

Effect of the crater-height ratio on the shear behavior of deep concrete beams reinforced with carbon polymer fibers by the NSM-EBR method

Abolfazl ArabZadeh^{1*}, Aswan Bahl Al-jeddan²

1. Associate professor of the Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Ph.D student in Structural Engineering, Faculty of civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Deep reinforced concrete beams are very important structural elements that are used in concrete structures such as high-rise buildings, marine structures, silos, and etc. Because of the importance of these elements, they sometimes need to be strengthened. One common method of strengthening reinforced concrete structures is the use of carbon polymer sheets (CFRP). In recent decades, little research has been done to investigate the effect of various variables affecting the behavior of concrete deep beam, strengthened using polymers reinforced with single or multi-directional fibers. The valuable features of composite materials such as simple and fast installation and corrosion resistance have led to the increasing use of these materials. It is possible to strengthen the reinforced concrete deep beams by gluing FRP plates or strips in a full-cross-section, gluing in a U shape or mounting on the sides of the beam at different angles to the longitudinal axis. Laboratory and analytical results prove that the external installation method, EBR, can be used as an acceptable solution in strengthening the shear of reinforced concrete members. Other methods such as installation Near the Surface Method (NSM) or methods that prevent them from separating from the concrete surface by inhibiting Composite tape can be used as an EBR alternative method that delays separation. Despite extensive research on strengthening and strengthening conventional reinforced concrete beams with FRP sheets, little research has been done on deep concrete beams. As we know, many parameters affect the NSM and EBR method. The lack of research in this field has caused these methods and details to be narrowly stated in the statutes.

One of the problems with using polymer sheets is their separation when loading a prototype. Therefore, this article attempts to use near-surface mounting methods (NSM) to strengthen such beams. This method plays a significant role in reducing the separation of reinforcement sheets. By reducing the effect of early detachment of polymer sheets, increasing the load capacity, increasing the formability and maximizing the use of the material capacity can be expected. Six deep reinforced concrete beams with a span-to-height ratio of 2, 3 and 4 are laboratory-loaded and reinforced by the NSM-EBR method using CFRP and their shear behavior is investigated. Given that the desired failure in deep beams is of the shear type, the NSM reinforcement grooves are installed perpendicular to the direction of the main diagonal cracks and reinforced with carbon polymer fibers. By strengthening the beam in shear using the EBR-NSM method, the type of beam failure did not change, but the number of cracks and tensile bands increased, which caused increase the load-bearing capacity of the beams. In the failure modes, it was observed that no delamination and slippage in the EBR-NSM strengthening system. Due to the presence of the adhesive at a greater depth of the beam, there is no slippage and delamination in the CFRP fibers within the tested specimen. This system has high reliability in terms of stability against slippage. The results showed the shear capacity of the deep beams increase by implementing this approach. Based on the results, it can be concluded that the amount of beam shear load capacity in samples with a span ratio of 2, 3 and 4 increased by 30%, 19% and 12.5% respectively.

Review History

Received: Jan 2, 2025

Revised: Feb 25, 2025

Accepted: Mar 11, 2025

Keywords

reinforced concrete deep beam

shear strengthened

CFRP

NSM-EBR strengthened method

* Corresponding Author Email: arabzade@modares.ac.ir - ORCID: 0009-0000-9126-2134



تأثیر نسبت دهانه به ارتفاع بر رفتار برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با الیاف پلیمری کربنی به روش NSM-EBR

ابوالفضل عربزاده^{۱*} , اسوان باهل جدعان^۲

۱. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

تیرهای عمیق بتن مسلح از المان‌های سازه‌ای بسیار مهم هستند که در سازه‌های بتنی مانند ساختمان‌های بلند، سازه‌های دریایی، سیلوها و غیره کاربرد دارند. به دلیل اهمیت این المان‌ها بعضی مواقع لازم است تا تقویت و مقاوم‌سازی شوند. یکی از روش‌های معمول برای تقویت سازه‌های بتنی مسلح، استفاده از ورق‌های پلیمری کربنی (CFRP) می‌باشد. یکی از مشکلات استفاده از ورق‌های پلیمری جداسازی آنها در هنگام بارگذاری نمونه سازه‌ای می‌باشد. بنابراین در این مقاله سعی شده از روش‌های نصب نزدیک سطح (NSM) برای تقویت این گونه تیرها استفاده شود. این روش در کاهش جداسازی ورق‌های تقویتی نقش به سزایی دارد. با کاهش اثر جداسازی زود هنگام ورق‌های پلیمری می‌توان افزایش ظرفیت باربری، افزایش شکل‌پذیری و استفاده حداکثری از ظرفیت مصالح را انتظار داشت. شش تیر بتن مسلح عمیق با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، ۳ و ۴ به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری قرار گرفته و به روش NSM-EBR با استفاده از CFRP تقویت شده و رفتار برشی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه شکست مورد نظر در تیرهای عمیق از نوع برشی است، شیارهای تقویتی NSM به صورت عمود بر جهت ترک‌های قطری اصلی تعبیه شده و با الیاف پلیمری کربنی تقویت شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل شده، می‌توان نتیجه گرفت، مقدار ظرفیت باربری برشی تیرها در نمونه‌های با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۳۰٪، ۱۹٪ و ۱۲٪ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی

تیر عمیق بتن مسلح

تقویت برشی

الیاف پلیمری کربنی CFRP

روش تقویت NSM-EBR

۱- مقدمه

باشند، به آنها تیرهای عمیق با رویکرد طراحی خمشی می‌گویند. اگر رویکرد طراحی برشی مدنظر باشد، نسبت دهانه برشی به ارتفاع کوچکتر مساوی ۴ در نظر گرفته می‌شود [2]. در آیین‌نامه بتن ایران [3] در رویکرد طراحی برشی حداکثر نسبت دهانه برشی به ارتفاع تیر به مقدار ۴ محدود شده است. در این آیین‌نامه، مطابق شکل (۱)، باید شرایط ایجاد المان‌های فشاری از قسمت بار به قسمت تکیه‌گاه وجود داشته و همچنین نسبت دهانه برشی به ارتفاع کمتر از ۴ بوده

برای تعریف تیرهای عمیق یک حد مشخصی وجود ندارد و آیین‌نامه و پژوهشگران از نسبت بی بعد دهانه برشی به ارتفاع تیر (L/h) برای طبقه‌بندی تیرها به صورت خمشی و برشی استفاده می‌کنند. در آیین‌نامه بتن آمریکا [1] دو دیدگاه خمشی و برشی بر اساس نسبت دهانه به ارتفاع تعریف شده است. اگر نسبت دهانه برشی به ارتفاع تیر $2/5$ در تیرهای سراسری و $1/25$ در تیرهای ساده

* رایانامه نویسنده مسئول: arabzade@modares.ac.ir - ORCID: 0009-0000-9126-2134

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

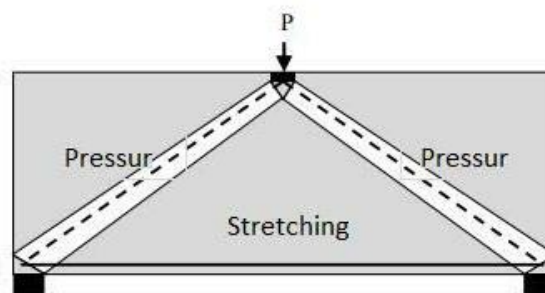


پلیمری FRP رواج بسیاری یافته است. در گذشته، استفاده از ورق‌های فولادی به صورت پوشش خارجی، غلاف‌های بتنی یا فولادی و پس‌کشیدگی خارجی در تقویت سازه‌های بتنی معمول بود. استفاده از مواد پلیمری الیافی به عنوان یک مصالح، جایگزین مواد سنتی و شیشه‌های قدیمی شد. این روش به دلیل مزایای کاملاً شناخته شده این کامپوزیت‌ها که شامل مقاومت در برابر خوردگی، وزن و ضخامت کم، مقاومت و مدول ارتجاعی بالا، مقاومت در برابر عوامل محیطی، حمل و نقل و نصب آسان می‌باشد، بر روش‌های قدیمی برتری دارند. به همین دلیل امروزه از این مواد لحاظ تقویت خمشی، برشی و یا تقویت همزمان خمشی و برشی در انواع سازه‌ها به طور گسترده استفاده می‌شود [6].

عربزاده و همکاران [5] به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده پل‌ها با مواد پلیمری پرداختند. آنها از روش چسباندن خارجی (EBR) و نصب نزدیک سطح (NSM) برای تقویت تیرهای بتن مسلح در پل‌ها استفاده کردند. میزان کارآمدی روش‌های نامبرده بر افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی تحت بارهای یکنواخت بررسی و اثبات شد. هم‌چنین نتایج نشان داد که با افزایش یک نسبت یکسان از CFRP به روش NSM، تیرهای تقویت شده به مقاومت نهایی بیشتری (حدود ۱۰٪) نسبت به تیرهای تقویت شده به روش EBR رسیدند.

اسلام و همکاران [7] شش عدد تیر عمیق بتن‌آرمه با نسبت دهانه به ارتفاع ۰/۸ را مورد آزمایش قرار دادند. بر اساس نتایج آنها تقویت برشی تیرهای عمیق بتن‌آرمه با الیاف FRP به روش EBR، ظرفیت باربری تیرها را تا ۴۰٪ افزایش داد. هم‌چنین گزارش شد که بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که ترک‌های قطری اصلی توسط ورق‌های FRP پوشانده شود [7].

البیده و همکاران [8] به بررسی طرح‌های مختلف تقویت برشی تیرهای عمیق با CFRP پرداختند. نتایج آنها نشان داد که اگرچه تقویت با FRP، مقاومت برشی تیرهای عمیق را بهبود می‌بخشد، ولی افزایش قابل توجهی در ظرفیت تغییرشکل تیرها ایجاد نمی‌کند. ازم و همکاران [9]، اثربخشی سیستم‌های کامپوزیت مبتنی بر سیمان برای تقویت برشی تیرهای عمیق بتن‌آرمه را با یک سیستم CFRP بر پایه چسب مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که سیستم‌های کامپوزیت مبتنی بر سیمان در مقایسه با سیستم‌های تقویت FRP مبتنی بر چسب بهتر عمل کردند. افزایش ظرفیت



شکل ۱. دهانه برشی، ارتفاع و سازوکار انتقال بار در تیرهای عمیق.

Fig. 1. Shear length, height and load transfer mechanism in deep beams

و بارهای متمرکز در محدوده $2h$ از بر تکیه‌گاه اعمال شده باشند [3]. در آیین‌نامه اروپایی [4] تنها رویکرد برشی برای تیرهای عمیق بررسی شده که در این حالت باید نسبت دهانه برشی به ارتفاع برای تیرهای دو سر ساده، ۳ باشد.

رفتار تیرهای عمیق برخلاف تیرهای معمولی بوده و به دلیل عمق زیاد این نوع از تیرها، در آنها تنش‌های صفحه‌ای ایجاد می‌شود. در حین خمش در تیرهای عمیق، صفحات خمش الزاما بعد از خمش به صورت صفحه‌ای نبوده و توزیع کرنش در آنها دیگر خطی نیست. به دلیل اینکه در تیرهای عمیق برش نقش زیادی در باربری دارد، تغییرشکل‌های برشی در مقابل تغییرشکل‌های خمشی قابل چشم‌پوشی نیست. در تیرهای عمیق برای تعیین رفتار نهایی و ظرفیت باربری، تحلیل‌های غیرارتجاعی صورت می‌پذیرد و تحلیل الاستیک برای تعیین محل و امتداد ترک‌های خمشی و برشی این تیرها انجام می‌شود. ظرفیت خمشی تیرهای عمیق را می‌توان با استفاده از تئوری خمش تیرهای معمولی با استفاده از بلوک تنش مستطیلی محاسبه نمود [5]. تفاوت زیادی بین طراحی آرماتور برشی در تیرهای عمیق و تیرهای معمولی وجود دارد. به دلیل اینکه در هنگام شکل گرفتن ترک‌های قطری، زاویه تنش کششی اصلی بیشتر از ۴۵ درجه است، لزوم وجود میلگردهای افقی جان از میلگردهای قائم جان بیشتر است. میلگردهای افقی به دلیل زاویه کمتر با ترک‌های قطری، سبب بهبود انتقال برش توسط پدیده قفل و بست دانه‌ای و مشارکت آنها در عملکرد شاخه‌ای می‌شود.

۲- تاریخچه تحقیقات پیشین

امروزه تقویت سازه‌های بتنی موجود به منظور تحمل بارهای اضافی و افزایش شکل‌پذیری سازه با استفاده از کامپوزیت‌های

باربری نهائی تیرهای بدون آرماتور برشی تقویت شده با این نوع کامپوزیت، ۲۳٪ در مقایسه با ۱۳٪ افزایش در تیرهای بدون خاموت تقویت شده با ورق های CFRP بود [9].

منصور و المادی [10]، رفتار تیرهای عمیق بتن آرمه تقویت شده با پلیمر مسلح شده با الیاف کربن و با روش NSM در اطراف محل قطع جریان برشی را بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها، استفاده از دو نوار در تقویت برای بازیابی کامل سختی پس از ترک خوردگی تیر ضروری بود. همچنین افزایش مقدار CFRP در بندهای اطراف محل جریان برش، منجر به افزایش متناسب در افزایش مقاومت نشد [10].

برنینگهام و همکاران [11]، رفتار تیرهای عمیق بتن آرمه که با میله های CFRP بصورت خارجی و با پیش تنیدگی مقاوم سازی شدند، را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از افزایش ظرفیت نهائی تیر تقویت شده نسبت به تیرهای غیر مقاوم سازی شده است [11].

کوماری و نایاک [12] به تاثیر تقویت تیرهای عمیق بتنی با GFRP و بست های گازی (GAF) به روش نصب خارجی پرداختند. این نمونه ها دارای گشودگی های دایره ای و مربعی بودند. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی تیرهای تقویت شده با GFRP در طول تیر تا ۳۱٪ و ۳۷٪، به ترتیب برای گشودگی های دایره ای و مربعی در مقایسه با تیرهای تقویت نشده، افزایش یافته بود [11].

هاتم و همکاران [12]، به تحلیل غیرخطی تیر عمیق بتن آرمه تحت تقویت برشی با روش NSM پرداختند. نتایج مدل سازی با نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی پیشین مقایسه شد. درصد خطای قابل مشاهده شده در مدل سازی با نرم افزار آباکوس، ۱۰٪ بود. همچنین بر اساس نتایج آنها NSM یک روش موثر، برای فراهم آوردن تقویت برشی مناسب برای تیر بتن آرمه عمیق بود. میلگردهای با فاصله کمتر که با استفاده از روش NSM در مقطع تیر بتنی عمیق جاسازی شده بودند، عملکرد مقاومتی بهتری از خود نشان دادند [12].

ابراهیم و همکاران [13] به بررسی تقویت برشی تیرهای بتنی عمیق که با استفاده از CFRP و GFRP و به روش NSM تقویت شده بودند، پرداختند. این تحقیقات نشان داد که استفاده از CFRP و GFRP باعث افزایش ظرفیت باربری بین ۲۹٪ تا ۵۶٪ می شود

[13]. روش NSM باعث می شود که شکل پذیری تیر بهبود یافته که تغییر شکل نهائی نمونه ۶۲٪ افزایش داشت. همچنین تیرهای تقویت شده، در بار نهائی عرض ترک کمتری نسبت به تیرهای تقویت نشده داشتند. در روش NSM، کرنش کششی به طور قابل ملاحظه ای افزایش داشت [13].

ژانگ و همکاران [14]، به بررسی تاثیر استفاده از تقویت U شکل بر رفتار تیرهای بتن مسلح به روش NSM پرداختند. پارامترهای مورد بررسی آنها، آرایش نوارهای FRP، نوع ماده تقویت، تعداد لایه ها، عرض و زاویه الیاف FRP بود. این تحقیق نشان داد که استفاده از تقویت U شکل باعث افزایش ظرفیت باربری و کرنش جلدشدگی تیر می شود. هم چنین مشخص شد که نوع ماده (CFRP یا GFRP) تاثیر اندکی بر ظرفیت نهائی تیر دارد. افزایش عرض و تعداد نوارهای تقویت باعث افزایش ظرفیت باربری تیرها شد [14].

عربزاده و مهان پور [15] به اثر ورق CFRP بر مقاومت برشی تیرهای دو سر گیردار عمیق پرداختند. نتایج آنها نشانه داد که این روش تقویت باعث افزایش باربری تیر به میزان ۵۱٪ می شود. در تمام این تحقیقات مشخص شده است که یکی از مشکلات اساسی در این روش از تقویت ها، جلدشدگی FRP و یا CFRP از سطح نمونه می باشد. از همین رو، در این تحقیق سعی شده است این مشکل را با روش شیار زنی و ایجاد اصطکاک بیشتر بین CFRP و سطح بتن بر طرف کرده و از جلدشدگی بین آنها جلوگیری نمود.

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این قسمت به معرفی نمونه های مورد آزمایش پرداخته می شود. بارگذاری به صورت سه نقطه ای بوده که روی تیرهای عمیق بتن مسلح با نسبت دهانه به عمق مختلف انجام شد. روش های NSM و EBR به صورت ترکیبی برای تقویت برشی تیرها انتخاب شد. ظرفیت باربری و همچنین وضعیت ترک خوردگی و چگونگی فروپاشی (مود شکست) تیرها متغیرهای اصلی مقاله می باشد.

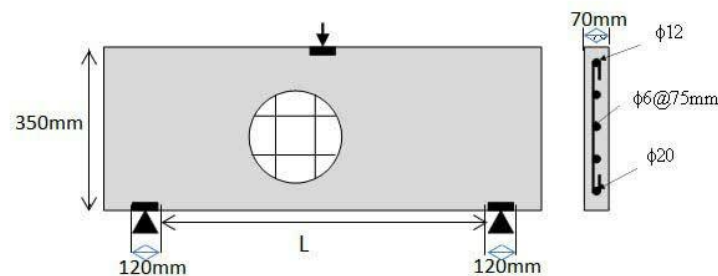
۳-۱- مشخصات نمونه ها

در این تحقیق شش عدد تیر بتنی عمیق با نسبت دهانه به عمق متفاوت با و بدون تقویت الیاف پلیمری کربنی مورد بررسی قرار

متغیر است. سطح مقطع تیرها ۳۵۰×۷۰ میلی متر و به صورت ثابت برای همه نمونه ها می باشد. در جداول (۱ و ۲) به ترتیب مشخصات نمونه های ساخته شده و مشخصات مصالح به همراه طرح اختلاط بتن به طور کامل ارائه شده است. به دلیل اینکه در این تحقیق عملکرد روش های تقویتی تیر عمیق مورد نظر بوده است، تیرها به لحاظ ارتفاع و ضخامت، آرماتورگذاری و مقاومت بتن مشابه بوده و تفاوت آنها در دهانه و روش تقویت است. بارگذاری تیرها به صورت بار مونوتونیک منفرد و در وسط دهانه است. برای ساخت این تیرها از بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال استفاده شده است.

گرفت. سه نمونه شاهد که در آنها از روش تقویت استفاده نشده است، به منظور مقایسه رفتار تیرهای تقویت شده ساخته شده اند. سطح مقطع تیرها ۳۵۰×۷۰ میلی متر و طول آنها ۱۶۴۰، ۱۲۹۰ و ۹۴۰ میلی متر می باشد. نمونه ای با ابعاد هندسی، موقعیت بارگذاری و جزئیات تکیه گاه ها در شکل (۲) نشان داده شد.

برای آرماتورگذاری مقطع، یک عدد میلگرد با قطر ۱۲ میلی متر در قسمت فوقانی مقطع، یک عدد میلگرد با قطر ۲۰ میلی متر در قسمت تحتانی و یک شبکه میلگرد میانی از آرماتور با قطر ۶ میلی متر با فاصله شبکه ۷۵ میلی متر قرار داده شده است. ابعاد صفحات بارگذاری ۱۲۰ میلی متر و طول L بر اساس نوع نمونه



شکل ۲. نمای کلی تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه.

Fig. 2. overview of the test beams.

جدول ۱. مشخصات نمونه های ساخته شده.

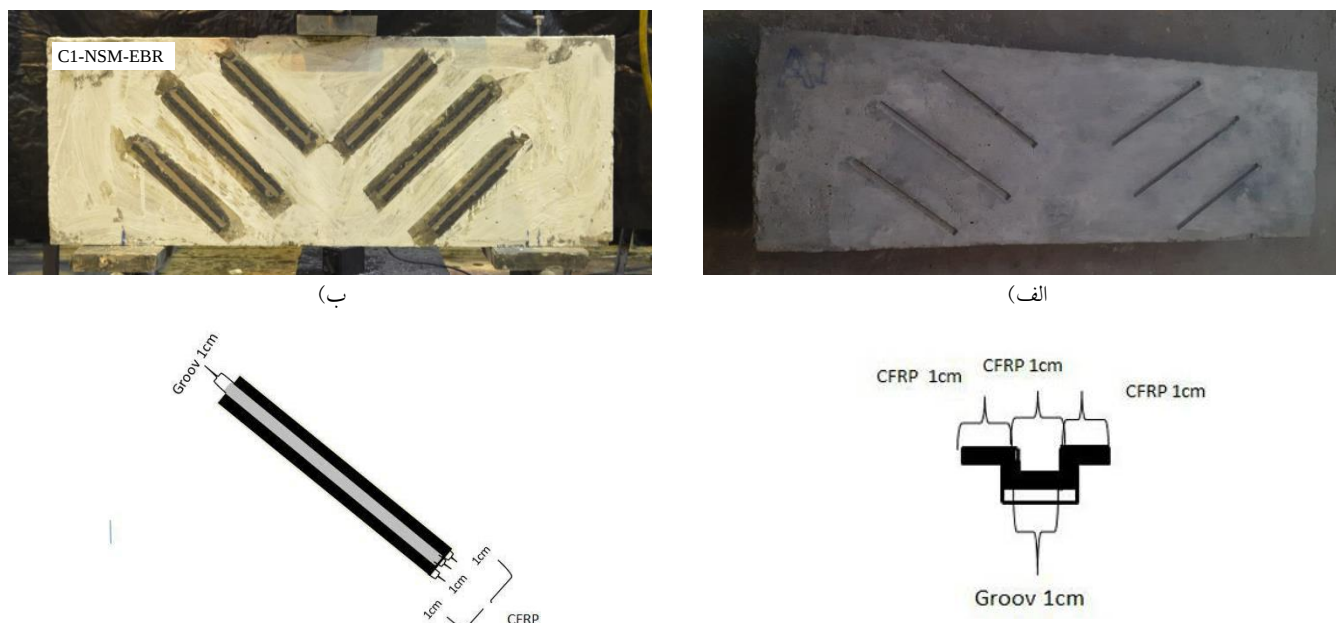
Table 1. The sample's properties

Shear Rein		Bars		CFRP's details		(L/h) Length to height ratio	Sample name
horizontal	vertical	up	down	Number of grooves	Width (mm)		
Ø6@75mm	Ø6@75mm	1Ø12	1Ø20	-	-	2	C1
				-	-	3	C2
				-	-	4	C3
				3	30	5	C1-NSM-EBR
				3	30	6	C2-NSM-EBR
				5	30	7	C3-NSM-EBR

جدول ۲. مشخصات مصالح و طرح اختلاط بتن.

Table 2. The material properties and concrete mixing plan

Concrete properties	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fine Aggregate (kg/m ³)	Coarse Aggregate (kg/m ³)	Admixture (g/m ³)	Concrete strength (MPa)
	11	27	100	70	68	30
Steel	Reinforcement		Yield Strength (MPa)		Ultimate Strength (MPa)	
	φ6		445		445	
	φ12		388		388	
	φ20		630		630	
CFRP	Tensile Strength (MPa)		Elastic Modulus (GPa)		Thickness (mm)	
	4950		240		0.01	



شکل ۳: جزئیات تقویت تیرها (الف) صرفاً شیار زنی، (ب) بعد از چسباندن ورق CFRP و (ج) جزئیات نصب ورق‌ها
Fig. 3. strengthen details (a) only grooving (b) adding CFRP (c) Schematic representation of the CFRP installation method

CFRP هم در داخل شیارها و هم اطراف آنها می‌شود که همین موضوع به ترکیب طرح‌های تقویتی NMS و EBR انجام می‌شود. در نهایت روی شیارها و اطراف آنها دوباره به چسب آغشته شده به طوری که شیارها کاملاً با چسب پر شده‌اند. در شکل (۳) جزئیات نصب ورق‌ها ارائه شده است.

۳-۳- وسائل اندازه‌گیری

در همه نمونه‌ها، نیرو به صورت مونوتونیک و منفرد به وسط دهانه تیر وارد می‌شود. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی از دو عدد LVDT استفاده شده است که یکی از آنها، در سطح پشتی، در وسط تیر و دیگری در بالای تیر، در راستای مرکز صفحه تکیه‌گاه آن قرار داده شده است. جزئیات آزمایش و وسائل اندازه‌گیری در شکل (۴) نمایش داده شده است.

۴- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت اثر روش تقویت NMS-EBR بر رفتار تیرهای عمیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- الگوی ترک خوردگی

همانطور که در شکل (۵ الف) نمایش داده شده است، در نمونه C1 که نسبت دهانه به ارتفاع آن برابر ۲ بوده و فاقد تقویت می‌باشد، دسته‌ای از ترک‌های برشی با عرض زیاد در اطراف

۳-۲- روش تقویت نمونه‌ها

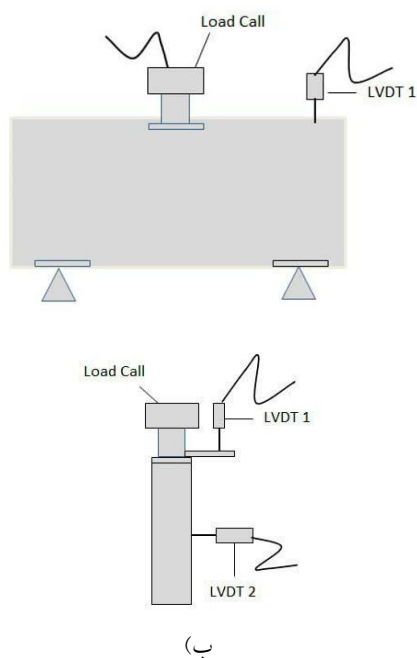
همانطور که در بخش‌های قبلی نیز عنوان شد، هدف انجام این تحقیق، بررسی تأثیر طرح تقویت تیرهای عمیق به روش ترکیبی NMS-EBR بر رفتار آنها می‌باشد. نوارهای تقویتی طوری انتخاب و اجرا شده‌اند که باندهای کششی در تیر را به لحاظ ترک خوردگی پوشش دهد و باعث بهبود رفتار برشی آن شود. در این بخش، روش مورد استفاده در این تحقیق شرح داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، برای تقویت تیرهای عمیق این تحقیق، در ابتدا ۳ شیار، به وسیله سنگ فرز، با فاصله عمودی ۱۰۰ میلی‌متر از یکدیگر روی و پشت نمونه‌ها ایجاد شده است که عرض و عمق شیارها به ترتیب، ۱۰ و ۵ میلی‌متر می‌باشند. طول بلندترین شیار، یعنی شیار وسط، برابر با عرض مقطع، یعنی ۲۵ سانتی‌متر، بوده و طول شیارهای کناری آن برابر با ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. سپس این شیارها با فرچه سیمی تمیز و بادگیری شده تا سطح شیار به طور کامل تمیز و عاری از هر گونه خرده بتن باشد. در مرحله بعد، داخل و اطراف شیارها با چسب رزین آغشته شده است. ورق‌های CFRP با عرض ۳۰ میلی‌متر به داخل شیارها و نواحی اطراف آنها که آغشته به چسب رزین هستند انتقال داده شده تا در موقعیت و عمق مناسب قرار گیرند. بیشتر؟ بودن عرض ورق‌های CFRP (۳۰ میلی‌متر) نسبت به عرض شیارها (۱۰ میلی‌متر) منجر به اندرکنش بین بتن با ورق

گونه‌ای که در نمونه C3، مود شکست برشی حاکم در نمونه‌های C1 و C2 تغییر کرده و مود شکست این نمونه خمشی می‌باشد. در ادامه، همانطور که در شکل (۵ ب) نمایش داده شده‌است، در نمونه C1-NSM-EBR که نسبت دهانه به ارتفاع آن ۲ بوده و با روش NSM-EBR تقویت شده، در هنگام بارگذاری مشاهده شد که ابتدا ترک‌ها در اطراف شیارهای NSM ایجاد می‌شود و سپس عرض آنها افزایش می‌یابد. در این حالت تعداد ترک‌ها نسبت به نمونه بدون تقویت مشابه (C1) افزایش داشته است. به همین دلیل می‌توان انتظار افزایش باربری از نمونه تقویت شده داشت. همچنین مشاهده شد که به دلیل اینکه این شیارهای تقویت شده سبب افزایش طول ناحیه باند کششی شده‌اند، عملاً به جای دو باند کششی، چهار باند کششی به صورت لوزی در اطراف شیارها ایجاد شده‌است که همین مورد سبب افزایش ظرفیت باربری برشی نمونه می‌شود. باز هم شکست نمونه به صورت برشی است ولی با این تفاوت که هم ظرفیت و هم تعداد ترک‌های برشی افزایش داشته یافته‌است. علاوه بر این، مشاهده شد که جداشدگی بین الیاف‌ها و شیارها رخ نداده است که منجر به جلوگیری از شکست زودرس سیستم تقویتی شده است.

تکیه‌گاه‌ها دیده می‌شود. این ترک‌ها عمدتاً از قسمت بارگذاری شروع و به سمت تکیه‌گاه تیر حرکت کرده‌اند. به دلیل ایجاد این ترک‌های ۴۵ درجه در تیر، شکست برشی با ظهور ترک‌های قطری با عرض زیاد در تیر مشهود است. اولین ترک‌های اصلی تحت بار ۴۹ کیلو نیوتن و تغییر مکان ۳/۲ میلی‌متر ایجاد شده و سپس با ادامه بارگذاری به تعداد و عرض ترک‌ها افزوده شده است. این نوع شکست یکی از شکست‌های مطلوب برای تیرهای عمیق می‌باشد، که نهایتاً پس از به وجود آمدن ترک‌های قطری اصلی شکل می‌گیرند. سپس در بار نهایی صفحه شکست در راستای یکی از همین ترک‌های قطری قرار می‌گیرند و شکست نهایی رخ می‌دهد، به طوری که در طی بارگذاری می‌توان نوع شکست برشی را مشاهده نمود.

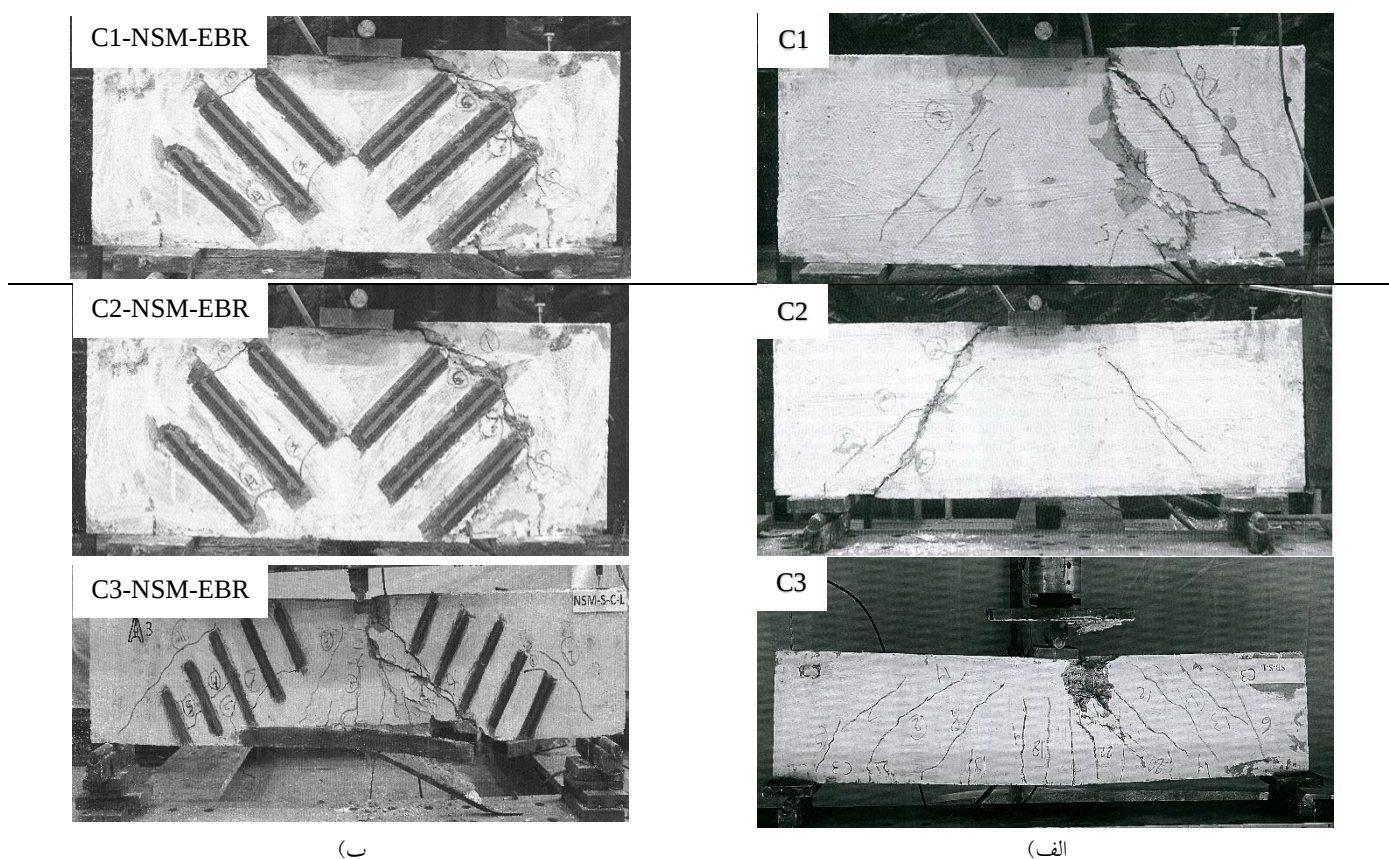
این موارد در سایر نمونه‌های بدون تقویت یعنی C2 و C3 نیز قابل مشاهده می‌باشد. اما باید توجه داشت که با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع در این تیرها، از تعداد و عمق ترک‌های برشی کم شده و ترک‌های ناشی از خمش افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۵ الف) نمایش داده شده‌است، از نمونه C1 با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، به نمونه‌های C2 و C3 به ترتیب با نسبت دهانه به ارتفاع ۳ و ۴، اثر برش کاسته شده و اثر خمش افزایش می‌یابد. به



(الف)

شکل ۴. جزئیات آزمایش و وسایل اندازه‌گیری؛ الف) دستگاه انجام آزمایش و بارگذاری، ب) محل قرار گیری جابه‌جایی سنج‌ها

Fig. 4. Test Setup; a) Loading frame; b) Schematic representation of the LVDTs and Load Cell installation method (main and lateral sides)



شکل ۵: الگوی ترکخوردگی تیرهای عمیق (الف) تقویت نشده (ب) تقویت شده به روش NSM-EBR
Fig. 5. Deep beams crack pattern a) not strengthen b) strengthen by NSM-EBR method

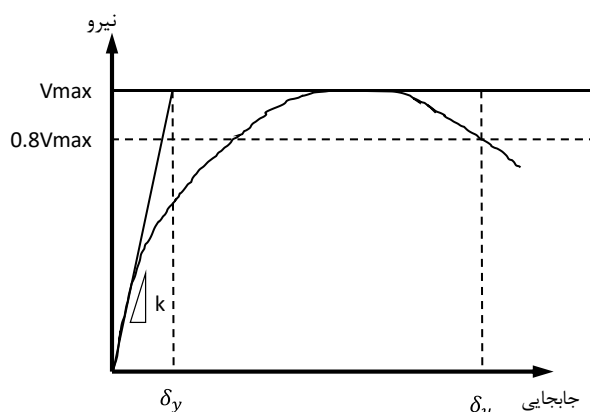
است و بقیه ترک‌های از ناحیه خارج شیارها تشکیل شده‌اند. این موارد در سایر نمونه‌های بدون تقویت یعنی C2 و C3 نیز قابل مشاهده می‌باشد. اما باید توجه داشت که با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع در این تیرها، از تعداد و عمق ترک‌های برشی کم شده و ترک‌های ناشی از خمش افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۵ الف) نمایش داده شده‌است، از نمونه C1 با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، به نمونه‌های C2 و C3 به ترتیب با نسبت دهانه به ارتفاع ۳ و ۴، اثر برش کاسته شده و اثر خمش افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در نمونه C3، مود شکست برشی حاکم در نمونه‌های C1 و C2 تغییر کرده و مود شکست این نمونه خمشی می‌باشد.

در ادامه، همانطور که در شکل (۵ ب) نمایش داده شده‌است، در نمونه C1-NSM-EBR که نسبت دهانه به ارتفاع آن ۲ بوده و با روش NSM-EBR تقویت شده، در هنگام بارگذاری مشاهده شد که ابتدا ترک‌ها در اطراف شیارهای NSM ایجاد می‌شود و سپس عرض آنها افزایش می‌یابد. در این حالت تعداد ترک‌ها نسبت به نمونه بدون تقویت مشابه (C1) افزایش داشته است. به همین دلیل

در ادامه تصویر (۵ ب)، الگوی ترک خوردگی و مود شکست نمونه‌های C2-NSM-EBR و C3-NSM-EBR نیز نمایش داده شده است. در نمونه C2-NSM-EBR نیز شکست برشی مشهود است. اما در مقایسه با نمونه تقویت نشده مشابه (C2)، در این نمونه تثبیت شده، باندهای کششی ترک خورده افزایش داشته و یک حالت لوزی در اطراف ناحیه ترک خورده ایجاد شده‌است. همچنین یک سری ترک‌های برشی ۴۵ درجه در سمت راست نمونه مشاهده می‌شود. ولی تمرکز اصلی ترک‌ها در قسمت سمت چپ تیر است. تعداد ترک‌ها و عرض آنها نسبت به نمونه شاهد C2 بهبود داشته است. افزایش ناحیه کششی و تعداد ترک‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود که در این تیر قابل مشاهده است. در تصویر مربوط به نمونه C3-NSM-EBR، برخی ترک‌های خمشی در وسط تیر مشاهده می‌شود. اما در مقایسه با نمونه تیر بدون تقویت مشابه (C3) مود شکست تیر از شکست خمشی به شکست برشی تغییر یافته‌است. ترک‌های برشی در اطراف شیارهای NSM مشاهده می‌شود. فقط دو ترک از ناحیه شیارها عبور کرده

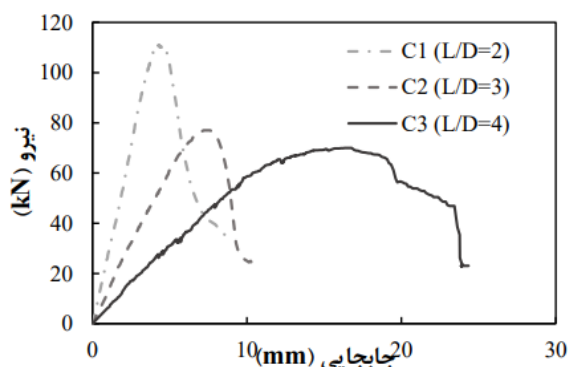
جابه‌جایی نهایی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، جابه‌جایی متناظر با خط واصل شیب ناحیه ابتدایی منحنی و خط افقی متناظر با مقاومت حداکثر نیز به عنوان جابه‌جایی تسلیم نمونه استفاده می‌شود. مقدار شکل‌پذیری به نسبت جابه‌جایی نهایی و جابه‌جایی تسلیم تعریف می‌شود.

در شکل (۷) منحنی بار-جابه‌جایی نمونه‌های بدون تقویت (C1، C2 و C3) با نسبت دهانه به عمق‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع، ظرفیت باربری و سختی نمونه کاهش یافته، اما شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد. مقدار مقاومت نهایی نمونه‌های شاهد C1، C2 و C3 به ترتیب ۱۱، ۷۷ و ۷۰ کیلونیوتن می‌باشد. با افزایش نسبت دهانه به عمق از ۲ به ۳ مقدار مقاومت نمونه حدود ۳۱٪ کاهش داشته است. همچنین با افزایش دهانه به ارتفاع ۲ به ۴، مقدار مقاومت حدود ۳۷٪ کاهش داشته است.



شکل ۶. منحنی بار - جابه‌جایی برای تعیین شکل‌پذیری

Fig. 6. Load -displacement curve for calculating ductility



شکل ۷. منحنی بار - جابه‌جایی نمونه‌های بدون تقویت

Fig. 7. load -displacement curve of samples without strengthening

می‌توان انتظار افزایش باربری از نمونه تقویت شده داشت. همچنین مشاهده شد که به دلیل اینکه این شیارهای تقویت شده سبب افزایش طول ناحیه باند کششی شده‌اند، عملاً به جای دو باند کششی، چهار باند کششی به صورت لوزی در اطراف شیارها ایجاد شده‌است که همین مورد سبب افزایش ظرفیت باربری برشی نمونه می‌شود. باز هم شکست نمونه به صورت برشی است ولی با این تفاوت که هم ظرفیت و هم تعداد ترک‌های برشی افزایش داشته یافته‌است. علاوه بر این، مشاهده شد که جداشدگی بین الیاف‌ها و شیارها رخ نداده است که منجر به جلوگیری از شکست زودرس سیستم تقویتی شده است.

در ادامه تصویر (۵ ب)، الگوی ترک خوردگی و مود شکست نمونه‌های C2-NSM-EBR و C3-NSM-EBR نیز نمایش داده شده است. در نمونه C2-NSM-EBR نیز شکست برشی مشهود است. اما در مقایسه با نمونه تقویت نشده مشابه (C2)، در این نمونه تثبیت شده، باندهای کششی ترک خورده افزایش داشته و یک حالت لوزی در اطراف ناحیه ترک خورده ایجاد شده‌است. همچنین یک سری ترک‌های برشی ۴۵ درجه در سمت راست نمونه مشاهده می‌شود. ولی تمرکز اصلی ترک‌ها در قسمت سمت چپ تیر است. تعداد ترک‌ها و عرض آنها نسبت به نمونه شاهد C2 بهبود داشته است. افزایش ناحیه کششی و تعداد ترک‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود که در این تیر قابل مشاهده است. در تصویر مربوط به نمونه C3-NSM-EBR، برخی ترک‌های خمشی در وسط تیر مشاهده می‌شود. اما در مقایسه با نمونه تیر بدون تقویت مشابه (C3) مود شکست تیر از شکست خمشی به شکست برشی تغییر یافته‌است. ترک‌های برشی در اطراف شیارهای NSM مشاهده می‌شود. فقط دو ترک از ناحیه شیارها عبور کرده است و بقیه ترک‌های از ناحیه خارج شیارها تشکیل شده‌اند.

۲-۴- منحنی نیرو - جابه‌جایی

در این قسمت، به بررسی منحنی نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های آزمایشگاهی پرداخته شده و تاثیر روش ترکیبی NSM-EBR بر آنها مورد بحث قرار گرفته است. به منظور بررسی کمی و عددی سختی و شکل‌پذیری نمونه‌ها از منحنی دو خطی مطابق شکل (۶) استفاده می‌شود. مطابق این منحنی، جابه‌جایی متناظر با مقاومتی که به میزان ۲۰٪ از مقدار مقاومت حداکثر افت پیدا کرده، به عنوان

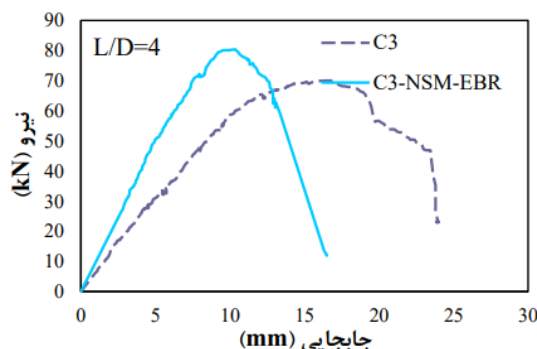
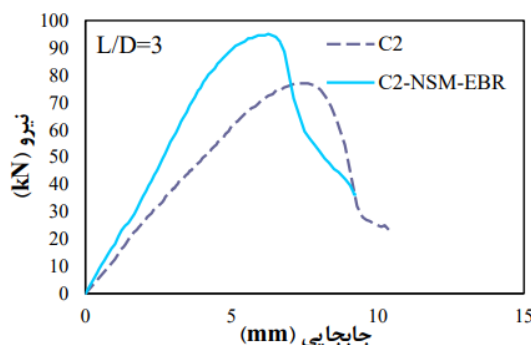
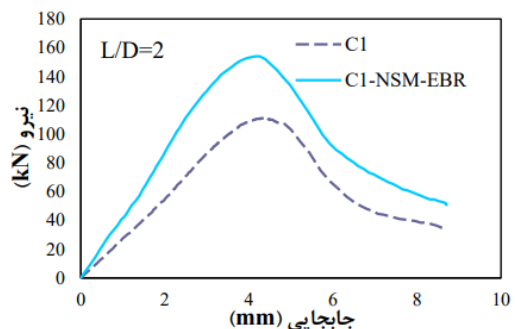
در ادامه در شکل (۸)، نمودار منحنی نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های تقویت شده، در کنار نمونه‌های تقویت نشده مشابه رسم شده‌اند و تاثیر این روش از تقویت روی تیرهای عمیق مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل (۸) منحنی بار-جابه‌جایی نمونه تقویت شده با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ در مقایسه با نمونه شاهد C1 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار ظرفیت باربری نمونه تقویت شده بیشتر از نمونه تقویت نشده است. همچنین سختی نمونه به دلیل کاهش ترک خوردگی، افزایش داشته و سختی تیر تقویت شده نیز افزایش داشته است. مقدار مقاومت نمونه تقویت شده و بدون تقویت به ترتیب، ۱۵۴ و ۱۱۱ کیلونیوتن می‌باشد که با تقویت برشی نمونه مقدار مقاومت حدود ۳۹٪ افزایش داشته است. همانطور که از این شکل برای نمونه دوم مشاهده می‌شود، با ایجاد طرح تقویت، مقدار مقاومت و سختی افزایش داشته است. مقدار جابه‌جایی نهایی اندکی کاهش یافته که نشان می‌دهد افزایش سختی نمونه سبب کاهش شکل پذیری نمونه شده است. در این حالت مقدار مقاومت نمونه تقویت شده نسبت به نمونه بدون تقویت حدود ۲۳٪ افزایش داشته است.

در نهایت، برای نمونه آخر، با اجرای طرح تقویت مذکور، مقدار مقاومت حدود ۱۴٪ افزایش داشته است. مقدار سختی نمونه پس از تقویت نیز افزایش یافته است. یعنی با توجه به نوع تقویت تیر، مود شکست تیر از خمشی به برشی تغییر کرده و همچنین سختی تیر افزایش داشته است. این افزایش سختی به دلیل کاهش تعداد و عرض ترک‌ها می‌باشد.

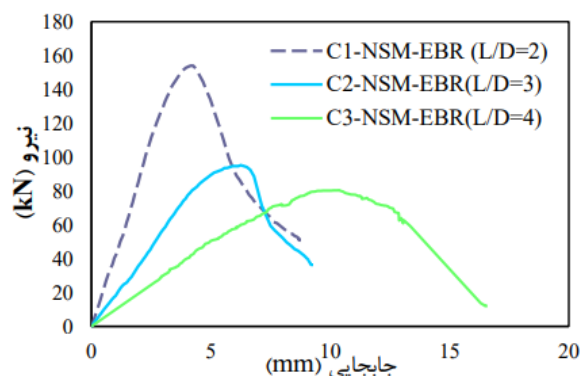
در شکل (۹) نمونه‌های تقویت شده به روش ترکیبی NSM-EBR در کنار یکدیگر رسم شده و تاثیر نسبت دهانه به عمق تیرها بر این روش تقویت بررسی شده است. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، مشابه با روند موجود در نمونه‌های بدون تقویت، با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع، مقاومت و سختی کاهش یافته اما شکل پذیری افزایش می‌یابد.

خلاصه نتایج شرح داده شده در جدول (۳) جمع‌آوری شده است. با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مود شکست تیرهای عمیق عمدتاً به صورت برشی است ولی با این حال وجود یک شکل‌پذیری برای آنها ضروری است. نمونه با نسبت دهانه به ارتفاع ۴ دارای



شکل ۸. منحنی بار - جابه‌جایی نمونه‌های بدون تقویت در کنار نمونه‌های تقویت شده مشابه

Fig. 8. load - displacement curve of deep beams with and without NSM-EBR strengthen method.



شکل ۹. منحنی بار-جابه‌جایی تیر عمیق با نسبت دهانه‌های مختلف و روش تقویت NSM-EBR

Fig. 9. load - displacement curve of deep beams with different L/h ratio

جدول ۳. نتایج مربوط به نمونه‌های با و بدون تقویت برشی.

Table 3. Results for samples with and without shear strengthening

Failure Type	Stiffness (kN/mm)	Ductility factor	Ultimate (mm) Disp	Yield Disp (mm)	Max Load (kN)	Strengthening method	Length to height ratio (L/h)	Sample name
Shear	30.08	1.47	5.42	3.69	111	–	2	C1
Shear	13.57	1.55	8.66	5.60	77	–	3	C2
flexural	6.63	1.88	19.84	10.56	70	–	4	C3
Shear	46.95	1.63	5.33	3.28	154	NSM-EBR	2	C1-NSM-EBR
Shear	20.04	1.47	6.99	4.74	95	NSM-EBR	3	C2-NSM-EBR
Shear	10.18	1.64	12.90	7.86	80	NSM-EBR	4	C3-NSM-EBR NSM-EBR

روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. فقط در نمونه C1 که نسبت دهانه به ارتفاع آن ۲ می‌باشد، تقویت برشی سبب افزایش حدود ۱۱٪ در شکل‌پذیری نمونه شده است. در شکل (۱۰ ب) مشاهده می‌شود که سختی نمونه همبستگی معکوس قوی با نسبت دهانه به ارتفاع دارد. همین روند در نمونه‌های تقویت شده نیز مشاهده می‌شود. تقویت برشی نمونه‌ها به روش NSM-EBR می‌تواند سبب افزایش سختی تیرهای عمیق شود. مقدار افزایش سختی در نمونه C1، C2 و C3 که به روش NSM-EBR تقویت شده‌اند به ترتیب، حدوداً ۵۶٪، ۴۶٪ و ۵۴٪ می‌باشد.

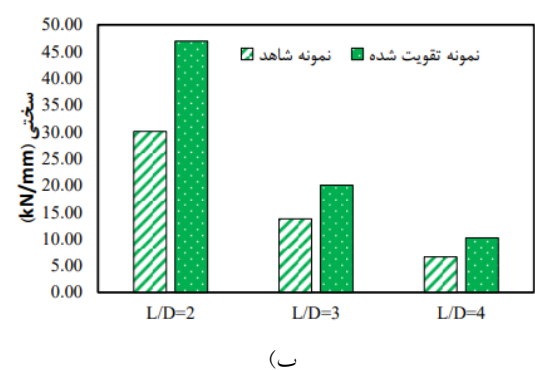
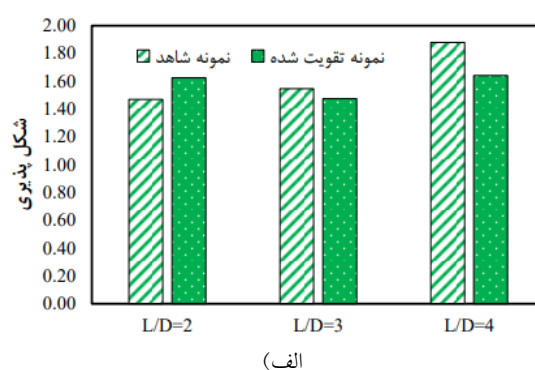
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به صورت آزمایشگاهی یک روش نوین یعنی NSM-EBR برای تقویت برشی تیرهای عمیق با نسبت دهانه به عمق ۲، ۳ و ۴ پیشنهاد شد. بر اساس تحقیق انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت:

- نسبت دهانه به عمق تیر تاثیر زیادی بر نوع شکست داشت به طوری که هرچه این نسبت افزایش می‌یابد، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد زیرا مود شکست به سمت خمشی متمایل می‌شود. همچنین هرچه این نسبت افزایش می‌یابد، مقاومت نمونه کمتر و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد.

- با تقویت برشی تیرهای عمیق با استفاده از روش NSM-EBR، نوع شکست تیرهایی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ و ۳، تغییری نکرده اما ظرفیت باربری تیرها افزایش یافت. همچنین با این تقویت در تیری با نسبت دهانه به ارتفاع ۴، علاوه افزایش ظرفیت باربری، نوع شکست نیز به خمشی تغییر یافت.

- در حالت‌های شکست مشاهده شد که هیچ گونه جداشدگی و لغزش در سیستم تقویت NSM-EBR مشاهده نشد. به دلیل وجود



شکل ۱۰. مقایسه نمونه‌ها از نظر الف) نسبت شکل‌پذیری و ب) سختی

Fig. 10. Comparison of the samples in terms of a) ductility ratio and B) stiffness

شکل‌پذیری بیش‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر است. در همه نمونه به جز نمونه C1 با تقویت تیرها، شکل‌پذیری کاهش داشته است. به دلیل اینکه وجود تقویت با مواد CFRP سبب سخت‌تر شدن نمونه‌ها شده، مقدار شکل‌پذیری در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. سختی و شکل‌پذیری نمونه‌ها بطور خاص، در شکل (۱۰) رسم شده است.

همانطور که در شکل (۱۰ الف) مشاهده می‌شود، در نمونه‌های شاهد بدون تقویت، با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع، مقدار شکل‌پذیری افزایش می‌یابد ولی در مورد نمونه‌های تقویت شده

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

سهم نویسندگان

۷۰٪ استاد راهنما - ۳۰٪ دانشجو.

منابع مالی

از هیچ گونه منابع مالی دانشگاه و غیره استفاده نشده است.

قدردانی نویسندگان

مقاله هیچ گونه حمایتی از مراکز یا دانشگاه ندارد.

References

1. Road, Housing and Urban Development Research Center. 1399 (2020). *Design and implementation of reinforced concrete buildings*. Fourth edition. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
2. Arabzadeh, A., Abdul Samad, R. & Danehjoo, F. 1391 (2012). Examination of the limited components of the behavior of reinforced concrete beams of bridges with composite materials. *Journal of Transportation Engineering*, Third year.
3. ACI Committee 318. 2019. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) Commentary*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
4. Eurocode 2. 2005. *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
5. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. & Lam, L. 2002. FRP Strengthened RC Structures. *Journal of Composites for Construction*, 6(3), pp. 232-245.
6. Islam, M.I., Mansur, M.A. & Maalej, M. 2005. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using externally bonded FRP system. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), pp. 413-420.
7. Albidah, A., Abadel, A., Abbas, H., Almusallam, T. & Al-Salloum, Y. 2019. Experimental and analytical study of strengthening schemes for shear deficient RC deep beams. *Construction and Building Materials*, 216, pp. 673-686.
8. Azam, R., Soudkib, K., Westb, J.S. & Noël, M. 2018. Shear strengthening of RC deep beams with cement-based composites. *Engineering Structures*, 172, pp. 929-937.
9. Mansour, M. & El-Maaddawy, T. 2021. Testing and modeling of deep beams strengthened with NSM-CFRP reinforcement around cutouts. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00670.
10. Burningham, C.A., Pantelides, C.P. & Reaveley, L.D. 2015. Repair of reinforced concrete deep beams using posttensioned CFRP rods. *Composite Structures*, 125, pp. 256-265.
11. Kumari, A. & Nayak, A.N. 2021. An experimental approach for strengthening of RC Deep Beams with web openings using GFRP fabrics and gas actuated fasteners. *Journal of Building Engineering*, 35, 102027.
12. Al-Issawi, A.S.H. & Kammona, H.H. 2018. Estimation of Maximum Shear Capacity of RC Deep Beams Strengthened by NSM Steel Bars. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*, 26(3).
13. Hatem, M., Samad, A.A., Mohamad, N., Inn, G.W. & Mustafa, W. 2020. Numerical analysis of RC deep beams strengthened in shear with NSM CFRP bars. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*.
14. Ibrahim, M., Wakjira, T. & Ebead, U. 2020. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fiber reinforced polymer strips. *Engineering Structures Journal*, 210, 110412.
15. Zhang, S.S., Kea, Y., Smith, S.T., Zhu, H.P. & Wang, Z.L. 2021. Effect of FRP U-jackets on the behavior of RC beams strengthened in flexure with NSM CFRP strips. *Composite Structures*, 256, 113095.
16. Arabzade, A. & Mahanpoor, H. 2011. The Experimental Study of the Effect of FRP Laminates on Shear Strength of RC Fixed Ended Deep Beams. *MCEJ*, 11.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Arabzadeh, A., Bahel Jadan, A. 2026. Effect of the crater-height ratio on the shear behavior of deep concrete beams reinforced with carbon polymer fibers by the NSM-EBR method, *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp. 110-112

DOI: 10.48311/mcej.2026.12728

