان دچار گسیختگی نهایی شدند (شکل ۱۱). میزان خیز وسط دهانه در این لحظه ۳۶ میلی‌متر به ثبت رسید.



شکل ۱۱- چگونگی شکست نمونه NA200-1

این الگوی گسیختگی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مهارهای انتهایی در این روش تقویت است؛ به‌گونه‌ای که وجود مهارها مانع از وقوع شکست ناشی از جداسازی پوشش بتن گردید و امکان بهره‌برداری کامل‌تری از ظرفیت تقویت‌کننده FRP فراهم شد.

۴-۲-۳ - نتایج مرحله دوم در ظرفیت نهایی باربری

در این بخش از پژوهش، اثر طول تیرهای تقویت‌شده بر نحوه‌ی شکست سیستم میله-مهاریالاف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های این مرحله در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج جدول ۶، افزایش طول تیرها تأثیر بسزایی بر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اعضای تقویت‌شده داشته است.

این امر بیانگر آن است که کوتاه بودن طول تیرها مانع از بسیج کامل نیروی محوری در میله‌های HMFRP شده و گسیختگی به جای وسط دهانه، در نواحی انتهایی رخ داده است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کارایی واقعی سیستم میله-مهاریالاف وابسته به طول تیر است. به عبارت دیگر، کوتاه بودن تیرها نه تنها مانع از استفاده کامل از ظرفیت CFRP می‌شود، بلکه موجب غالب شدن مودهای شکست غیرمطلوب می‌گردد. بر همین اساس، ضرورت انجام مرحله دوم آزمایش‌ها مطرح شد تا تأثیر افزایش طول تیرها (۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) بر مکانیزم شکست، ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۲-۲ - مرحله دوم آزمایش‌ها

در این مرحله، دو گروه نمونه تیرهای تقویت شده با روش میله-مهاریالاف با شرایط یکسان و طول‌های متفاوت ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند، تا تأثیر طول نمونه‌ها بر روی نحوه شکست سیستم تقویت مشخص گردد.

۴-۲-۱ - نتایج آزمایش گروه نمونه NA150

اولین ترک در این نمونه در بار حدود ۳۵۹۰ کیلوگرم مشاهده شد. با ادامه بارگذاری، روند انتشار ترک‌ها در تیر شدت گرفت تا اینکه در بار ۷۱۴۴ کیلوگرم نشانه‌های اولیه جدایش چسب در ناحیه میانی دهانه ظاهر گردید. با افزایش تدریجی بار، گسیختگی الیاف بیرونی FRP و گسترش ترک‌ها از یک‌سوم میانی تیر به سمت تکیه‌گاه‌ها مشاهده شد. در نهایت، در بار ۲۵۹۴۷ کیلوگرم، میلگرد HMFRP و ورقه FRP پیرامون آن به طور همزمان دچار گسیختگی کامل شدند (شکل ۱۰). میزان خیز وسط دهانه در این مرحله ۲۸ میلی‌متر ثبت گردید.

۴-۲-۲ - نتایج آزمایش گروه نمونه NA200

اولین ترک در این نمونه در بار حدود ۳۵۰۰ کیلوگرم مشاهده گردید. روند گسترش ترک‌ها با ادامه بارگذاری

همان گونه که در مرحله نخست آزمایش ها مشاهده شد، تیرهای گروه NA115 دارای میانگین بار شکست ۹۴۴۸ کیلوگرم و میانگین خیز نهایی ۶ میلی متر بودند.

جدول ۶- رفتار بار- تغییر مکان و حالت شکست نمونه های مرحله دوم

نماد	نمونه	بار (kg)	خیز (mm)	میانگین بار (kg)	میانگین خیز (mm)	مود شکست
NA150	اول	۲۲۴۵۰	۲۸	۲۴۱۹۸/۵	۲۴/۵	گسیختگی جزئی میله HMFRP
	دوم	۲۵۹۴۷	۲۱			
NA200	اول	۴۳۹۸۰	۳۶	۴۱۹۱۵	۴۰/۵	گسیختگی کامل میله HMFRP
	دوم	۳۹۸۵۰	۴۵			

رخ داد و بهره برداری کامل از ظرفیت تقویت کننده فراهم نشد.

بررسی تیرهای تقویت شده با روش NSM بدون مهار (NU115) نشان داد که اگرچه این روش در مقایسه با EBROG حفاظت بهتری در برابر عوامل محیطی و افزایش نسبی ظرفیت باربری ایجاد می کند. با این حال، مود شکست جدایش پوشش بتن (CCD) همچنان عامل محدود کننده عملکرد این گروه بود و مانع بهره برداری کامل از ظرفیت مقاومتی CFRP گردید.

در مقابل، به کارگیری سیستم میله-مهار-الیاف توانست این محدودیت را به طور مؤثری برطرف سازد. نمونه های مجهز به BAF با طول مهار ۱۱۵ سانتی متر افزایش محسوسی در ظرفیت باربری و تغییر مود شکست از جدایش پوشش بتن به گسیختگی ترکیبی کششی-برشی را نشان دادند. با این حال، نتایج مرحله دوم آزمایش ها آشکار ساخت که افزایش طول نمونه ها به ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی متر منجر به ارتقای چشمگیر مقاومت خمشی و شکل پذیری گردید و امکان بهره برداری کامل از ظرفیت CFRP فراهم شد. این موضوع، بیانگر آن است که طول عامل تقویت کننده یکی از پارامترهای کلیدی در بهبود عملکرد سازه ای و تغییر رفتار شکست از حالت ترد و ناگهانی به حالت کنترل شده و مورد انتظار است.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که سیستم میله-مهار-الیاف می تواند به عنوان یک راهکار مقاوم سازی مؤثر، ضعف اصلی روش های متداول مانند

در مرحله دوم، تیرهای گروه NA150 میانگین بار شکست ۲۴۱۹۸/۵ کیلوگرم و میانگین خیز نهایی ۲۴/۵ میلی متر را نشان دادند و تیرهای گروه NA200 به ترتیب با میانگین بار شکست ۴۱۹۱۵ کیلوگرم و میانگین خیز نهایی ۴۰/۵ میلی متر عملکرد قابل توجهی از خود بروز دادند.

این افزایش ظرفیت باربری همراه با ارتقای تغییر شکل پذیری تیرها، بیانگر نقش کلیدی طول نمونه ها در بهبود رفتار سازه ای سیستم تقویت است. به ویژه در نمونه های بلندتر (NA200)، سیستم میله-مهار-الیاف امکان بسیج کامل تری از ظرفیت مصالح تقویت کننده را فراهم نموده و شکست به صورت گسیختگی کامل میله HMFRP رخ داده است؛ در حالی که در نمونه های کوتاه تر، شکست غالباً به صورت گسیختگی جزئی مشاهده گردید.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به صورت آزمایشگاهی به بررسی کارایی روش های مختلف تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه و به ویژه نقش سیستم میله-مهار-الیاف (BAF) در حذف مود شکست جداشدگی پوشش بتن (CCD) پرداخت. یافته ها نشان دادند که استفاده از CFRP در روش شیارزنی با نصب ورقه بر روی شیار (EBROG) موجب بهبود ظرفیت باربری و کنترل ترک ها نسبت به تیرهای شاهد گردید؛ اما همچنان به دلیل ضعف در سطح تماس میان میلگردهای وجه کششی تیر و پوشش بتن در این ناحیه، مود شکست CCD

EBR را برطرف کرده و با ایجاد انتقال تنش پایدار، موجب ایمنی و دوام سازه‌های بتن‌آرمه تحت بارهای خمشی گردد. افزایش ظرفیت باربری نهایی، بهبود شکل‌پذیری و ارتقای

References

- [1] Banijamali SM. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using handmade HMFRP bars. Master's thesis. Mashhad (Iran): Ferdowsi University of Mashhad; 2015. [In Persian]
- [2] Jalali M, Sharbatdar MK, Fei-Chen J, Jandaghi Alae F. Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars. *Construction and Building Materials*. 2011; 36: 990-1000. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.068**
- [3] BaniJamali M; Isfahani M, NosratElahi S. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using MMFRP bars and near-surface mounting (NSM) method. 9th National Civil Engineering Congress, Noshirvani University of Babol, Babol. 2015. [In Persian]
- [4] Salahat FH, Rasheed HA, Ashqar HI. Explaining concrete cover delamination failure mechanisms in CFRP strengthened RC beams to propose mechanics-based design approach. *Structures*. 2024; 63: 106295. **doi: 10.1016/j.istruc.2024.106295**
- [5] Al-Ghrery K, Kalfat R, Al-Mahaidi R, Oukaili N, Al-Mosawe A. Prediction of concrete cover separation in reinforced concrete beams strengthened with FRP. *Journal of Composites for Construction*. 2021 Aug 1; 25(4): 04021022. **doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001130**
- [6] Gong S, Deng X, Song Z, Yuan B, Dai L, Peng H. Analytical model for concrete cover separation in prestressed near-surface mounted CFRP-strengthened RC beams. *Buildings*. 2025; 15(4): 600. **doi: 10.3390/buildings15040600**
- [7] Zheng S, Hu T, Yu Y. Interpretable machine-learning-based prediction model for concrete cover separation of FRP-strengthened RC beams. *Materials*. 2024; 17(9): 1957. **doi: 10.3390/ma17091957**
- [8] Sabzi J, Esfahani MR. Effects of tensile steel bars arrangement on concrete cover separation of RC beams strengthened by CFRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2018; 162: 470-479. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.053**
- [9] Fu B, Teng JG, Chen JF, Chen GM, Guo YC. Concrete cover separation in FRP-plated RC beams: Mitigation using FRP U-jackets. *Journal of Composites for Construction*. 2016; 21(3): 04016077. **doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000721**
- [10] American Concrete Institute (ACI). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ACI 211.1-91 (Reapproved 2009). Farmington Hills (MI): ACI; 2009.
- [11] ASTM International. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM C1018-97. 1997.