



## بررسی تجربی عملکرد تیرهای بتنی مقیاس و تقویت شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح با کامپوزیت های FRP تحت بارگذاری ضربه ای متوالی

امیرعلی حسین نیا<sup>1</sup>، محمد زمان کبیر<sup>2\*</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413، mzkabir@aut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/12/15

پذیرش: 1403/04/20

### کلیدواژگان

تیر بتن آرمه،

کامپوزیت

روش نصب در نزدیک سطح،

بارگذاری ضربه با سرعت پایین

در این تحقیق، مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با مصالح کامپوزیتی به روش تقویت نصب در نزدیک سطح صورت گرفته است. در این روش جدایش کامپوزیت به تعویق افتاده و این مصالح کمتر در برابر شرایط محیطی نامناسب قرار می گیرند. در این پژوهش، پس از دستیابی به طرح اختلاط مناسب برای بتن و انجام آنالیز ابعادی به منظور مقیاس نمودن نمونه های آزمایشگاهی، شش نمونه تیر بتنی ساخته شد. این شش نمونه به دو گروه تقسیم شده و یک گروه تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین و گروه دیگر تحت بارگذاری خمشی استاتیکی قرار گرفتند. در هر گروه یک نمونه کنترل بدون تقویت در نظر گرفته شده است. همچنین دو عدد از تیرها با استفاده از میلگرد کامپوزیتی شیشه و دو عدد دیگر با استفاده از صفحات کامپوزیتی کربن تقویت شده اند. طبق نتایج، تیرهای تقویت شده با صفحات کربن و آرماتور کامپوزیتی شیشه به ترتیب 15.3٪ و 24.7٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت خمشی را تحت بارگذاری خمشی استاتیکی تجربه نمودند. علاوه بر این، میزان تغییر مکان حداکثر این نمونه ها در وسط دهانه تحت بارگذاری ضربه به ترتیب 23.36٪ و 40٪ کاهش یافته است. بر این اساس، می توان نتیجه گیری کرد که تیرهای بتنی تقویت شده با مصالح کامپوزیتی به روش تقویت نصب در نزدیک سطح عملکرد مطلوبی را تحت بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می دهند.

## Experimental performance assessment of scaled-down FRP-retrofitted reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading using near surface mounted method

Amirali Hosseinnia<sup>1</sup>, Mohammad Zaman Kabir<sup>1\*</sup>

1- Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mzkabir@aut.ac.ir

### Keywords

Reinforced concrete beam,  
FRP composites,  
Near Surface Mounted method,  
Low-velocity impact loading

### Abstract

In this research, experimental and numerical studies have been conducted to investigate the performance of concrete beams reinforced with FRP materials using the Near Surface Mounted (NSM) reinforcement method. In this method, the separation of FRP is delayed, and these materials are less exposed to adverse environmental conditions. In this study, after achieving a suitable mix design for concrete and performing dimensional analysis for scaling laboratory samples, six concrete beam samples were constructed. These six samples were divided into two groups, one subjected to low-velocity impact loading and the other to static bending loading. In each group, a control sample without reinforcement was considered. Additionally, two of the beams were reinforced using GFRP rebars, and the other two were reinforced with CFRP composite plates. According to the results, the beams reinforced with CFRP plates and GFRP rebars experienced an increase in flexural strength by 15.3% and 24.7%, respectively, compared to the control sample under static bending loading. Furthermore, the maximum displacement of these samples at the mid-span under impact loading decreased by 23.36% and 40%, respectively. Also, due to the increased stiffness of the FRP-reinforced samples, the acceleration at the center of the span in these beams significantly increased compared to the control sample. Based on this, it can be concluded that concrete beams reinforced with FRP materials using the NSM method show satisfactory performance under static and dynamic loading.

Please cite this article using:

Hosseinnia, A., Kabir, M. Z., "Experimental performance assessment of scaled-down FRP-retrofitted reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading using near surface mounted method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2401-2407, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2024091.1878>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1-مقدمه

آمار قابل توجه خسارت‌های جانی و مالی ناشی از عملکرد نامناسب سازه‌های موجود، اهمیت موضوع مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح را دوچندان کرده است. از مهم‌ترین دلایل مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌های بتن مسلح می‌توان به زوال بتن، خوردگی آرماتورها، قدیمی شدن سازه‌های بتنی، به روز شدن آیین‌نامه‌ها، نواقص اجرایی و طراحی، تغییر کاربری و وقوع حوادث غیرقابل پیش‌بینی مانند زلزله‌های شدید اشاره نمود.

یک روش بسیار کارآمد برای بهبود ظرفیت باربری سازه‌های بتن مسلح موجود، استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف<sup>1</sup> می‌باشد. این مواد از قرار دادن الیاف داخل ماتریس رزین ساخته می‌شوند که هر بخش از اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها، دارای خواص مکانیکی ویژه‌ای می‌باشد [1]. طی سال‌های اخیر، استفاده از این مصالح به عنوان روش جایگزین سایر تکنیک‌های مقاوم‌سازی مرسوم مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. مقاومت در برابر خوردگی، نسبت مقاومت به وزن بالا، عدم افزایش قابل توجه بار مرده سازه و دوام بالا از مهم‌ترین مزایای این مصالح می‌باشند [2].

تحقیقات گسترده‌ای در سراسر جهان بر روی روش مقاوم‌سازی تسلیح خارجی<sup>2</sup> به‌وسیله کامپوزیت صورت گرفته است که در آن این مصالح توسط رزین اپوکسی به وجه کششی عضو بتنی متصل می‌شوند. در این روش، احتمال جداشدگی زودرس ورق‌های کامپوزیتی وجود داشته و این مصالح در معرض شرایط زیست‌محیطی نامناسب مانند خوردگی و تغییرات دما قرار دارند. به منظور جبران معایب روش تسلیح خارجی، روش مقاوم‌سازی نصب در نزدیک سطح<sup>3</sup> معرفی گردید. در سال 2004، ال‌هاجا و ریزکالا [3] در تحقیقی عملکرد تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح و تسلیح خارجی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هشت عدد تیر T شکل با تکیه‌گاه‌های ساده تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته‌اند. یکی از نمونه‌ها به منظور کنترل بدون هیچ تقویتی ساخته شده و سایر نمونه‌ها با انواع مختلف مصالح کامپوزیتی تقویت‌شده‌اند. در این تحقیق اثر نوع الیاف (شیشه و کربن) و شکل تقویت‌کننده (میلگرد و نوار) و همچنین عملکرد میلگردها و نوارهای کامپوزیتی در این دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، طول اتصال و سفتی محوری تمام میلگردها و نوارهای کامپوزیتی ثابت در نظر گرفته شده است. طبق نتایج، مقاومت نهایی نمونه‌هایی که به روش نصب در نزدیک سطح تقویت‌شده‌اند از 69٪ تا 99٪ افزایش یافته است. از سوی دیگر، استفاده از این روش باعث کاهش خیز و عرض ترک می‌گردد. بدین ترتیب طبق این بررسی، روش تقویت نصب در نزدیک سطح نسبت به تسلیح خارجی مؤثرتر می‌باشد. از سوی دیگر، ژینگ و همکاران [4] در سال 2018 در تحقیقی تیرهای بتنی را با استفاده از میلگردهای پلیمری شیشه و آلومینیوم به روش نصب در نزدیک سطح تقویت کردند. طبق نتایج، با وجود اینکه تیرهای بتنی تقویت‌شده با میلگرد کامپوزیتی شیشه مقاومت خمشی بیشتری را تجربه کرده‌اند، اما تیرهای تقویت‌شده با میلگردهای آلومینیوم رفتار شکل‌پذیرتری را از خود بروز دادند. علاوه بر لزوم بررسی عملکرد اعضای بتنی تقویت‌شده با مصالح کامپوزیتی تحت بارهای استاتیکی، ارزیابی رفتار دینامیکی این اعضا نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به عنوان مثال، عامل اصلی شروع خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها برخورد مصالح طبقات فوقانی بر روی المان‌های سازه‌ای بوده که شناسایی رفتار اعضای سازه‌ای در برابر این برخوردها مهم می‌باشد.

همچنین، حرکت وسایل نقلیه و گاهی برخورد آن‌ها با المان‌های سازه‌ای پل‌ها نمونه‌ای از بار ضربه‌ای می‌باشد. رفتار اعضای بتنی در برابر بارهای آنی مانند ضربه با عملکرد آن‌ها در برابر بارهای استاتیکی متفاوت می‌باشد. این اعضا در برابر این شکل از بارگذاری فرصت تغییر شکل کافی نداشته و عملکرد تردتری را از خود بروز می‌دهند. در این خصوص، ارکی و همکاران [5] رفتار چهار عدد تیر بتنی به طول 8 متر را تحت بار ضربه مورد ارزیابی قرار دادند. در این آزمایش دو عدد از تیرها با صفحات کامپوزیتی کربن و دو تیر دیگر با صفحات فولادی مقاوم‌سازی شده بودند. اعمال بار ضربه در این تحقیق به صورت بلند کردن یک سر تیر و رها کردن آن بوده است. طبق نتایج، با یکسان بودن میزان مقاومت کششی فولاد و کامپوزیت کربن در این تحقیق، تیرهای بتنی تقویت‌شده با صفحات کامپوزیتی با توجه به عدم جذب انرژی مشابه با تیرهای تقویت‌شده با صفحات فولادی، رفتار قابل قبولی را از خود نشان داده‌اند. همچنین، تنگ و سعادت منش [6] در تحقیقی عملکرد تیرهای بتنی بدون آرماتور برشی را تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، از چندلایه‌های کولار و کربن برای تقویت تیرهای بتنی استفاده شده بود. این صفحات به منظور مقاومت در برابر ممان‌های مثبت و منفی در دو وجه فوقانی و تحتانی نمونه‌ها متصل شده بودند. طبق نتایج، تیرهای تقویت‌شده نسبت به تیرهای بدون مقاومت عملکرد بهتری در برابر ضربه از خود نشان داده و تغییرمکان حداکثر نمونه‌های تقویت‌شده با کامپوزیت تحت بار ضربه بین 30٪ تا 40٪ کاهش داشته است. فام و هو [7] نیز عملکرد تیرهای بتنی بدون آرماتور برشی را تحت ضربه و خمش مورد بررسی قرار داده‌اند. تفاوت این تحقیق با پژوهش‌های قبلی بررسی تأثیر آرایش نوارهای کربن بر عملکرد این نمونه‌ها می‌باشد. طبق این تحقیق، دو آرایش U شکل و نوارهای مورب با زاویه 45 درجه به عنوان طرح تقویت برشی تیرهای بتنی در نظر گرفته شدند. طبق نتایج این آزمایش، با ثابت بودن تعداد نوارهای کامپوزیتی کربن، استفاده از آرایش 45 درجه تأثیر بهتری نسبت به آرایش U شکل در زمینه افزایش ظرفیت باربری در برابر بارهای ضربه‌ای دارد. همچنین، امین اکبری و همکاران در سال 2024 در پژوهشی بهبود رفتار تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردهای کامپوزیتی شیشه تحت بار ضربه را در کاهش خیز حداکثر و پسماند نسبت به تیرهای بتنی ساخته شده با میلگردهای فولادی اثبات نمودند [8]. یکی دیگر از تحقیقاتی که در آن از بارگذاری خمش استاتیکی و ضربه در کنار هم استفاده شده است مربوط به پژوهش کیشی و همکاران [9] می‌باشد. در این آزمایش، از ورق‌های کربن و آرامید برای مقاوم‌سازی تیرهای بتنی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این آزمایش سفتی محوری کامپوزیت‌ها تا حد امکان برابر در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، با توجه به تقویت خمشی، میزان تغییرمکان حداکثر و پسماند در تیرهای تقویت‌شده به ترتیب 30٪ و 60٪ نسبت به تیر بدون تقویت کاهش یافته است. از طرفی، عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح را می‌توان با استفاده از آنالیز عددی پیش‌بینی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. در این راستا، حسین‌نیا و کبیر [10] با استفاده از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس این امر را محقق ساختند.

## 2- ضرورت انجام پژوهش و اهداف طرح

با توجه به موارد عنوان شده، تا کنون تحقیقی در زمینه عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح تحت بارگذاری ضربه انجام نشده

<sup>3</sup> Near Surface Mounted

<sup>1</sup> Fiber Reinforced Polymers

<sup>2</sup> Externally Bonded Reinforcement

خاموت‌ها مقیاس شده است. همچنین، با توجه به اینکه مصالح استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی مقیاس شده با مصالح مورد استفاده در صنعت ساختمان تفاوتی نداشته، لذا فرض بر این شد که ضریب مقیاس مصالح معادل واحد نظر گرفته شود. از طرفی، بر اساس آیین‌نامه ژاپن [12]، اگر نسبت مقاومت برشی به مقاومت خمشی یک تیر بتنی از عدد 3 بیشتر باشد، مود شکست تیر بتنی خمشی خواهد بود. با توجه به اینکه تقویت خمشی در این تحقیق مد نظر می‌باشد، لذا نمونه‌های بتنی با توجه به این موضوع و محدودیت‌های آزمایشگاهی طراحی خواهند شد. در شکل 1 نمونه مقیاس شده و نمونه اصلی نمایش داده شده‌اند.

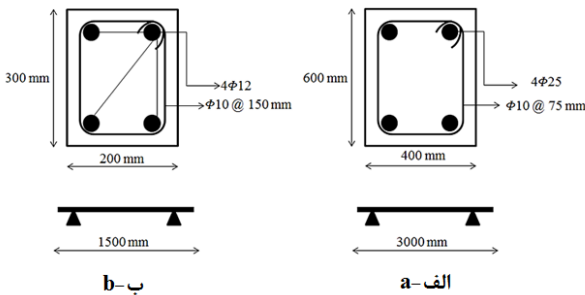


Fig. 1 Cross section of: (a) Prototype; (b) Scaled-down model  
شکل 1 مشخصات هندسی الف) نمونه اصلی و ب) نمونه مقیاس شده

### 2-3- مشخصات مصالح

در این بخش، مصالح مصرفی در این تحقیق معرفی و آزمایش‌های پایه جهت شناسایی رفتار مصالح تشریح خواهند شد. بتن مورد استفاده در این تحقیق بر اساس طرح ملی مخلوط بتن ایران [13] تولید و مقاومت فشاری هدف 25 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. با این وجود، با توجه به دقت وسایل اندازه‌گیری در روز انجام آزمایش‌های سازه‌ای، مقاومت فشاری نمونه استاندارد استوانه‌ای 38.93 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین، آرماتورهای مصرفی در این پروژه از نوع AII بوده و در دو قطر 10 و 12 میلی‌متر می‌باشند. جهت محاسبه مقاومت تسلیم و مقاومت حدی نهایی این میلگردها، از آزمایش کشش مستقیم بر اساس استاندارد ISO 6935-2 [14] استفاده شده است. در این آزمایش، میلگردها توسط دستگاه یونیورسال با ظرفیت 100 تن در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر مورد آزمایش قرار گرفتند.

سرعت بارگذاری در این آزمایش 15 mm/min تعیین شده است. لازم به ذکر است که از هر قطر آرماتور، دو نمونه مورد آزمایش کشش قرار گرفت و با توجه به نزدیک بودن نتایج تنها نمودار تنش کرنش یکی از نمونه‌ها در این قسمت گزارش شده است.

میزان مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی این میلگردها برای هر گروه از طریق میانگین‌گیری در جدول 1 گزارش شده است.

جدول 1 نتایج آزمون کشش میلگرد

ازدیاد طول (%)	مقاومت نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	قطر میلگرد (mm)
22.59	533.03	344.74	10
12.37	656.83	532.58	12

Table 1 Rebars' tensile test results

است. علاوه بر این، به صورت موازی آزمایش‌های خمشی استاتیکی صورت گرفته و مودهای شکست در دو شکل از بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقایسه خواهند شد.

### 3- مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به توضیح روند طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی، نحوه مقاوم‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های خمشی و ضربه و تفسیر نتایج آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

#### 1-3- آنالیز ابعادی و طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی

شرایطی از جمله محدود بودن فضای آزمایشگاهی، ظرفیت دستگاه‌های بارگذاری و همچنین ملاحظات اقتصادی در اغلب موارد باعث می‌شود تا در مهندسی سازه نتوان نمونه‌ها را در مقیاس واقعی مورد ارزیابی و آزمایش قرار داد. از این رو، باید نمونه‌های مورد آزمایش به صورت مناسب مقیاس شوند. یکی از متداول‌ترین اصول مقیاس نمودن سازه‌ها، استفاده از نظریه باکینگهام<sup>1</sup> می‌باشد. بر اساس این نظریه، هر پدیده فیزیکی را می‌توان بر اساس متغیرهای آن به شکل زیر تعریف نمود.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $x_1, x_2, \dots, x_k$  متغیرهای فیزیکی مسئله می‌باشند. این رابطه را می‌توان به شکل زیر بازنویسی نمود.

$$g(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-r}) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-r}$  متغیرهای بدون بعد مسئله می‌باشند. منظور از  $\Gamma$  در رابطه فوق تعداد کمیت‌های اصلی مسئله می‌باشد. این کمیت‌ها شامل زمان، طول و جرم می‌باشند. پارامتر زمان در تحلیل‌های دینامیکی کاربرد داشته و بجای پارامتر جرم می‌توان از پارامتر نیرو استفاده نمود. با توجه به اینکه سه کمیت اصلی طول، جرم و زمان در تمامی متغیرهای اصلی مانند مقاومت فشاری، ارتفاع پرتابه، شتاب و غیره وجود داشته، می‌توان با یک سری عملیات ریاضی ابتدایی به این عبارات‌های بدون بعد دست یافت. بر اساس نظریه باکینگهام، ترم‌های بدون بعد پی در پی در نمونه واقعی و نمونه مقیاس شده باید برابر باشند. از برابری این عبارات می‌توان ضرایب مقیاس مورد نظر را محاسبه نمود. در صورتی که مصالح مورد استفاده در مدل اصلی و نمونه‌های مقیاس شده را یکسان در نظر گرفته شوند، با توجه به یکسان بودن شتاب آزمایش ضرایب مقیاس به شکل زیر خلاصه خواهند شد.

$$S_{W_p} = S_{P_u} = S_{f_p}^2 \quad (3)$$

که در روابط فوق منظور از  $S_{W_p}$  نسبت وزن پرتابه در نمونه اصلی به نمونه مقیاس شده،  $S_{f_p}$  نسبت ارتفاع سقوط پرتابه در نمونه اصلی نسبت به نمونه مقیاس شده و  $S_{P_u}$  نسبت ظرفیت باربری محوری نمونه اصلی به نمونه مقیاس شده می‌باشند. در ادامه با انتخاب ضریب مقیاس هندسی 2 و ضریب مقیاس مصالح 1، مدل اصلی و مدل مقیاس شده به صورت زیر انتخاب خواهند شد. با توجه به آنکه در زمان آماده‌سازی نمونه‌ها، خاموت‌هایی با قطر کمتر از 6 میلی‌متر در بازار موجود نبود، لذا بجای مقیاس کردن قطر خاموت، فاصله میان

<sup>1</sup> Buckingham Pi Theorem

### 3-3- تقویت نمونه‌های آزمایشگاهی به روش نصب در نزدیک سطح

پس از معرفی مصالح مورد استفاده در این تحقیق، در این مرحله به تشریح فرآیند ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی پرداخته خواهد شد. در مجموع شش عدد تیر بتنی برای این پژوهش در نظر گرفته شده است که سه عدد تحت بارگذاری خمش سه محوره و سه عدد تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین قرار خواهند گرفت. تنها تفاوت میان این دو گروه نوع بار اعمال شده می‌باشد. در هر گروه یک عدد نمونه شاهد بدون تقویت در نظر گرفته شده است. نمونه بعدی توسط چندلایه کربن و نمونه آخر توسط میلگرد شیشه به روش تقویت نصب در نزدیک سطح تقویت‌شده‌اند. شکل 4 بیانگر سطح مقطع نمونه‌های آزمایشگاهی و شکل 5 نمایانگر نمونه‌های تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح می‌باشند.

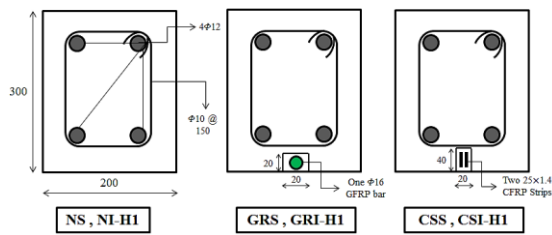


Fig. 4 Cross-sectional shape of test specimens

شکل 4 نمای مقاطع نمونه‌های آزمایشگاهی

از سوی دیگر، شکل 5 نمونه‌های تقویت‌شده به روش تقویت نصب در نزدیک سطح را نمایش می‌دهد.

### 4-4- آزمایش خمش استاتیکی

آزمایش‌های خمش استاتیکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر با استفاده از دستگاه بارگذاری تک محوره به ظرفیت 100 تن انجام شده است. نوع بارگذاری به صورت جابجایی کنترل با سرعت 0.004 mm/s بوده و به صورت خمش سه نقطه‌ای به تیرهای بتنی اعمال شده است. خروجی‌های این آزمایش شامل منحنی بار محوری نسبت به تغییرمکان وسط دهانه، الگوهای رشد ترک و میدان کرنش در بتن می‌باشند. شکل 6 پیکربندی آزمایش خمش سه نقطه‌ای را نمایش می‌دهد.

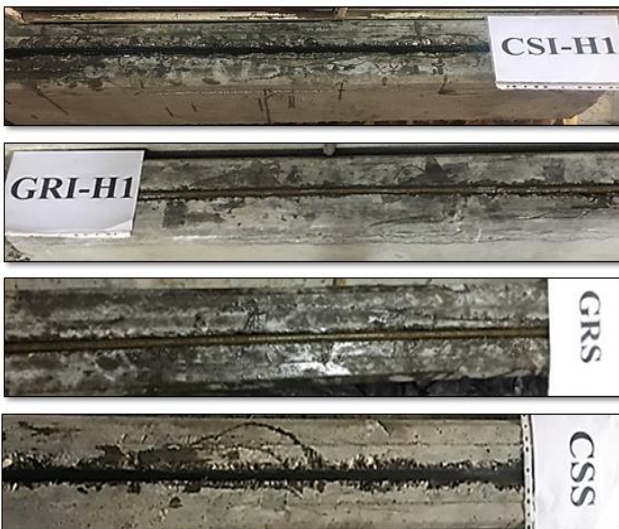


Fig. 5 NSM-retrofitted concrete beams

شکل 5 تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش NSM

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی چندلایه‌های کربن، از آزمون کشش مطابق استاندارد [15] ASTM D3039 استفاده شده است. این آزمایش توسط دستگاه یونیورسال با ظرفیت 15 تن در آزمایشگاه کامپوزیت دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه امیرکبیر انجام شده است. سرعت بارگذاری مطابق استاندارد 2 mm/min بوده و از فک پنوماتیکی جهت انجام آزمایش استفاده شده است. با توجه به اطلاعات فنی این محصول، روش ساخت به صورت پالتروژن و کسر حجمی الیاف 60٪ گزارش شده است. ضخامت لایه‌ها 1.4 میلی‌متر بوده و عرض ورق 50 میلی‌متر گزارش شده است. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش کشش دارای طول 300 و عرض 25 میلی‌متر بوده و چهار نمونه مورد آزمایش کشش مستقیم قرار گرفت. با این وجود، با توجه به خرابی زودرس یکی از این چهار نمونه به دلیل عدم تنظیم مناسب دستگاه، نتایج سه نمونه دیگر گزارش شده است. نتایج آزمایش کشش در شکل 2 خلاصه شده است.

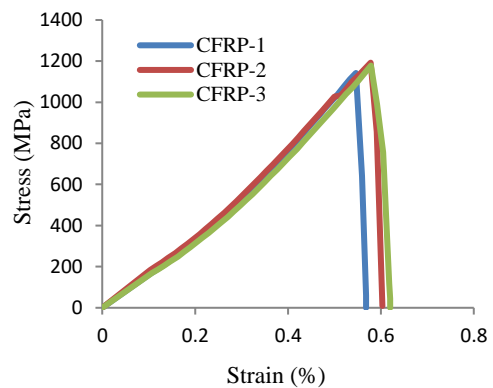


Fig. 2 Stress-strain graph of CFRP

شکل 2 منحنی تنش کرنش CFRP

از طرفی، جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی رزین، از استاندارد [16] ASTM D638-14 استفاده شده است. بر این اساس، ترکیب رزین و سخت‌کننده داخل قالب سیلیکونی با ابعاد استاندارد ریخته شده و پس از گذشت 72 ساعت، نمونه‌های دمبلی شکل تحت بارگذاری کششی با سرعت 2 mm/min قرار گرفتند. شکل 3 نمودار تنش کرنش رزین را نمایش می‌دهد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌های رزین جهت انجام آزمایش کشش مطابق تحقیق مسائلی و همکاران [17] می‌باشد.

روند مقاوم‌سازی نمونه‌ها به روش تقویت نصب در نزدیک سطح به این صورت می‌باشد که در ابتدا شیاری در وجه کششی تیرهای بتنی ایجاد و پس از تمیز کردن این شیار از گرد و غبار، رزین اپوکسی داخل شیار تزریق و در ادامه مصالح تقویت‌کننده کامپوزیتی درون شیار قرار گرفته و در نهایت تمام شیار با رزین پر می‌شود.

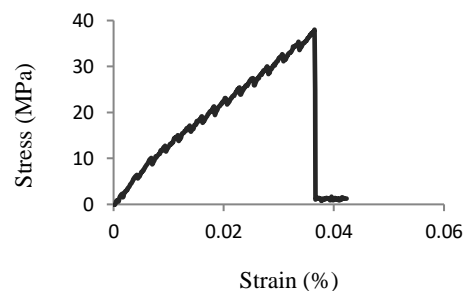


Fig. 3 Stress-strain graph of epoxy

شکل 3 منحنی تنش کرنش رزین

توسط جرثقیل به ارتفاع مورد نظر انتقال داده شده و توسط ضامن به سمت مرکز تیر رها می‌شود. به منظور حفظ راستای برخورد و عدم انحراف از دو پروفیل ناودانی که به صورت عمودی به دستگاه متصل شده‌اند، استفاده شده است. پیکربندی آزمایش ضربه در شکل 9 نمایش داده شده است.

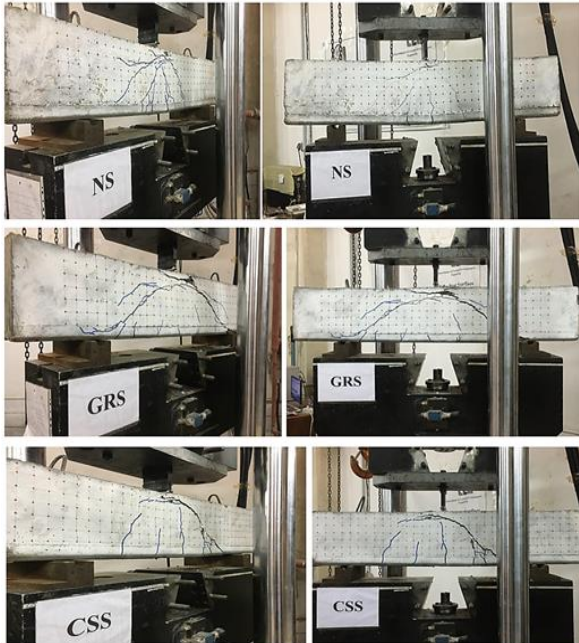


Fig. 8 Failure mode of test specimens under flexural loading

شکل 8 مود گسیختگی نمونه‌های تحت بارگذاری خمشی



Fig. 9 Impact loading test setup

شکل 9 پیکربندی آزمایش ضربه

جهت ثبت میزان تغییرمکان نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر ضربه، از تغییرمکان‌سنج<sup>1</sup> لیزری و مکانیکی استفاده شده است. تغییرمکان‌سنج لیزری



Fig. 6 Test setup for flexural loading

شکل 6 پیکربندی آزمایش خمشی استاتیکی

از طرفی، شکل 7 نمودار نیرو بر حسب تغییرمکان وسط دهانه را برای نمونه‌های تحت بارگذاری استاتیکی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، میزان ظرفیت باربری محوری نمونه‌های تقویت‌شده با چندلایه کربن و میلگرد شیشه به ترتیب 15.26% و 24.71% نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. از سوی دیگر، وضعیت نهایی نمونه‌های تحت خمشی در شکل 8 نمایش داده شده است. طبق این شکل، مود گسیختگی نمونه شاهد به صورت خمشی بوده که با تقویت خمشی نمونه‌های دیگر، مود شکست از خمشی به برشی تغییر پیدا کرده است.

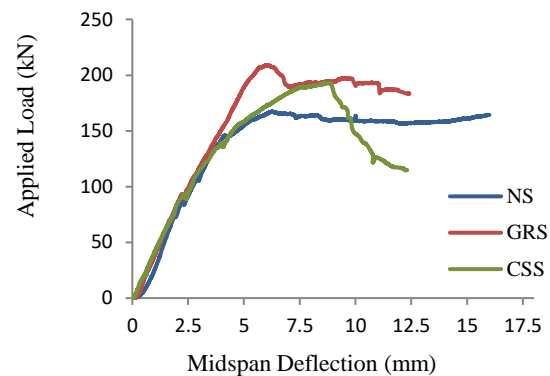


Fig. 7 Load-displacement graph for flexural loading experiment

شکل 7 نمودار نیرو - تغییرمکان آزمایش خمشی استاتیکی

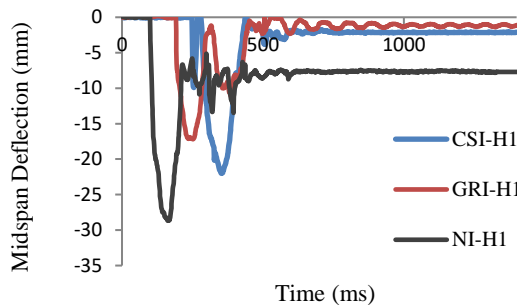
### 5-3- آزمایش ضربه با سرعت پایین

به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی تیرهای بتنی، نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین قرار گرفته‌اند. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش مشابه نمونه‌های آزمایش خمشی سه نقطه‌ای می‌باشند. تمامی نمونه‌ها دارای شرایط تکیه‌گاهی دو سر ساده می‌باشند. با توجه به استاندارد بارگذاری ضربه [18]، جهت جلوگیری از بلندشدگی تیرها در اثر ضربه و عدم انتقال نیرو به تکیه‌گاه‌ها، دو انتهای نمونه توسط پروفیل‌های ناودانی و پیچ و مهره مقید شده‌اند. علاوه بر این، به منظور ایجاد شرایط مرزی ساده، تیرها بر روی دو غلتک فولادی به قطر 75 میلی‌متر قرار گرفته‌اند. پرتابه مورد استفاده در این آزمایش از جنس فولاد بوده و دارای جرم 150 کیلوگرم می‌باشد. ارتفاع سقوط نیز در تمامی آزمایش‌های ضربه ثابت و برابر با یک متر در نظر گرفته شده است. این پرتابه

<sup>1</sup> Linear Vertical Displacement Transducer

در ادامه نمونه با کد GRI-H1 تحت آزمایش ضربه قرار گرفت. الگوی رشد ترک در این نمونه مشابه نمونه با کد CSI-H1 بوده با این تفاوت که در بتن ناحیه فشاری و در محل اعمال ضربه شاهد خرابی کمتری بوده‌ایم. در مجموع با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، نمونه با کد GRI-H1 عملکرد بهتری را در بین نمونه‌های تحت ضربه از خود نشان داده است.

شکل 12 نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان وسط دهانه تیرهای مورد آزمایش تحت ضربه را نشان می‌دهد. طبق مشاهدات آزمایشگاهی انتظار می‌رفت که نمونه بدون تقویت بیشترین میزان جابجایی حداکثر و پسماند را تجربه کند. میزان تغییرمکان حداکثر و پسماند برای نمونه شاهد به ترتیب برابر  $28.68\text{ mm}$  و  $7.69\text{ mm}$  می‌باشد. مقادیر فوق برای نمونه با کد CSI-H1 به ترتیب برابر  $21.98\text{ mm}$  و  $2.14\text{ mm}$  و برای نمونه با کد GRI-H1 به ترتیب برابر  $17.19\text{ mm}$  و  $1.23\text{ mm}$  می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان تغییرمکان حداکثر تیرهای CSI-H1 و GRI-H1 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب  $23.36\%$  و  $40\%$  کاهش یافته است.



**Fig. 12** Time histories of displacement under impact loading  
شکل 12 نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان تحت بارگذاری ضربه

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح تحت دو نوع بارگذاری مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

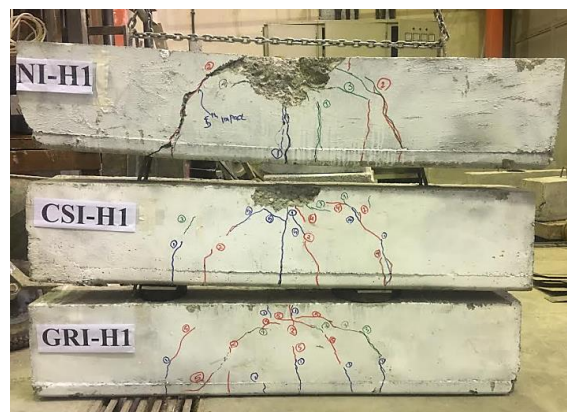
- تحت بارگذاری استاتیکی خمش سه نقطه‌ای میزان مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت‌شده با استفاده از صفحات کربن نسبت به نمونه بدون تقویت حدود  $15.3\%$  و مقاومت خمشی نمونه تقویت‌شده با میلگرد شیشه نسبت به نمونه شاهد  $24.7\%$  افزایش یافته است.
- میزان خیز حداکثر وسط دهانه در نمونه با کد CSI-H1 تحت اثر ضربه نسبت به نمونه شاهد حدود  $23.36\%$  و این مقدار در نمونه با کد GRI-H1 حدود  $40\%$  نسبت به نمونه بدون تقویت کاهش یافته است.
- با پیشروی در تعداد ضربات، نمونه شاهد تحت اثر پنج ضربه به صورت کامل گسیخته گردید. با این وجود نمونه‌های تقویت‌شده تحت اثر همین پنج ضربه عملکرد به مراتب بهتری را از خود نشان داده‌اند. در این میان، میزان خرابی و ترک در نمونه GRI-H1 نسبت به نمونه CSI-H1 کمتر می‌باشد.
- علیرغم برابر بودن میزان سفتی محوری مصالح کامپوزیتی در نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با میلگرد شیشه عملکرد بهتری را نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با ورق‌های کربن از خود نشان دادند. این موضوع را می‌توان به شکل کامپوزیت نسبت داد، به عبارت دیگر

در قسمت تحتانی و در وسط نمونه‌ها (محل اعمال بار) قرار داده شده است. دقت این نوع از تغییرمکان سنج توسط شرکت سازنده  $2\text{ mm}$  میکرومتر گزارش شده است. علاوه بر این، از دو عدد تغییرمکان سنج مکانیکی جهت صحت‌سنجی و کالیبراسیون تغییرمکان لیزری استفاده شده است. همچنین، جهت اندازه‌گیری شتاب وارده به تیرهای بتنی، یک عدد شتاب‌سنج تک‌جهته در مرکز دهانه و ضخامت عضو بتنی نصب شده است. شکل 10 جانمایی حسگرهای اندازه‌گیری تغییرمکان را نشان می‌دهد.



**Fig. 10** Displacement measurement devices  
شکل 10 حس‌گرهای اندازه‌گیری تغییرمکان

اولین آزمایش ضربه مربوط به تیر بدون تقویت می‌باشد. این نمونه مورد برخورد پنج ضربه متوالی از ارتفاع یکسان یک متری قرار گرفته و پس از اعمال پنج ضربه آزمایش به دلیل گسیختگی نمونه متوقف گردید. با توجه به این موضوع، تصمیم بر این شد که دو نمونه تقویت‌شده نیز تحت همین تعداد ثابت ضربه قرار گرفته تا بتوان مقایسه بهتری انجام داد. تحت اعمال بار ضربه ترک‌ها به صورت همزمان از وجه تحتانی تیر و محل برخورد پرتابه آغاز شده و با پیشروی ضربات، در ضخامت نمونه ادامه پیدا می‌کنند که در مورد نمونه بتنی شاهد نیز این موضوع صادق می‌باشد. اولین نوع ترک در اثر اعمال ضربه ترک خمشی بوده و با ادامه یافتن ضربات ترک‌های برشی خمشی نیز ایجاد شدند. الگوی رشد ترک در این نمونه در شکل 11 نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل 11 شماره هر ترک مربوط به شماره ضربه اعمال شده می‌باشد. پس از پایان آزمایش ضربه نمونه شاهد، نمونه با کد CSI-H1 مورد اعمال همان پنج ضربه که باعث گسیختگی نمونه بدون تقویت شده بود قرار گرفت. پس از پایان پنج ضربه، میزان گسیختگی بتن فشاری در این تیر نسبت به نمونه بدون تقویت کاهش چشمگیری داشته و همچنین به صورت ظاهری تغییرشکل پسماند این نمونه تحت اثر ضربه کاهش یافته است.



**Fig. 11** Failure mode of test specimens under impact loading  
شکل 11 مود گسیختگی نمونه‌های تحت بارگذاری ضربه

- [17] Masayeli, J., Davar, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2273-2296, 2024.
- [18] Standard Test Method for Measuring Relative Resistance of Wall, Floor, and Roof Construction to Impact Loading, Annual Book of ASTM Standard, E 695-03, 2015.

استفاده از آرمتور در مقایسه با شکل چندلایه آن می‌تواند عملکرد بهتری را در تیرهای بتنی تقویت‌شده به روش نصب در نزدیک سطح باعث شود.

- در مجموع آزمایش‌های ضربه و خمش به دلیل ماهیت روش تقویت نصب در نزدیک سطح هیچ‌گونه جدایش کامپوزیت از بتن مشاهده نگردید.

## 5- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از همکاری سرپرست‌ها و کارکنان آزمایشگاه ملی سازه و آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر کمال قدردانی را ابراز می‌دارند.

## 6- منابع

- [1] Amirirnejad, A., Kazemirad, S., Shokrieh, M. M., "Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2257-2265, 2024.
- [2] Ghasemi, P., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2312-2319, 2024.
- [3] El-Hacha, R. and Rizkalla, S., "Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures," ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 5, pp. 717-726, 2004.
- [4] Xing, G., Chang, Z., and Ozbulut, O. E., "Behavior and failure modes of reinforced concrete beams strengthened with NSM GFRP or aluminum alloy bars," Structural Concrete, Vol. 19, No. 4, pp. 1023-1035, 2018.
- [5] Erki, M. A. and Meier, U., "Impact Loading of Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates," Journal of Composites for Construction, Vol. 3, No. 3, pp. 117-124, 1999.
- [6] Tang, T. and Saadatmanesh, H., "Behavior of concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer laminates under impact loading," Journal of Composites for Construction, Vol. 7, No. 3, pp. 209-218, 2003.
- [7] Pham, T. M. and Hao, H., "Impact Behavior of FRP-Strengthened RC Beams without Stirrups," Journal of Composites for Construction, Vol. 20, No. 3, pp. 1-13, 2016.
- [8] Aminakbari, N., Kabir, M. Z., Rahai, A., and Hosseinnia, A., "Experimental and numerical evaluation of GFRP-reinforced concrete beams under consecutive low-velocity impact loading," International Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 145-156, 2024.
- [9] Kish, N., Komuro, M., Kawarai, T., and Mikami, H., "Low-Velocity Impact Load Testing of RC Beams Strengthened in Flexure with Bonded FRP Sheets," Journal of Composites for Construction, Vol. 24, No. 5, pp. 1-10, 2020.
- [10] Hosseinnia, A., and Kabir, M. Z., "Evaluation of ultimate strength and damage progress of strengthening RC beams using NSM technique under low-velocity impact loading," Composites Part C: Open Access, Vol. 13, pp. 1-15, 2024.
- [11] Harris, H. G. and Sabnis, G., "Structural modeling and experimental techniques" CRC press, 1999.
- [12] Standard specification for concrete structures, Japon Society of Civil Engineers (JSCE), 2007.
- [13] The national method for concrete mix design (3rd edition), Road, housing and urban development research center, 2017 (In Persian).
- [14] Steel for the Reinforcement of Concrete, Part 2: Ribbed bars (ISO 6935-2), International Organization for Standardization, 1991.
- [15] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D 3039, 2000.
- [16] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638-14, 2015.