

Laboratory investigation of the effect of opening on the capacity of deep reinforced concrete beams with GFRP bars

M. Mirzaie Aliabadi¹, P. Homami^{2*}, A. Massumi³

1- Ph. D. Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
3- Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The use of composite rebars is increasing in the construction industry due to their characteristics such as high tensile strength, corrosion resistance, light weight and reasonable price compared to steel rebars, however, the behavior of deep concrete beams with opening, reinforced with GFRP rebars Less studied. In this research, the behavior of 7 deep reinforced concrete beams with and without openings reinforced with GFRP rebar was investigated under 4-point bending test. Dimensions, number and placement of openings were included as research variables. In all samples, the ratio of the shear span to the depth of the beam is 0.9. The results of the research show that placing an opening in the load transfer path, with diameters of 14 and 24 cm, respectively, reduces the final strength of the beams by 68 and 75% compared to the beam without opening. The final strength of the samples decreases by 6% by increasing the number of openings with a diameter of 14 cm from one to two, and by 3% for the samples with an increase of the number of openings with a diameter of 24 cm from one to two. By examining the results, it was found that placing the opening in the middle of the beam opening does not reduce the strength of the beam. The failure mode in all beams is from shear type and rupture along the load application site to the support, and the first main cracks formed in the beams are of bending, shearing or bending-shearing type depending on the dimensions of the opening and its location. The test results were compared with the relations in the ACI regulations and it was determined that the shear capacity of the beams based on the relations of the regulations is on average 14% lower than the test results.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 January 2024
Revise Date: 09 May 2024
Accept Date: 05 June 2024

Keywords:

Deep beam with opening
GFRP rebar
four-point bending
crack propagation
failure mode

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.433193.3317](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.433193.3317)

*Corresponding author: Peyman Homami
Email address: homami@khu.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تاثیر بازشو در ظرفیت تیرهای بتن مسلح عمیق با میلگرد GFRP

مهدی میرزائی علی آبادی¹، پیمان همامی^{2*}، علی معصومی³

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

استفاده از میلگردهای کامپوزیت به دلیل ویژگی‌های آن‌ها مانند مقاومت کششی بالا، مقاوم در برابر خوردگی، وزن کم و قیمت مناسب نسبت به میلگردهای فولادی در صنعت ساختمان رو به افزایش است، با این وجود رفتار تیرهای بتنی عمیق دارای بازشو، مسلح شده با میلگرد GFRP کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق رفتار 7 تیر عمیق بتن مسلح با و بدون بازشو مسلح شده با میلگرد GFRP، تحت آزمایش خمش 4 نقطه مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد، تعداد و جانمایی بازشوها به عنوان متغیرهای تحقیق لحاظ گردید. در همه نمونه‌ها نسبت دهانه برشی به عمق تیر 0/9 در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد قرارگیری یک بازشو در مسیر انتقال بار، با قطرهای 14 و 24 سانتی‌متر به ترتیب سبب کاهش مقاومت نهایی تیرها به میزان 68 و 75 درصد نسبت به تیر بدون بازشو می‌شود. مقاومت نهایی برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 14 سانتی‌متر از یک به دو عدد، 6 درصد و برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 24 سانتی‌متر از یک به دو عدد 3 درصد کاهش می‌یابد. با بررسی نتایج مشخص گردید قرارگیری بازشو در وسط دهانه تیر، سبب کاهش مقاومت تیر نمی‌گردد. با بررسی نتایج مشخص گردید مد شکست در همه تیرها از نوع برشی و گسیختگی در امتداد محل اعمال بار تا تکیه‌گاه رخ داده است و اولین ترک‌های اصلی تشکیل شده در تیرها بسته به ابعاد بازشو و محل آن، از نوع خمشی، برشی یا خمشی-برشی است. نتایج آزمایش با روابط موجود در آیین‌نامه ACI مقایسه گردید و مشخص گردید ظرفیت برشی تیرها بر اساس روابط آیین‌نامه به طور میانگین به میزان 14 درصد کمتر از نتایج آزمایش می‌باشد.

کلمات کلیدی: تیر عمیق دارای بازشو، میلگرد GFRP، خمش چهار نقطه، گسترش ترک، مد شکست

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.433193.3317	1403/11/30	1403/11/30	1403/03/16	1403/02/20	1402/11/29
			*نویسنده مسئول:		پیمان همامی
			پست الکترونیکی:		homami@khu.ac.ir

1- مقدمه

تعبیه بازشو در المان‌های سازه‌ای مانند تیرها به منظور عبور تاسیسات در ساختمان‌ها کاربرد فراوانی دارد [1]. یکی از انواع تیرها، تیرهای عمیق می‌باشد. تیرهای عمیق بتن‌آرمه کاربرد وسیعی در سازه‌های بلندمرتبه، پل‌ها، سدها، مخازن، دیوارهای برشی، دیافراگم‌های کف، دال‌ها و شاه‌تیرهای انتقال در سازه‌های دریایی دارند [2]. با توجه به رفتار این نوع تیرها، تئوری اویلر-برنولی [3] برای آن‌ها صدق نمی‌کند و طراحی آن‌ها با تیرهای معمولی تفاوت دارد. وجود جان بلند در این گونه تیرها سبب شده است تا ظرفیت ایجاد بازشو برای عبور تاسیسات در آن‌ها در نظر گرفته شود. ایجاد بازشو سبب کاهش ظرفیت باربری تیر می‌شود [4] و رفتار تیرها و نحوه گسیختگی آن‌ها به عوامل گوناگونی از جمله ابعاد، شکل و محل قرارگیری بازشو بستگی دارد [5,6]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تیرهای عمیق با و بدون بازشو انجام شده است، که منجر به ارائه تئوری‌ها و روش‌های هوشمندانه جهت محاسبه ظرفیت برشی آن‌ها شده است [7]. شکست غالب در این نوع تیرها به صورت برشی است [8] اما احتمال وقوع شکست خمشی-برشی و موضعی در محل بازشوها و یا در محدوده اعمال بار نیز وجود دارد [9].

عوامل گوناگونی مانند شکل و ابعاد مقطع تیر (مقطع مستطیلی، T شکل)، مقاومت بتن، نحوه چیدمان و مقدار آرماتورهای طولی و عرضی، نسبت دهانه برش خالص به عمق تیر، نوع و محل اعمال بار، ابعاد، محل جانمایی و شکل هندسی بازشو بر روی نحوه رفتار تیر تاثیرگذار است [10]. تحقیقات در خصوص تیرهای دارای بازشو از سال 1967 آغاز شده است و در ابتدا تمرکز محققین بر بازشو با شکل هندسی مستطیلی بوده است [11]. بررسی رفتار تیرهای عمیق دارای بازشو مستطیلی شکل در دو منطقه داخل و خارج از محدوده دهانه برشی نشان می‌دهد که مد شکست تیرها به محل جانمایی بازشوها وابسته است و قرارگیری بازشوها در داخل دهانه برشی سبب کاهش بیشتر ظرفیت باربری تیرها می‌شود [12,13]. در تحقیقی دیگر تاثیر آرایش میلگردها در جان تیر مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج نشان داد که وجود میلگردهای قائم نسبت به میلگردهای افقی در بهبود ظرفیت رفتار برشی تیر موثرتر است [14].

هو و همکاران شش تیر عمیق با بازشو دوزنقه‌ای شکل را مورد آزمایش قرار دادند. جانمایی بازشوها در وسط دهانه تا محدوده دهانه برشی تیر لحاظ شده است. نتایج تحقیق نشان داد که موقعیت بازشو در ظرفیت نهایی تیر تاثیر به سزایی دارد. با بررسی تیرها، مدهای شکست متفاوت و شکست‌های موضعی در گوشه‌های بازشوها دیده شد [15].

گایسپو و گیاونی به بررسی رفتار تیرهای عمیق با بازشوها با هندسه دایره‌ای با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی پرداختند. در این تحقیق 20 تیر عمیق با و بدون بازشو تحت بارگذاری خمشی 4 نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها دارای آرایش متفاوت میلگرد و جانمایی بازشوها بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مد شکست و اولین ترک بستگی به محل بازشو دارد و اگر بازشو در وسط دهانه مقطع تیر قرار داده شود، تاثیر ناچیزی بر مقاومت نهایی تیر دارد. در این تحقیق نشان داده شد در صورتی که بازشوها در محدوده دهانه برشی قرار گیرند، ظرفیت باربری تیر 18 تا 35 درصد کاهش می‌یابد [10].

رفتار برشی در اعضای بتن مسلح پدیده‌ای پیچیده و تحت عوامل مختلفی است [16]، اما این پیچیدگی در خصوص تیرهای عمیق مضاعف می‌شود. دلیل این امر نحوه انتقال بار و توزیع کرنش غیرخطی در مقطع است [17]. تیرهای عمیق با استفاده از روش خرپا طراحی می‌گردند [18]. در این روش با استفاده از المان‌های فشاری و کششی در تیرها نحوه انتقال بار به تکیه گاه‌ها مدل می‌شود [19]. در تیرهای عمیق دارای بازشو بنا به محل قرارگیری بازشو، ممکن است بخش یا تمام مسیر انتقال بار حذف شود که این موضوع سبب کاهش ظرفیت باربری تیر می‌شود [20]. به منظور ممانعت از کاهش ظرفیت باربری این نوع تیرها از صفحات کامپوزیت استفاده می‌شود [21-23]. کاربرد استفاده از مواد کامپوزیت فقط به مقاوم‌سازی المان‌های سازه‌ای محدود نمی‌شود و از انواع میلگردهای کامپوزیت در صنعت ساختمان‌سازی استفاده می‌شود [24-27]. استفاده از میلگردهای FRP در تیرهای عمیق به ویژه در مناطقی که بتن در معرض خوردگی شدید است متداول است [28-30].

بر اساس تحقیقات سال‌های گذشته مشخص شده است، بررسی رفتار تیرهای عمیق دارای بازشو مسلح شده با میلگردهای کامپوزیت بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. ژاکوب و همکاران به بررسی آزمایشگاهی رفتار 7 تیر عمیق بتنی مسلح شده با میلگرد GFRP و فولادی، با و بدون بازشو پرداختند. در این تحقیق الگوهای ترک، مدهای شکست و تاثیر بازشو در مقاومت تیرها ارزیابی شده است. نتایج تحقیق نشان داد که مقاومت تیرهای عمیق بتنی بدون بازشو مسلح شده با GFRP مشابه مقاومت تیرهای عمیق بتنی بدون بازشو مسلح شده با میلگرد فولادی است اما در تیرهای دارای بازشو مسلح شده با میلگرد GFRP این مقدار کم‌تر از تیرهای دارای بازشو مسلح شده با میلگرد فولادی می‌باشد [31]. مرگان و پارسانا به بررسی رفتار آزمایشگاهی 6 تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو پرداختند، به طوری که 4 تیر با میلگرد GFRP و 2 تیر با میلگرد فولادی مسلح شده‌اند. در این تحقیق ظرفیت نهایی تیرها، تعداد ترک‌ها و نحوه تشکیل و گسترش آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های ساخته شده در نرم افزار اجزا محدود مقایسه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ظرفیت نهایی تیرهای عمیق مسلح شده با میلگرد GFRP نسبت به تیرهای عمیق مسلح شده با میلگرد فولادی کم‌تر است [32]. عرباسی و المدوی 12 تیر بتنی عمیق مسلح شده با GFRP را مورد ارزیابی قرار دادند. یک تیر بدون بازشو و سایر تیرها دارای بازشو در دهانه برشی می‌باشند. متغیرهای در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل ارتفاع بازشو، مقاومت بتن و نوع چیدمان میلگردها در ناحیه ناپیوستگی تیر می‌باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع بازشو، مقاومت تیر کاهش می‌یابد. همچنین چیدمان قطری میلگردها در افزایش ظرفیت تیر تاثیر مثبتی دارد. ظرفیت تیر با روش‌های موجود در آیین‌نامه آمریکا و کانادا محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است [33].

رشد چشمگیر استفاده از میلگردهای کامپوزیت در صنعت ساختمان در سال‌های گذشته از یکسو و نبود نتایج آزمایشگاهی کافی از رفتار سازه‌های تیرهای عمیق با بازشو مسلح شده با انواع میلگردهای FRP، از سوی دیگر، توجه بیش از پیش به این موضوع را می‌طلبد. با بررسی آیین‌نامه‌های موجود مشخص شده است که در خصوص طراحی تیرهای عمیق دارای بازشو مسلح شده با میلگرد GFRP رابطه صریحی ذکر نشده است و تحقیقات پیش‌رو می‌تواند به عنوان بخشی از تحقیقات آینده درباره این نوع از المان‌های سازه‌ای باشد.

در این تحقیق هفت تیر عمیق مسلح شده با میلگرد طولی GFRP و میلگرد عرضی فولادی، با و بدون بازشو تا لحظه گسیختگی مورد آزمایش خمش چهار نقطه قرار گرفت. به منظور بررسی رفتار سازه‌های تیرها، متغیرهای ابعاد، تعداد و جانمایی بازشوها در نظر گرفته شد. نوآوری تحقیق پیش‌رو شامل بررسی آزمایشگاهی تیرهای عمیق دارای بازشو مسلح شده با میلگرد GFRP و جانمایی مرکز بازشوها در مکانی غیر از محور انتقال بار تا تکیه‌گاه‌ها و نبود روابط در خصوص این المان‌ها در آیین‌نامه‌های متداول طراحی می‌باشد. نتایج تحقیق اطلاعات مناسبی از رفتار سازه‌های شامل نحوه گسیختگی، مدهای شکست، تشکیل ترک و نحوه گسترش آن، در اختیار خواننده قرار می‌دهد.

2- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی جزئیات نمونه‌ها، مشخصات مصالح و نحوه انجام آزمایش پرداخته شده است.

2-1- مشخصات نمونه‌ها

7 تیر به ابعاد مقطع 50×15 سانتی متر و طول 160 سانتی متر با نسبت دهانه برشی به ارتفاع تیر $0/9$ تحت بارگذاری خمش 4 نقطه قرار گرفته‌اند. در همه نمونه‌ها طول دهانه موثر تیر ثابت و برابر 100 سانتی متر در نظر گرفته شده است (شکل 1). یک تیر به عنوان تیر شاهد، بدون بازشو است و 6 تیر دارای بازشو می‌باشد. در همه نمونه‌ها از میلگردهای طولی GFRP به قطر 10 میلی‌متر در ناحیه کشش و فشار تیر استفاده شده است. 2 میلگرد طولی در ناحیه کشش و 2 میلگرد طولی در ناحیه فشاری تیر تعبیه شده است. لازم به توضیح است با توجه به عدم کارایی میلگرد GFRP در فشار، این دو میلگرد به عنوان تکیه گاهی برای میلگردهای عرضی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تمامی میلگردهای عرضی در تیرها از جنس فولادی عاج‌دار و به قطر 8 میلی‌متر می‌باشند. در خصوص آرایش میلگردهای عرضی لازم به توضیح است که با توجه به ایجاد بازشو در تیرها و به منظور ایجاد پیوستگی و مشاهده رفتار مناسب‌تر تیرها تحت بار خمش 4 نقطه

و جلوگیری از شکست کاملاً ترد ناشی از ایجاد ناپیوستگی در مقطع تیر، تیرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که جانمایی میلگردهای عرضی در هر دو طرف بازشو تا محدوده 15 سانتی متری از آن، به فاصله 5 سانتی متر لحاظ گردد. همچنین در محدوده تکیه‌گاه‌ها نیز به دلیل وجود برش زیاد تا فاصله 15 سانتی متر از آکس تکیه‌گاه، فاصله آرماتورهای عرضی 5 سانتی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به لزوم تامین مهارشدگی میلگردهای GFRP در بتن و جلوگیری از جداسازی آن و بر اساس تحقیقات محققین [34-38]، در همه نمونه‌ها، 30 سانتی متر از طرفین تکیه‌گاه به عنوان طول مهارشدگی برای میلگردهای طولی GFRP در نظر گرفته شده است و این بخش از تیر در تحمل بار نقشی ندارد. جانمایی محل تکیه‌گاه‌ها از ابتدای تیر در فاصله 30 و 130 سانتی متری می‌باشد. با توجه به مشخصات تیرها از جمله قطر بازشوها (14 و 24 سانتی متر)، محل قرارگیری آن‌ها (وسط تیر یا در دهانه برشی در سمت چپ و راست) و تعداد بازشوها (بدون بازشو، یک بازشو و یا دو بازشو)، تیرها با استفاده از پروتکل جدول 1 نامگذاری شده‌اند.



شکل 1: ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش

جدول 1: روش نامگذاری تیرها

نمونه	شماره نمونه	تعداد بازشو	موقعیت بازشو	قطر بازشو
N	1,2,3,4,5,6,7	H0	-	-
		H1	C L	D24, D14
		H2	L&R	

با بررسی پارامترهای موثر در رفتار تیرهای عمیق، سه متغیر تعداد، ابعاد و جانمایی بازشو مورد مطالعه واقع شد. با توجه به ابعاد مقطع و ارتفاع تیر، بازشوهایی به قطرهای 14 و 24 سانتی متر در نظر گرفته شد (به ترتیب قطرهای بازشو حدود 0/3 و 0/48 ارتفاع مقطع می‌باشند). به عبارت دیگر بازشوهایی با قطر 14 سانتی متر نماینده بازشوهایی کوچک و بازشو با قطر 24 سانتی متر نماینده بازشوهایی بزرگ می‌باشند. جانمایی در دو محدوده برشی و وسط تیر نیز به منظور بررسی رفتار تیرها در قرارگیری بازشو در مسیر انتقال بار و خارج از آن تعبیه گردید. در خصوص تعداد نیز محققین دو بازشو در طرفین تیر را برای بازشوهایی کوچک و بزرگ لحاظ نمودند تا اثر افزایش تعداد بازشو را بررسی نمایند. با بررسی نتایج تحقیقات گذشته نسبت‌های متنوعی برای فاصله بار تا تکیه‌گاه نسبت به ارتفاع تیر در نظر گرفته شده است و با توجه به پیشینه تحقیق افزایش این نسبت سبب کاهش در مقاومت نهایی تیرهای عمیق می‌شود. فلذا به منظور نمود بیشتر این موضوع و بررسی رفتار تیرها این فاصله برابر 0/9 لحاظ گردید.

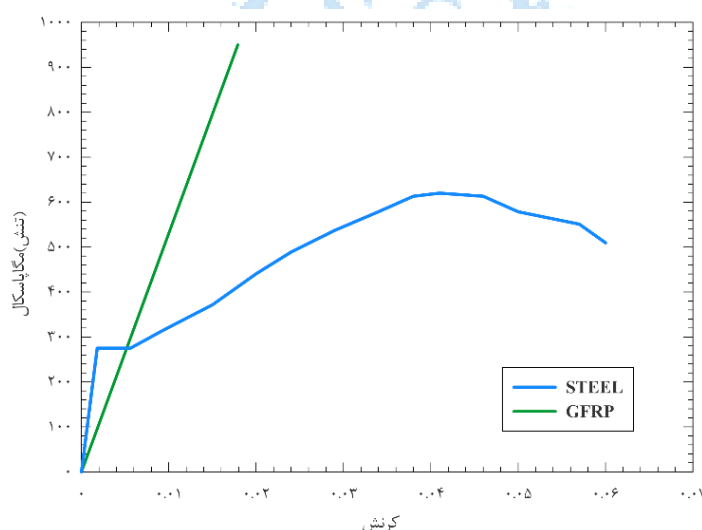
2-2- مشخصات مصالح

با توجه به ابعاد مقطع تیر و عرض بسیار کم آن (15 سانتی متر)، و به منظور جلوگیری از کرم شدن بتن یا جدایش سنگدانه‌ها که به دلیل عدم یکنواختی پخش بتن در زمان بتن‌ریزی صورت می‌پذیرد و همچنین لزوم ویبره مناسب قالب‌ها، از طرح اختلاط بتن با دانه‌بندی ریز استفاده گردید و همه نمونه‌ها در یک نوبت بتن‌ریزی شدند. لازم به ذکر است در انتخاب ابعاد مقاطع و میلگردها و اجزای بتن، امکان استفاده از مدل‌های مقیاس شده میسر نبود زیرا دانه‌بندی سنگدانه‌های تشکیل‌دهنده بتن و همچنین قطر میلگرد کامپوزیت امکان کوچکتر کردن از اعداد واقعی را نداشت، فلذا مقیاس‌های لحاظ شده در آزمایش یک به یک بوده و نمونه‌ها در ابعاد واقعی ساخته شده است. به منظور تسریع در روند افزایش مقاومت بتن، تمامی تیرها به مدت 8 ساعت تحت فشار بخار عمل‌آوری شده‌اند و تا 28 روز تحت مراقبت و آب‌دهی قرار گرفته‌اند. به منظور تعیین مقاومت فشاری بتن از 9 نمونه‌ی مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر مکعب با طول عمر سه روز، هفت روز و بیست و هشت روز استفاده شده است. این نمونه‌ها نیز یک روز در کنار تیرها تحت بخار قرار داده شده‌اند و سپس در استخر آب مستغرق شده‌اند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در جدول 2 ارائه شده است. لازم به ذکر است در محاسبات تمامی مقاومت‌های نمونه‌های مکعبی به نمونه استوانه‌ای تبدیل یافته‌اند.

جدول 2: مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن

شماره نمونه مکعبی	طول عمر بتن	مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال	میانگین مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال
1		21/2	
2	3 روز	21/3	21/4
3		21/8	
4		24/4	
5	7 روز	24/7	24/6
6		24/6	
7		29/8	
8	28 روز	29/2	29/3
9		28/8	

رفتار میلگردهای GFRP کاملاً الاستیک است و مقاومت کششی آن‌ها 950 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته آن‌ها برابر 53 گیگاپاسکال می‌باشد. تنش تسلیم میلگردهای فولادی 275 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته برابر 200 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در شکل 2 نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی و میلگرد GFRP نشان داده شده است.



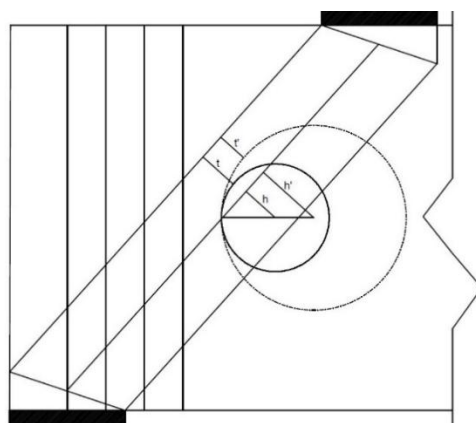
شکل 1: نمودار تنش-کرنش میلگردهای فولادی و GFRP

به منظور ایجاد بازشو در نمونه‌ها، از یونولیت‌های استوانه‌ای با قطر 14 و 24 سانتی‌متر و ارتفاع 15 سانتی‌متر استفاده شده است. پس از بتن‌ریزی و بازکردن قالب‌ها، یونولیت‌ها از بتن جدا شد. در شکل 3 فرآیند ساخت نمونه‌ها شامل آرماتوربندی، قالب‌بندی، بتن‌ریزی، قرارگیری نمونه‌ها تحت بخار، نمونه‌های مکعبی و شرایط نگهداری آن‌ها نشان داده شده است.



شکل 3: فرآیند ساخت نمونه‌ها (الف) آرماتوربندی نمونه‌ها، (ب) نمای از بالا از قالب‌بندی تیرها، (ج) قالب‌بندی تیرها، (د) عملیات بتن‌ریزی، (ه) قرارگیری نمونه‌ها تحت بخار، (و) نمونه‌های مکعبی، (ز) شرایط نگهداری نمونه‌های مکعبی

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص گردید اکثر محققین مرکز بازشو را بر روی محور امتداد محل اعمال نیرو تا تکیه‌گاه قرار داده‌اند و محاسبات ثانویه را بر این اساس لحاظ نموده‌اند. در این تحقیق مراکز بازشوها طوری تعبیه شده‌اند که نسبت به محور مذکور یک فاصله مشخص داشته باشند تا در نتایج آزمایش و با بررسی نحوه تشکیل ترک‌ها، مسیر انتقال بار شناسایی گردد و با مقایسه با روش‌های ارائه شده در آیین‌نامه برای محاسبه ظرفیت المان‌های دارای گسستگی، میزان اختلاف و مقدار محافظه‌کارانه بودن روابط آیین‌نامه احصا شود. در شکل 4 به صورت شماتیک فاصله قرارگیری مرکز بازشوی با قطر 14 سانتی‌متر نسبت به محور اعمال بار تا تکیه‌گاه با (h) و ضخامت بحرانی با (t) و فاصله قرارگیری مرکز بازشوی با قطر 24 سانتی‌متر نسبت به محور اعمال بار تا تکیه‌گاه با (h') و ضخامت بحرانی با (t') نشان داده شده است. منظور از ضخامت بحرانی مسیر احتمالی انتقال بار پس از ایجاد بازشو می‌باشد. در جدول 3 مشخصات قرارگیری مرکز بازشو و تعداد و مشخصات خاموت‌های طولی و عرضی ارائه شده است. مبدا مختصات در بخش سمت چپ و پایین تیر در نظر گرفته شده است و در شکل 4 نشان داده شده است



شکل 4: فاصله قرارگیری مرکز بازشوها نسبت به محور اعمال بار تا تکیه‌گاه و ضخامت‌های بحرانی

جدول 3: مشخصات میلگردهای طولی و عرضی و مختصات بازشوها

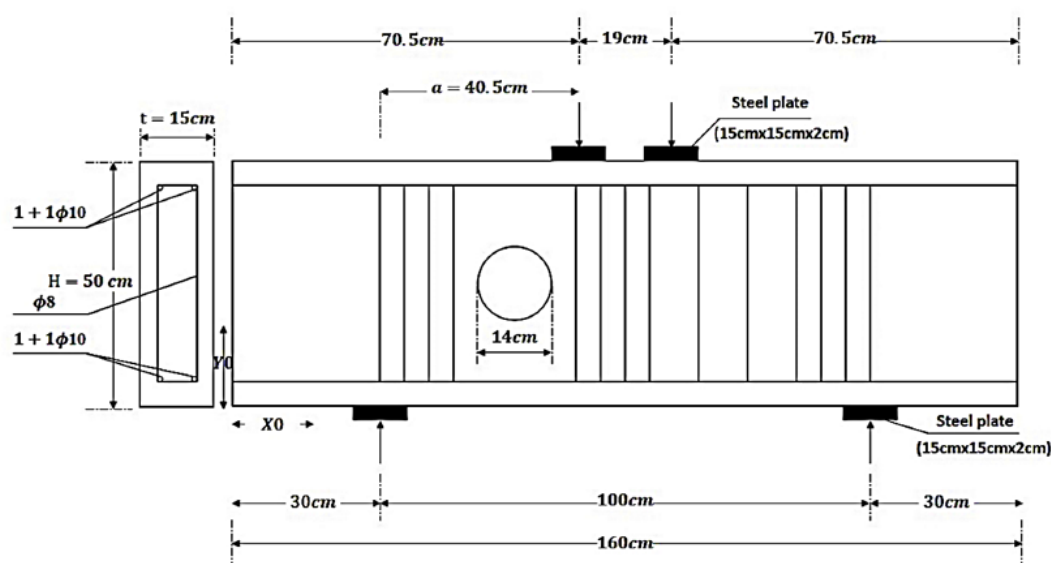
شماره نمونه	مختصات بازشو		میلگرد عرضی	میلگرد طولی
	X_0	Y_0	تعداد و قطر	تعداد و قطر
N1H0	-	-	14 ϕ 8	2 ϕ 10
N2H1LD14	57	25	14 ϕ 8	2 ϕ 10
N3H1CD14	80	25	16 ϕ 8	2 ϕ 10
N4H2L&RD14	57-103	25	13 ϕ 8	2 ϕ 10
N5H1LD24	62	25	13 ϕ 8	2 ϕ 10
N6H1CD24	62	25	16 ϕ 8	2 ϕ 10
N7H2L&RD24	62 - 98	25	10 ϕ 8	2 ϕ 10

در جدول 4 آرایش شماتیک میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول 4: نمایش شماتیک نحوه میلگردگذاری عرضی و جایگذاری بازشوها

نمونه	محل بازشو و نحوه میلگردگذاری
N1H0	
N2H1LD14	
N3H1CD14	
N4H2L&RD14	
N5H1LD24	
N6H1CD24	
N7H2L&RD24	

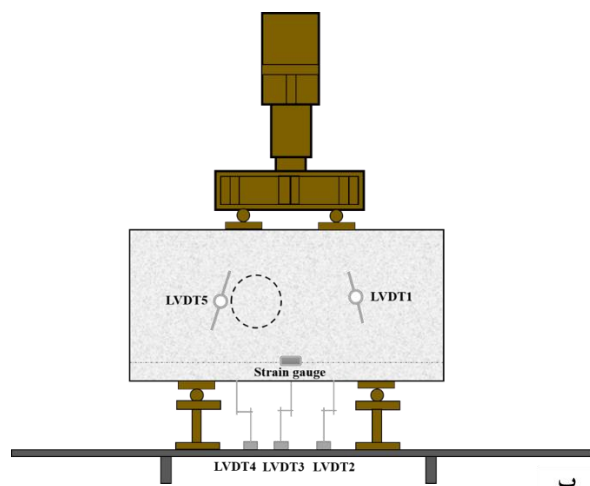
در شکل 5 جانمایی تکیه‌گاه‌ها، محل اعمال بار و مشخصات صفحات فولادی به کار رفته در آزمایش در نمونه تیر N3H1LD14 نشان داده شده است.



شکل 5: جزییات آرماتور بندی و اعمال بار در تیر N3H1LD14

2-3- چارچوب آزمایش

همه نمونه‌ها تحت آزمایش خمش 4 نقطه تا لحظه گسیختگی قرار گرفته‌اند. در شکل 6 ستاپ آزمایش به صورت شماتیک و برای نمونه NIH0 نشان داده شده است. محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها نسبت به وسط تیر در فاصله 50 سانتی متری از طرفین می‌باشد. با توجه به نسبت دهانه برشی به عمق 0/9، فاصله محل اعمال بارها نسبت به وسط تیر به ترتیب برابر 9/5 سانتی متر در نظر گرفته شده است. برای آزمایش از جک هیدرولیکی با ظرفیت 150 تن استفاده شده است. در هر نمونه از پنج عدد LVDT برای اندازه‌گیری تغییرات طول و یک عدد کرنش‌سنج برای بررسی رفتار میلگرد GFRP واقع در ناحیه کششی تیر استفاده شده است. LVDT1 و LVDT5 در راستای محل اعمال بار تا تکیه‌گاه به صورت مایل نصب شده‌اند، تا بتوانند تغییرات ایجاد شده در بخش بست‌های فشاری تیر را در زمان بارگذاری اندازه‌گیری نمایند. LVDT3 در قسمت پایین و در وسط دهانه تیر نصب شده است تا تغییر مکان وسط تیر را رکورد نماید. به منظور کنترل رفتار تیر، LVDT2 و LVDT4 در محدوده پایین تیر و در راستای موازی محل اعمال بار نصب شده است (شکل 6). بارگذاری به صورت استاتیکی و سرعت اعمال بار 1 میلی‌متر بر دقیقه لحاظ شد و تمامی اطلاعات توسط دیتا لاگر ثبت و ترک‌های تشکیل شده بر روی تیر تا لحظه گسیختگی رسم شده است و در هر مرحله از آن تصویربرداری شد. تمامی آزمایش‌ها، در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.



شکل 6: ستاپ آزمایش الف) قرارگیری نمونه N1H0 تحت خمش چهار نقطه، ب) چارچوب آزمایش و محل قرارگیری LVDT و کرنش سنج

3- نتایج آزمایش

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش شامل نحوه تشکیل اولین ترک و نوع آن، مد شکست و نحوه گسیختگی تیر و نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط تیر نمونه‌ها پرداخته خواهد شد.

3-1- اولین ترک و مد شکست

به منظور بررسی ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها، علاوه بر بازدید چشمی در هنگام آزمایش و توقف چندین باره برای ثبت ترک‌ها، فیلم‌های گرفته شده از آزمایش نیز بازبینی شد و ترک‌ها و نحوه گسترش آن‌ها شناسایی شده است. همان‌طور که مشخص است رفتار بتن در کشش مناسب نیست و با تشکیل اولین ترک اصلی در ناحیه کششی تیر، تحمل بار کششی توسط میلگردهای طولی انجام می‌پذیرد. فلذا به منظور افزایش دقت در تعیین میزان بار متناظر با تشکیل اولین ترک اصلی در ناحیه کششی تیر، از داده‌های کرنش سنج نصب شده بر روی میلگردهای GFRP استفاده شده است.

در جدول 5 نتایج آزمایش شامل تغییر مکان وسط تیر بر حسب میلی‌متر، نیروی متناظر با وقوع اولین ترک اصلی و نیروی نهایی تیرها ارائه شده است. واحد نیروهای بیان شده در این جدول بر حسب کیلونیوتن است. با مشاهده نتایج نمونه‌ها مشخص شد که بار متناظر با تشکیل ترک اولیه اصلی در تیر شاهد (N1H0) 7/65 درصد مقاومت نهایی تیر می‌باشد. با ایجاد بارش در وسط تیر این نسبت به 9/25 درصد برای تیر N3H1CD14 و 13/03 درصد برای تیر N6H1CD24 افزایش یافته است. مقاومت نهایی نمونه N3H1CD14 با وجود ایجاد بارش نسبت به تیر شاهد بیشتر است و رفتار دو تیر مشابهت دارد. دلیل این موضوع مرتبط با ابعاد سوراخ و آرماتورهای عرضی تقویتی است که در اطراف بارش لحاظ شده است. این موضوع در خصوص تیر عمیق N6H1CD24 نیز قابل بررسی است. میزان بار نهایی این تیر نسبت به تیر شاهد حدود 4 درصد بیشتر است، اما در تغییر مکان کمتری نسبت به تیر شاهد گسیخته می‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش ناحیه فشاری و کششی بتن با افزایش قطر سوراخ و در نتیجه تحمل سریع‌تر بار توسط میلگردهای موجود در ناحیه کششی تیر است.

نیروی متناظر با ترک‌های اولیه اصلی تیرهای N2H1LD14 و N5H1LD24 به ترتیب 34.6 و 17.7 درصد مقاومت نهایی آن‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج مشخص می‌شود با افزایش قطر بارش از 14 به 24 سانتی‌متر در ناحیه برشی، نیروی متناظر با اولین ترک اصلی و مقاومت نهایی کاهش می‌یابد، دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش سطح مقطع مسیر انتقال بار از محل اعمال آن تا تکیه‌گاه دانست.

نیروی متناظر با ترک‌های اولیه اصلی در تیرهای N4H2L&RD14 و N7H2L&RD24 به ترتیب 49 و 34.4 درصد مقاومت نهایی آن‌ها می‌باشد.

جدول 5: نتایج آزمایش

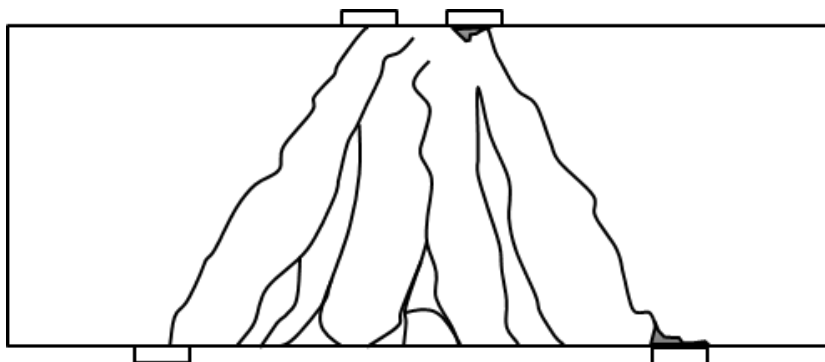
نمونه	نیروی نهایی جک	نیرو وقوع اولین ترک اصلی	تغییر مکان وسط
N1H0	549	42	16/4
N2H1LD14	173	60	5/69
N3H1CD14	605	56	16/14
N4H2L&RD14	161	80	6/94
N5H1LD24	135	24	7/13
N6H1CD24	575/5	75	12/11
N7H2L&RD24	132	45/5	7/32

با بررسی نتایج آزمایش مشخص شد، نوع شکست تمامی نمونه‌ها در نهایت به صورت برشی و در امتداد مسیر انتقال بار تا تکیه‌گاه می‌باشد. در جدول 6 محل وقوع اولین ترک و نوع آن ارائه شده است. در ادامه نحوه وقوع و گسترش ترک در نمونه‌ها گزارش شده است.

جدول 6: محل تشکیل اولین ترک اصلی و نوع آن

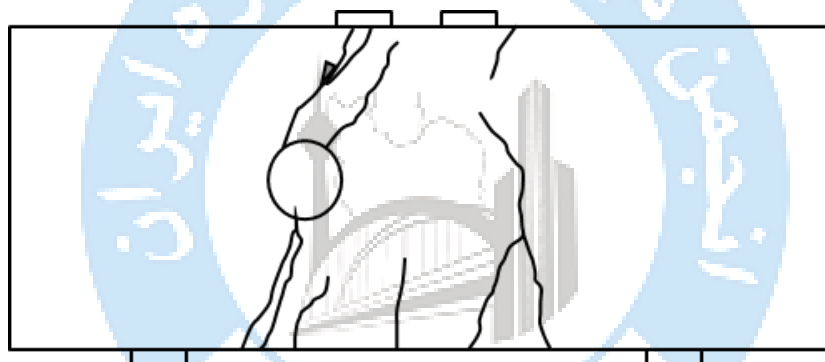
نمونه	محل وقوع ترک اصلی	نوع ترک
N1H0	وسط دهانه	خمشی
N2H1LD14	زیر بازو و گسترش به بازو	برشی
N3H1CD14	وسط دهانه و گسترش تا بازو	خمشی
N4H2L&RD14	زیر بازو و گسترش تا بازو	برشی
N5H1LD24	زیر بازو و گسترش تا بازو	خمشی-برشی
N6H1CD24	وسط دهانه و گسترش به داخل بازو	خمشی
N7H2L&RD24	وسط دهانه متمایل به سمت چپ تیر	خمشی

اولین ترک در نمونه N1H0 به صورت خمشی و در ناحیه وسط تیر و به صورت قائم تشکیل شد و در ادامه این ترک گسترش پیدا کرد و تا نصف ارتفاع تیر امتداد یافت. سپس ترک‌های مایل و برشی شروع به تشکیل شدند و با تشکیل ترک‌های برشی، ترک اولیه خمشی نیز رشد نمود. در ادامه ترک‌های برشی به سمت بالای تیر و محل اعمال نیروها گسترش یافتند. ترک‌های اصلی تشکیل شده در محدوده وسط و در ناحیه پایین تیر و دقیقاً در سطوح موازی با محل اعمال بار در تیر مشاهده شد. در ادامه با باز شدن ترک‌های این محدوده، کم ترک‌ها به سمت چپ و راست تیر و نواحی تکیه‌گاهی سوق پیدا کرد و در نهایت ترک‌های قطری در محل اعمال بار تا تکیه‌گاه به ترتیب در سمت راست و چپ تیر تشکیل شد و بر اثر گسترش ترک‌های اولیه، تیر دچار گسیختگی می‌شود. قبل از گسیختگی تیر، در تکیه‌گاه سمت راست و محل اعمال بار بخشی از لایه‌های سطحی بتن فروریخت. در شکل 7 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N1H0 نشان داده شده است.



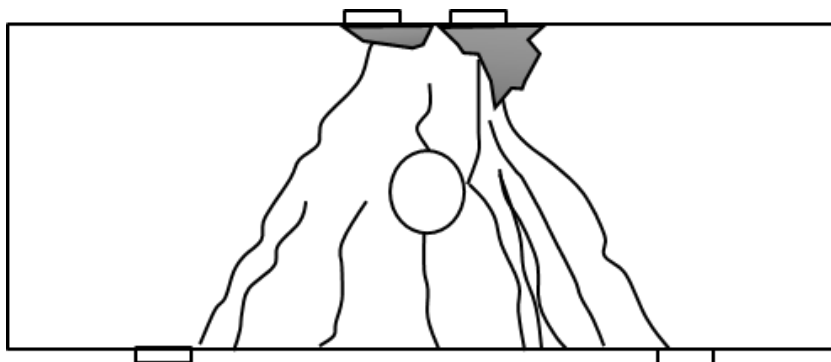
شکل 7: نحوه تشکیل ترک در نمونه NIH0

اولین ترک در نمونه N2H1LD14 در محدوده پایین بازشو به صورت مایل تشکیل شد و به تدریج به داخل بازشو گسترش یافت. در ادامه ترکی در امتداد ترک اول و از بالای بازشو تا محل اعمال بار گسترش یافت و قطر آن افزایش یافت. سپس ترک‌های قائم در محدوده پایین تیر تشکیل شد. در ادامه در بالای بازشو ترکی به سمت محل اعمال بار تشکیل شد، که هم‌راستا با خط انتقال بار از محل اعمال بار تا تکیه گاه سمت چپ می‌باشد. با افزایش نیرو، ترک‌های قطری در سمت راست تیر مشاهده شد. در نهایت تیر بر اثر گسیختگی بازشو و بازشدن کامل ترک 1 و ترکی که در امتداد محل اعمال نیرو تا تکیه‌گاه تشکیل شد، دچار گسیختگی شد. در شکل 8 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N2H1LD14 نشان داده شده است.



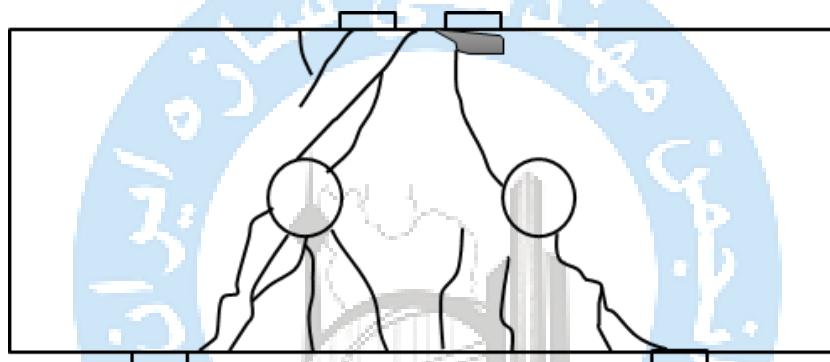
شکل 8: نحوه تشکیل ترک در نمونه N2H1LD14

اولین ترک در نمونه N3H1CD14 در وسط تیر به صورت قائم و خمشی و دقیقاً زیر بازشو تشکیل شد. در ادامه از اطراف بازشو، ترک‌های مایل دیده شد. سپس ترک در بالای بازشو تشکیل شد. ترک‌های مایل به سمت بازشو گسترش یافتند و به سمت محل اعمال بار حرکت کردند. در ادامه ترک‌های قطری از محل اعمال بار تا تکیه گاه در سمت راست و سپس در چپ تیر تشکیل شد. با افزایش نیرو، از سمت راست تیر و بر اثر باز شدن قطر ترک‌های مایل، تیر گسیخته شد. در شکل 9 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N3H1CD14 نشان داده شده است.



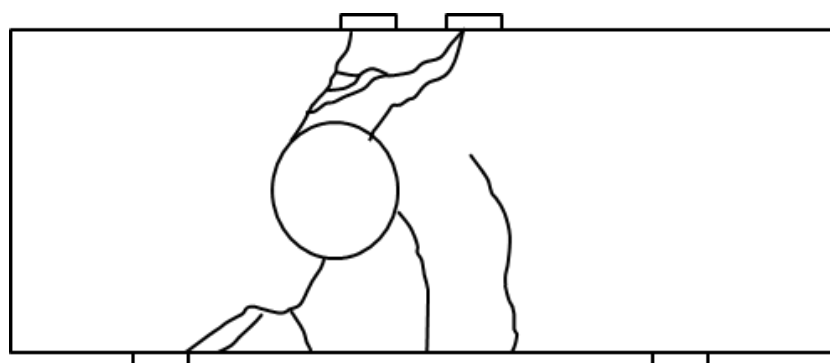
شکل 9: نحوه تشکیل ترک در نمونه N3H1CD14

با توجه به فرارگیری بازشو در محل بست‌ها که نقش اصلی انتقال بار را برعهده دارند، اولین ترک در نمونه N4H2L&RD14 به صورت مایل در پایین تیر و در زیر بازشو تشکیل شدند و در طرفین تیر مشاهده شدند. در ادامه ترک‌هایی در بالای بازشو و در امتداد ترک‌های اولیه ایجاد شد. با افزایش بار، ترک‌های قائم در پایین تیر تشکیل شد. که به سمت بازشوها گسترش یافتند و در نهایت از پایین بازشو سمت چپ تیر گسیخته شد. در شکل 10 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N4H2L&RD14 نشان داده شده است.



شکل 10: نحوه تشکیل ترک در نمونه N4H2L&RD14

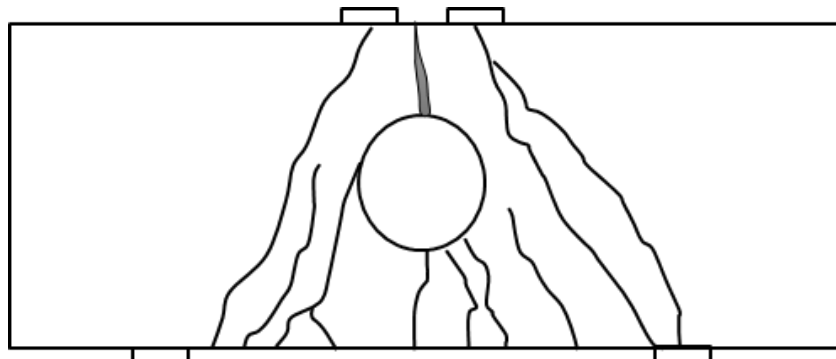
اولین ترک در نمونه N5H1LD24 به صورت برشی و در محدوده پایین بازشو تشکیل شد. و در ادامه و در راستای ترک اول، ترکی در بالای بازشو ایجاد شد. سپس یک ترک خمشی در وسط تیر مشاهده شد و به سمت بازشو حرکت نمود. در ادامه ترک بالای بازشو به سمت محل اعمال بار گسترش یافت. با افزایش بار، تیر در اثر گسیختگی بازشو در راستای اعمال بار تا تکیه‌گاه شکست. در شکل 11 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N5H1LD24 نشان داده شده است.



شکل 11: نحوه تشکیل ترک در نمونه N5H1LD24

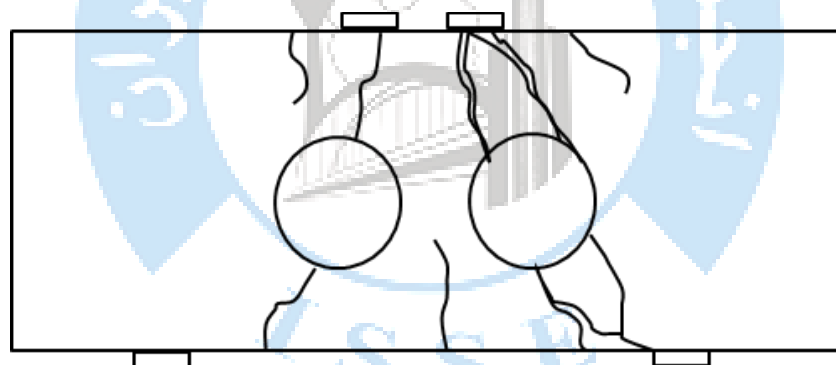
اولین ترک در نمونه N6H1CD24 به صورت قائم و از نوع خمشی در پایین بازشو تشکیل شد. و به داخل بازشو گسترش یافت. در ادامه ترک‌های برشی در محدوده پایین تیر و به موازات محل اعمال بار ایجاد شد و تا بازشو گسترش یافت. سپس ترکی در بالای بازشو و

دقیقا در راستای ترک اول تشکیل شد و تا بالای تیر ادامه پیدا کرد. در ادامه ترک‌ها به صورت برشی و از سمت چپ و راست تیر تشکیل شد. با افزایش بار، در راستای محل اعمال بار تا تکیه‌گاه، ترک‌هایی ایجاد شد و در نهایت با باز شدن ترک‌های خمشی و برشی زیر باز شو تیر گسیخته شد. در شکل 12 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N6H1CD24 نشان داده شده است.



شکل 12: نحوه تشکیل ترک در نمونه N6H1CD24

اولین ترک در نمونه N7H2L&RD24 به صورت قائم و از نوع خمشی در وسط تیر تشکیل شد. و در ادامه در پایین باز شو سمت چپ، ترک برشی دیده شد. سپس در بالای باز شو سمت چپ، ترکی در امتداد ترک پایین باز شو تشکیل شد. و تا بالای تیر گسترش یافت. با افزایش بار، ترک‌های مایل در سمت راست تیر، در پایین و بالای باز شو در امتداد یکدیگر تشکیل شد. ترک‌های سمت چپ در داخل باز شو گسترش یافت و در نهایت از سمت راست با گسیخته شدن باز شو تیر شکست. در شکل 13 ترک‌های تشکیل شده بر روی نمونه N7H2L&RD24 نشان داده شده است.



شکل 13: نحوه تشکیل ترک در نمونه N7H2L&RD24

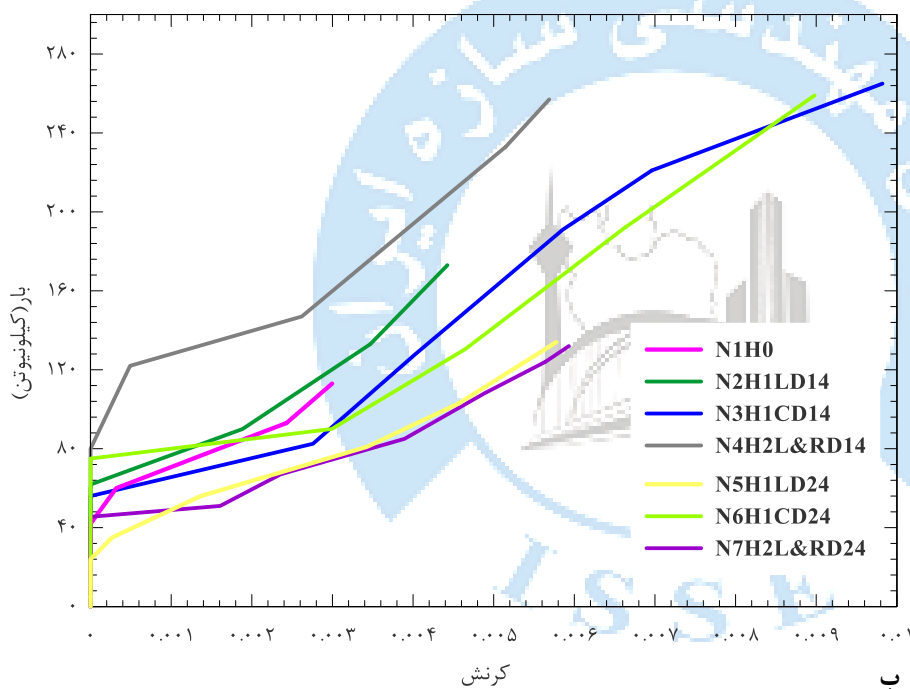
در جدول 7 نحوه گسیختگی نهایی تیرها نشان داده شده است. لازم به توضیح است در همه نمونه‌ها افزایش بار تا انهدام کامل تیر صورت پذیرفته است و افزایش قطر ترک‌های برشی سبب گسیختگی تیرها گردیده است. در گام‌های نهایی بارگذاری نمونه‌هایی که دارای باز شو در امتداد محل اعمال بار تا تکیه‌گاه‌ها می‌باشند، دچار گسیختگی در نواحی برشی شده‌اند اما تیرهای دارای باز شو در وسط دهانه به دلیل افزایش ترک‌ها در محدوده باز شوها، شکسته شده‌اند. لازم به ذکر است در همه نمونه‌ها عامل اصلی گسیختگی افزایش عرض ترک‌های برشی می‌باشد و با توجه به حاکم بودن برش در تیرهای عمیق این موضوع با نتایج آزمایش تطابق دارد.

3-2- بررسی داده‌های کرنش سنج و LVDT

به منظور بررسی رفتار میلگرد GFRP در نمونه‌های بتنی یک کرنش سنج در وسط میلگردهای طولی در بخش کششی تیر نصب گردید. در شکل 14 نحوه اتصال کرنش سنج به میلگردهای GFRP و نمودارهای کرنش - بار نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است به منظور حفاظت از کرنش سنج‌ها، از پوشش‌های محافظ ضدآب استفاده شده است تا در زمان بتن‌ریزی مقاطع، سبب آسیب

به آنها نشود. با توجه به شکل 14 و شروع تغییرات کرنش در میلگردهای GFRP امکان تعیین زمان دقیق گسترش ترک‌های اصلی در نمونه‌ها وجود دارد. با توجه به نتایج آزمایش، در همه نمونه‌ها پس از گسترش و افزایش عرض ترک‌های قطری، باربری در میلگردهای GFRP آغاز شده است. با توجه به نوع رفتار میلگردهای GFRP و با توجه به مقاومت کششی بالای آنها و با توجه به نتایج آزمایش، رفتار کرنش‌سنج‌ها به دو صورت قابل مشاهده است. کرنش‌سنج‌هایی که تا انتهای بارگذاری در حال ارائه نتایج رفتار میلگردها بودند و کرنش‌سنج‌هایی که در حین بارگذاری و قبل از انهدام کامل تیر از دسترس خارج شدند. همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌گردد، تغییرات شیب در نمودار مشهود است، دلیل این موضوع وقوع ترک در تیر و به تبع آن تغییر در باربری و مسیر انتقال بار می‌باشد. با توجه به تامین طول مهاری مناسب در نمونه‌ها، در هیچ یک از نمونه‌ها جداشدگی میلگرد GFRP مشاهده نشد و همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده است، بر اثر تحمل بار میلگرد GFRP از هم گسیخته شده است.

در هر نمونه 5 عدد LVDT نصب شده است که در طول بارگذاری رفتار تیر را گزارش می‌دهد. LVDT1 و LVDT5 که به صورت مایل نصب شده‌اند، رفتار تیر در بخش بست‌های فشاری در دو سوی تیر را ارزیابی می‌نمایند. LVDT3 که در بخش پایین و وسط تیر نصب شده است و تغییر مکان وسط تیر را گزارش می‌نماید و دو LVDT2 و LVDT4 در راستای اعمال بار و در بخش پایین تیر به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار تیر نصب شده‌اند.



شکل 14: بررسی میلگردهای GFRP (الف) نصب کرنش‌سنج بر روی میلگردهای GFRP و عایق نمودن در برابر رطوبت، (ب) نمودار کرنش-بار در میلگردهای GFRP










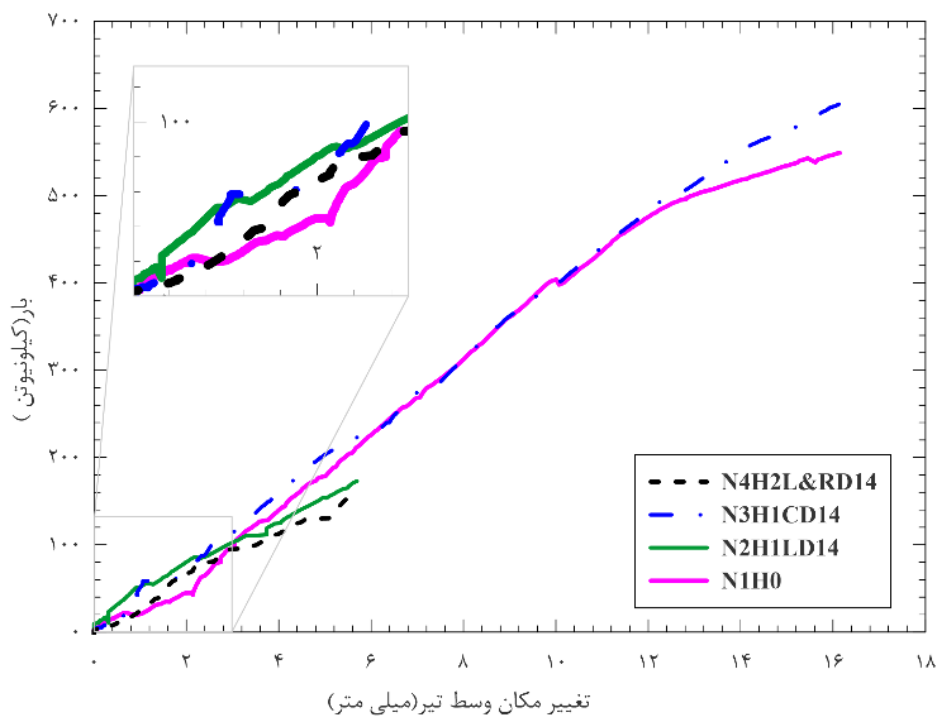
شکل 15: گسیختگی میلگرد GFRP بر اثر تحمل بار در نمونه NIH0

3-3- بررسی نمودار نیرو - تغییرمکان وسط تیر

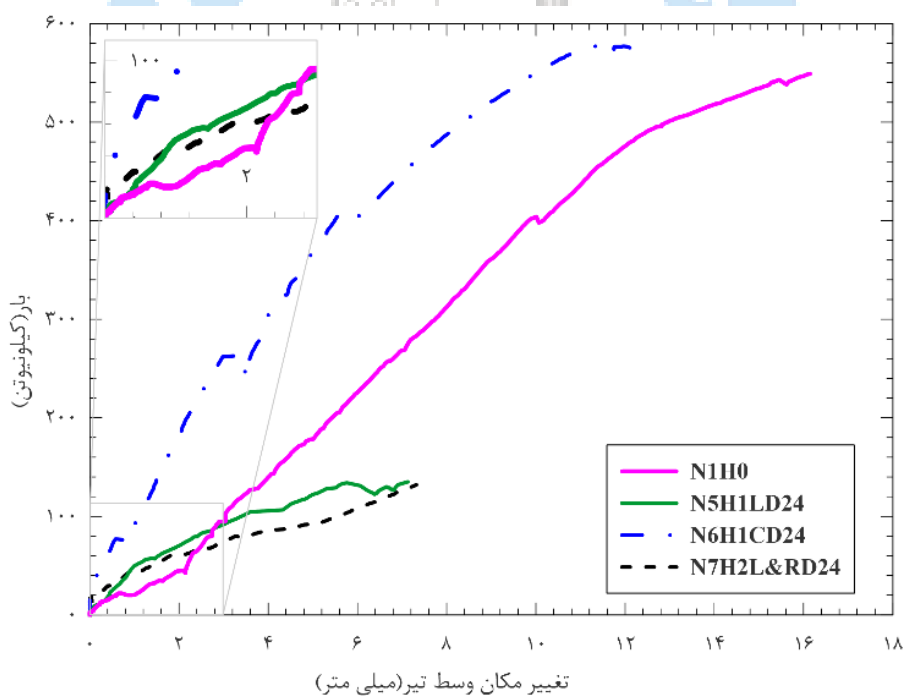
تست ها تا لحظه گسیختگی و انهدام کامل تحت بارگذاری قرار گرفتند و نمودارهای نیرو - تغییرمکان متناظر رسم گردیده است. در شکل 16 نمودار نیرو - تغییرمکان وسط تیر، برای نمونه‌های بدون بازشو و دارای یک و دو بازشو به قطر 14 سانتی‌متر ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود بازشو در مسیر محل اعمال بار تا تکیه‌گاه سبب کاهش مقاومت نهایی تیر به میزان قابل توجهی شده است. این درحالی است که وجود بازشو در وسط تیر تاثیر چندانی در کاهش مقاومت تیر نداشته است بلکه مقدار بار نهایی نسبت به حالت بدون بازشو افزایش پیدا کرده است. با توجه به قطر نسبتاً کم بازشو، هر چهار نمودار دارای یک روند هستند و بازشوهای ایجاد شده در این نمونه‌ها سختی اولیه تیر را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش نداده است. نمودار تیرهای N3H1CD14 و NIH0 تقریباً بر هم منطبق هستند و تیر N3H1CD14 نیروی نهایی بیشتری را تحمل کرده است و تغییرمکان وسط دهانه تیر در این دو نمونه تقریباً با هم برابر است. دلیل این موضوع قطر نسبتاً کم سوراخ و وجود آرماتورهای تقویتی در اطراف بازشو می‌باشد. نتایج در خصوص نمونه N4H2L&RD14 نشان می‌دهد که از تیر نمونه N2H1LD14 مقاومت کمتری از خود نشان داده است که دلیل این موضوع می‌تواند به دلیل ایجاد بازشو و کاهش مسیر انتقال بار تا تکیه‌گاه باشد. در شکل 17 نمودار نیرو - تغییرمکان وسط تیر، برای نمونه‌های بدون بازشو و دارای یک و دو بازشو به قطر 24 سانتی‌متر ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود بازشو در مسیر محل اعمال بار تا تکیه‌گاه سبب کاهش مقاومت نهایی تیر به میزان قابل توجهی شده است. برخلاف شکل 16، نمودارها از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. در خصوص تیر N6H1CD24 ملاحظه می‌شود که رفتار تیر در بالای نمودار تیر شاهد قرار گرفته است. دلیل این موضوع را می‌توان در ابعاد سوراخ و کاهش سطوح کششی و فشاری بتن و نتیجتاً بزرگ شدن بازوی مقاوم مقطع جستجو نمود. با افزایش قطر سوراخ عملاً بارگیری توسط میلگردهای GFRP سریع‌تر از حالتی که سوراخ وجود ندارد یا سوراخ دارای قطر 14 سانتی‌متری است رخ می‌دهد و این امر سبب شده است تا نمودار نسبت به تیرهای NIH0 و N3H1CD14 بالاتر قرار گیرد. این موضوع در تحقیقات گایسپو و گیاونی در خصوص میلگردهای فولادی نیز مشاهده شده است [10].

جدول 7: نحوه گسیختگی نهایی نمونه‌ها

نمونه	نحوه گسیختگی نهایی تیرها
N1H0	
N2H1LD14	
N3H1CD14	
N4H2L&RD14	
N5H1LD24	
N6H1CD24	
N7H2L&RD24	



شکل 16: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای دارای باز شو با قطر 14 سانتی متر با تیر شاهد



شکل 17: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای دارای باز شو با قطر 24 سانتی متر با تیر شاهد

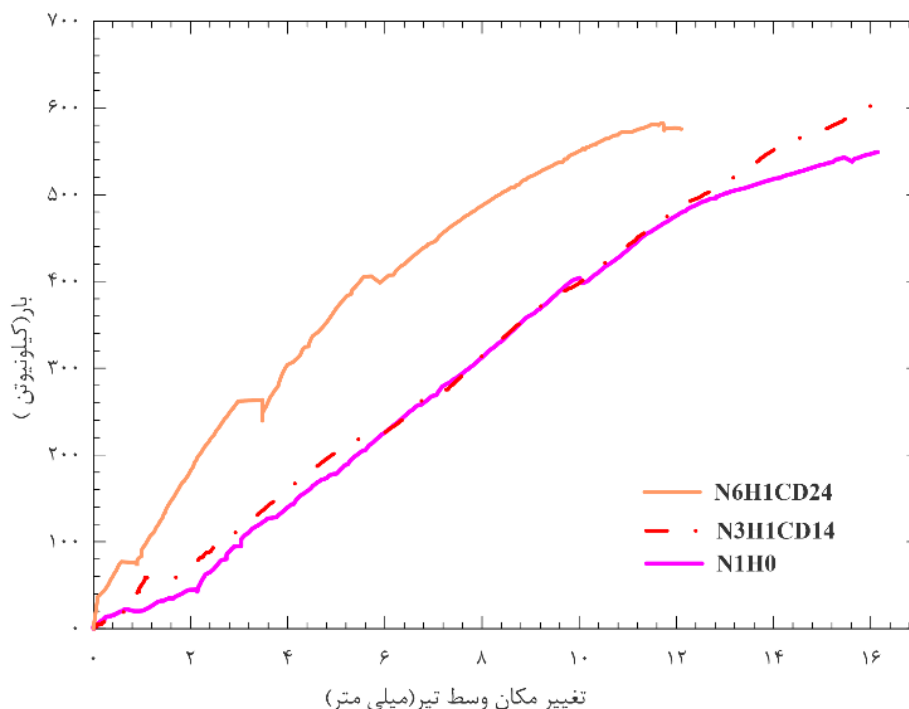
4- تحلیل نتایج

استفاده از میلگردهای GFRP در شرایطی که خوردگی شدید بتن وجود دارد، امری اجتناب ناپذیر است و لازم است رفتار این مصالح در المان‌های سازه‌ای گوناگون مورد ارزیابی قرارگیرد. یکی از المانهای سازه‌ای که امکان استفاده از میلگردهای GFRP در آنها وجود دارد، تیرهای عمیق دارای بازشو است که کم‌تر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند و آیین‌نامه‌ها نسبت به طراحی تیرهای عمیق دارای بازشو مسلح شده با میلگردهای GFRP سکوت کرده‌اند. در این تحقیق 7 تیر عمیق دارای بازشو با نسبت دهانه برشی به عمق تیر 0/9 مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفت. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل ابعاد، تعداد و جانمایی بازشوها می‌باشد. با توجه به گسترده بودن پارامترهای موثر در ظرفیت باربری تیرهای عمیق لازم است سایر متغیرها در تحقیقات آتی مورد ارزیابی قرار گیرد و تحقیق پیش‌رو به عنوان بخشی از تحقیقات آتی محققین در این زمینه می‌باشد. با بررسی رفتار تیرها نتایج زیر حاصل شد.

با مقایسه نتایج تحقیق پیش‌رو با تحقیقات گذشته مشخص شد، استفاده از میلگرد GFRP به عنوان میلگرد کششی سبب می‌شود که تشکیل ترک اصلی اولیه در نسبت کمتری از بار نهایی ایجاد گردد، که این موضوع به دلیل مدول الاستیسیته پایین‌تر این نوع میلگردها نسبت به میلگردهای فولادی می‌باشد.

یکی از موضوعات حائز اهمیت در تعیین رفتار و ظرفیت نهایی نمونه‌ها، جانمایی بازشو و میزان تاثیر آن در تشکیل المان‌های بست و بند در تیر در زمان بارگذاری است؛ همان‌طور که از نتایج مشخص است (با فرض ثابت بودن قطر بازشو)، قرارگیری بازشو در ناحیه برشی و در مسیر انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها سبب کاهش محسوس در ظرفیت نهایی تیرها می‌گردد، این درحالی است که قرارگیری بازشو در وسط دهانه نه تنها سبب کاهش ظرفیت تیر نمی‌گردد، بلکه سبب افزایش آن می‌گردد. با بررسی نتایج آزمایش مشخص شد، تعبیه بازشو در وسط دهانه بسته به ابعاد آن می‌تواند سبب تغییر در روند و حتی بهبود رفتار کلی تیر گردد، به طوری که در تیر N3H1CD14 با توجه به ابعاد بازشو و وجود آرماتورهای عرضی اطراف آن، رفتار تیر با رفتار تیر شاهد تطابق داشت اما با افزایش قطر بازشو در تیر N6H1CD24 رفتار تیر تغییر نمود و با وجود افزایش مقاومت نهایی تا حدود 4 درصد، در تغییر مکان وسط کمتری تیر دچار گسیختگی شد. دلیل این موضوع در کاهش سطوح فشاری و کششی بتن و شروع بارگیری سریع‌تر میلگردهای GFRP نسبت به حالت بدون سوراخ یا با سوراخ 14 سانتی‌متری می‌باشد. با توجه به نتایج مشخص می‌گردد، انتخاب قطر بازشو بهینه در ناحیه وسط تیر عمیق، می‌تواند علاوه بر تامین فضای مناسب برای عبور تاسیسات، سبب بهبود رفتار تیر گردد (شکل 18). با توجه به نتایج ظرفیت نهایی تیرهای N5H1LD24 و N2H1LD14 به ترتیب به میزان 68 و 75 درصد کم‌تر از تیر شاهد و ظرفیت نهایی تیرهای N3H1CD14 و N6H1CD24 به ترتیب به میزان 10 و 4 درصد بیشتر از تیر شاهد می‌باشد.

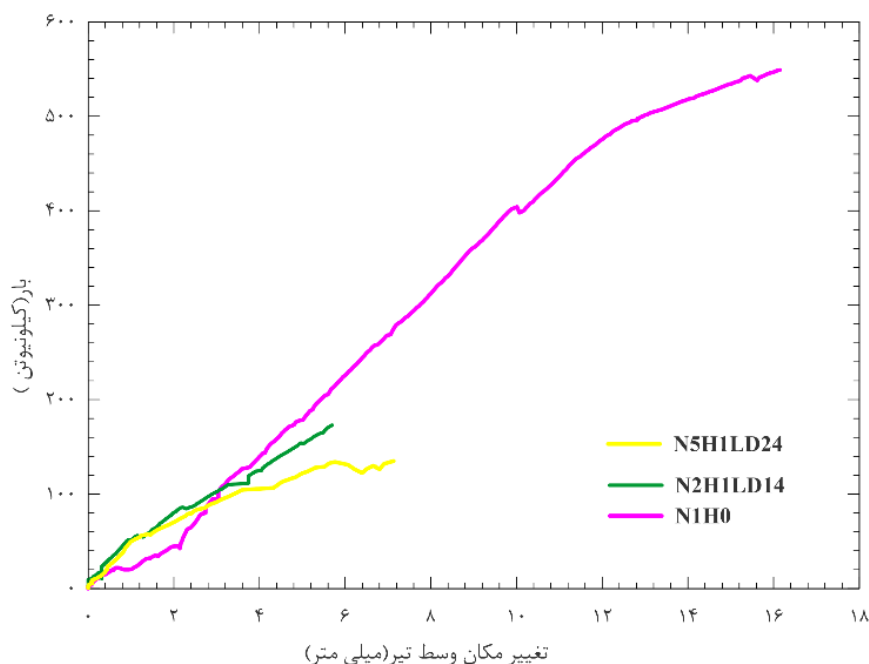
ابعاد بازشوها در مقاومت نهایی تیر موثر است. بازشوهای 14 سانتی‌متری به عنوان نماینده بازشوهای کوچک و بازشوی 24 سانتی‌متری به عنوان نماینده بازشوهای بزرگ لحاظ شده است. با توجه به ثابت بودن ارتفاع تیر، نسبت اقطار بازشوهای 14 و 24 سانتی‌متری به ارتفاع تیر به ترتیب برابر 0/28 و 0/48 می‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش این نسبت، مقاومت نهایی نمونه‌ها به طور محسوس کاهش یافته است و رفتار کلی تیرها نسبت به تیر شاهد متفاوت شده است. با بررسی نمودارها مشخص است، در تیرهای با نسبت 0/28، روند نمودارها در هر سه تیر تقریباً بر یکدیگر منطبق است، این درحالی است که در تیرهای با نسبت 0/48 انطباق کم‌تری وجود دارد. با توجه به نتایج، با افزایش 71 درصدی این نسبت، ظرفیت نهایی نمونه‌های N5H1LD24 و N6H1CD24 به ترتیب به میزان 22 و 5 درصد نسبت به نمونه‌های N2H1LD14 و N3H1CD14 کاهش یافته است.



شکل 18: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای دارای بازشو در وسط دهانه با تیر شاهد

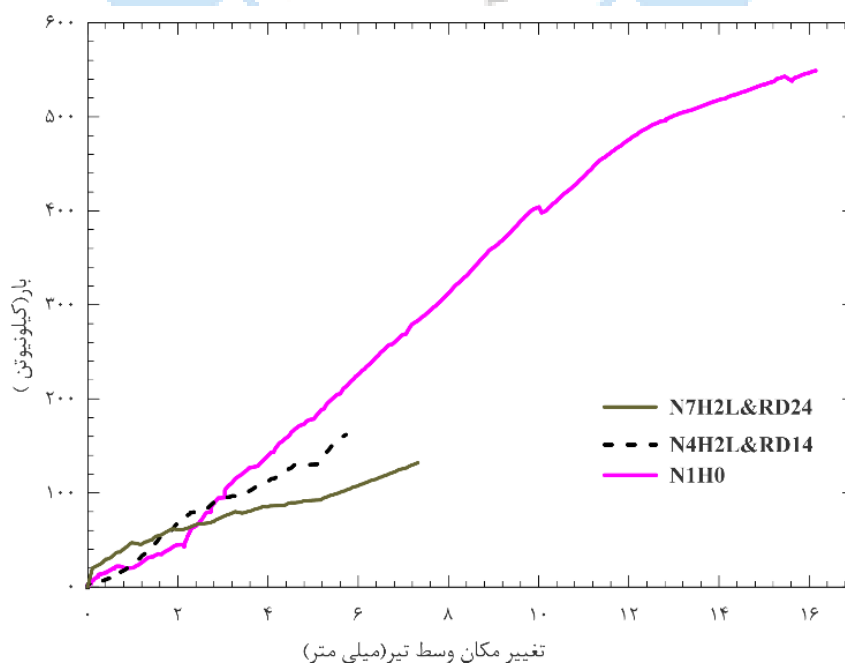
یکی از عوامل موثر در تعیین مقاومت نهایی تیرهای عمیق، نسبت دهانه برشی به عمق تیر است. در این تحقیق این مقدار برای همه نمونه‌ها برابر 0/9 فرض شده است. جانمایی بازشوها در محدوده دهانه برشی و در مسیر انتقال بار به تکیه‌گاه در ظرفیت نهایی تیر بسیار موثر است. به طوری که در تیرهایی که بازشوها در این محدوده قرار گرفته است، تیر در بار نهایی بسیار کم‌تری نسبت به حالت بدون بازشو و حالتی که بازشو در وسط تیر است، گسیخته می‌شود. در این تحقیق بر خلاف سایر تحقیقات گذشته مرکز بازشوها به گونه‌ای انتخاب گردید تا نسبت به محور انتقال بار به تکیه‌گاه دارای یک خروج از مرکز مشخص باشد.

در شکل 19 نمودار تغییر مکان وسط - بار برای نمونه‌های بدون بازشو و دارای یک بازشو در محدوده برشی تیر نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است به دلیل قرارگیری بازشوها در مسیر انتقال بار مقاومت نهایی تیرها نسبت به تیر بدون بازشو به شدت کاهش یافته است. با افزایش قطر سوراخ از 14 به 24، مقاومت نهایی تیر 20 درصد کاهش یافته است.



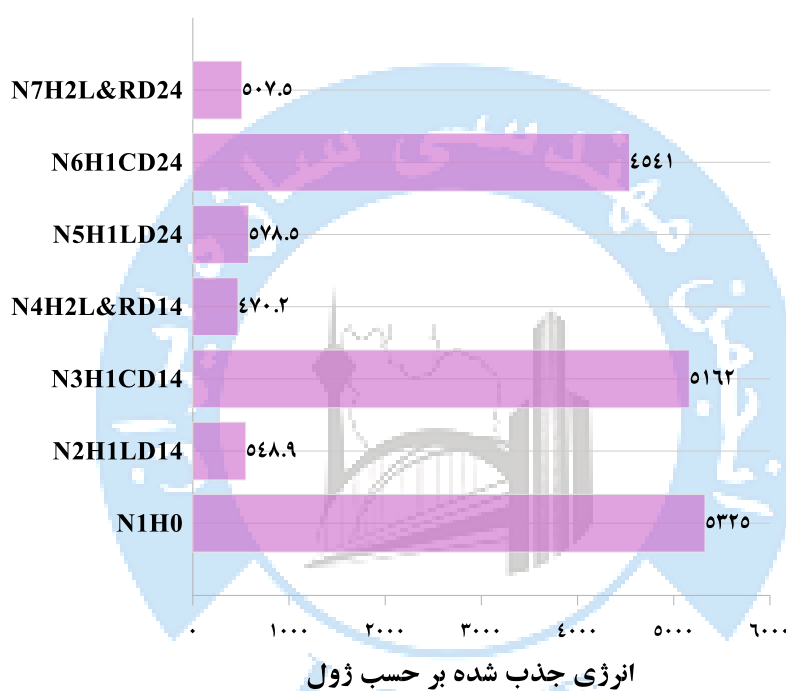
شکل 19: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای دارای یک بازشو در ناحیه برشی با تیر شاهد

تعداد بازشو یکی از عوامل موثر در تعیین ظرفیت نهایی تیر است. با توجه به جانمایی بازشو و با افزایش تعداد آن، مقاومت نهایی تیر کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 20 نشان داده شده است، تیرهای دارای دو بازشو دارای مقاومت بسیار کمتری نسبت به تیر بدون بازشو می‌باشند. مقاومت نهایی برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 14 سانتی‌متر از یک به دو عدد، 6 درصد و برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 24 سانتی‌متر از یک به دو عدد 3 درصد کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد تعبیه حداقل یک بازشو در محدوده انتقال بار تاثیر به‌سزایی در کاهش مقاومت تیر دارد و افزایش بازشوها و قرارگیری به صورت متقارن در هر دو سوی تیر کاهندگی کمی در مقاومت نهایی تیر نسبت به تیرهای دارای یک بازشو می‌نماید. با بررسی مد شکست نمونه‌ها مشخص شد که در تمامی نمونه‌ها از ناحیه بست فشاری، گسیختگی رخ می‌دهد و شکست تیرها تماماً از نوع برشی می‌باشد.



شکل 20: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرهای دارای دو بازشو با تیر شاهد

به منظور تعیین میزان جذب انرژی توسط تیرها، سطح زیر نمودار نیرو - تغییر مکان برای همه نمونه‌ها محاسبه گردید. با توجه به اعمال بار تا لحظه گسیختگی نهایی تیرها، اعداد ارائه شده در شکل 21 شامل حداکثر میزان جذب انرژی در نمونه‌ها می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشخص است با فرض ثابت بودن ابعاد بازشو، تیرهای دارای یک بازشو در ناحیه برشی تیر، با کاهش جذب انرژی بسیار بیشتری نسبت به تیر دارای بازشو در وسط دهانه روبرو هستند. با توجه به نتایج، جذب انرژی در تیرهای N2H1LD14 و N3H1CD14 به ترتیب به میزان 89/6 و 3 درصد و جذب انرژی در نمونه‌های N5H1LD24 و N6H1CD24 به ترتیب به میزان 90/4 و 14 درصد نسبت به تیر N1H0 کاهش یافته است. با بررسی نتایج مشخص است با افزایش قطر بازشو از 14 به 24 سانتی‌متر نیز جذب انرژی در نمونه‌ها کاهش یافته است. میزان جذب انرژی در تیر N5H1LD24 نسبت به تیر N2H1LD14 به میزان 7 درصد و در تیر N6H1CD24 نسبت به N3H1CD14 به میزان 12 درصد کاهش یافته است. افزایش تعداد بازشو بر میزان جذب انرژی اثر کاهشی دارد. با توجه به نتایج تحقیق جذب انرژی نمونه N4H2L&RD14 نسبت به تیر N2H1LD14 به میزان 25 درصد و نمونه N7H2L&RD24 نسبت به تیر N5H1LD24 به میزان 12 درصد کمتر می‌باشد.



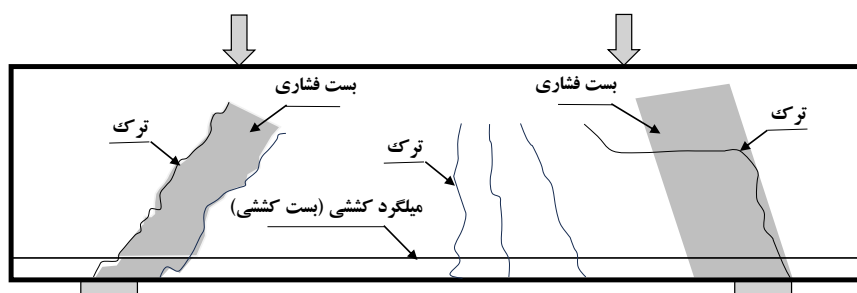
شکل 21: انرژی نهایی جذب شده در تیرها

5- مقایسه نتایج آزمایش با روابط ارائه شده در ACI

یکی از روش‌های متداول محاسبه ظرفیت برشی تیرهای عمیق روش بست و بند است. این روش یک روش محافظه‌کارانه و بر اساس توزیع گسترده تنش در المان می‌باشد. با توجه به کاربرد گسترده این روش برای اعضای دارای ناپیوستگی، آیین‌نامه‌های آمریکا، کانادا و اروپا به بیان این روش پرداخته‌اند. تشخیص صحیح مسیر انتقال بار و نحوه شکست تیر از موضوعات حائز اهمیت در این روش می‌باشد. با توجه به روش بست و بند که بر پایه روش خرابایی توسعه یافته است، سه پارامتر اصلی بست کششی، بست فشاری و گره‌ها به عنوان اجزای انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها محسوب می‌گردند. در صورت وقوع یکی از سه رویداد زیر، نمونه‌ها دچار گسیختگی می‌گردند.

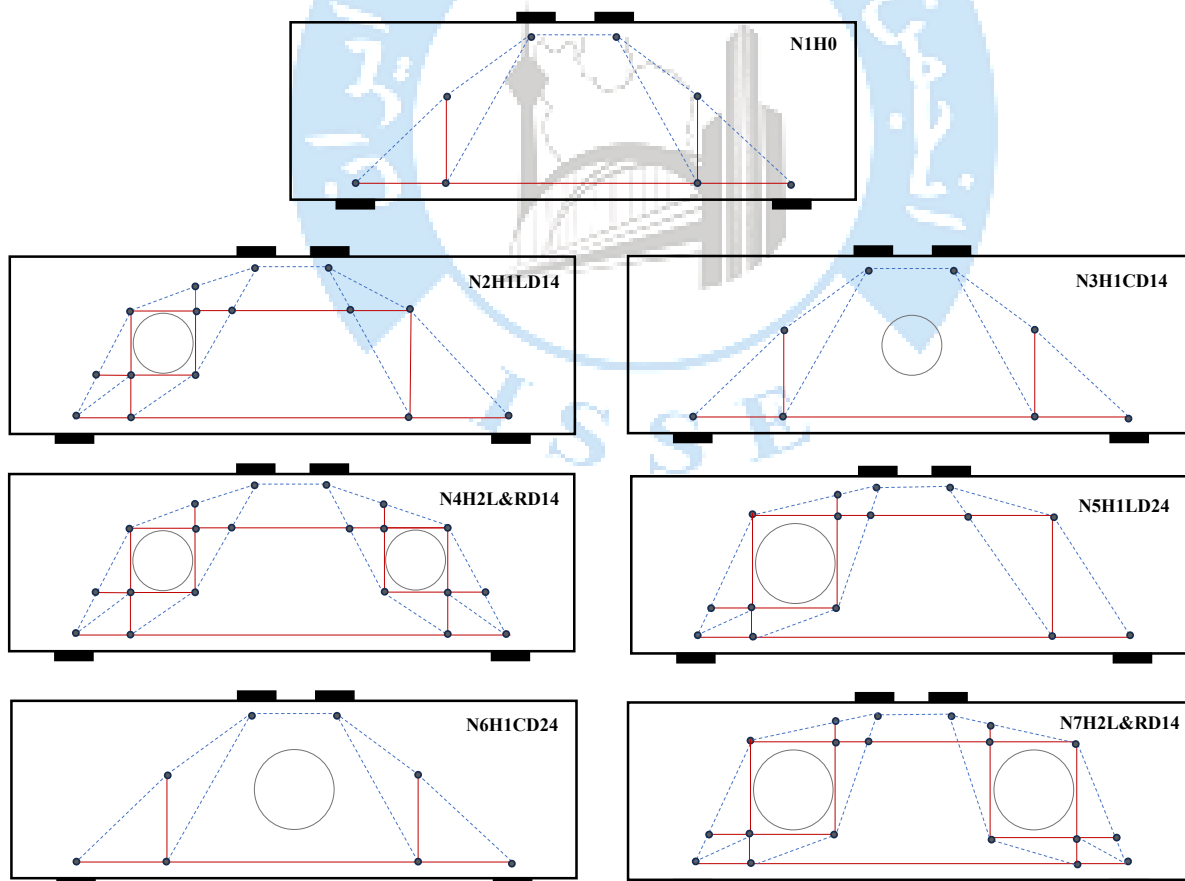
- وقوع تسلیم در اعضا با قابلیت تحمل کشش (بست کششی)؛
- شکست یکی از بست‌های فشاری به دلیل افزایش سطح تنش بیش از مقدار مجاز؛
- شکست در گره‌ها به دلیل افزایش سطح تنش بیش از مقدار مجاز.

به منظور شناسایی مسیر انتقال بار و تعیین بست‌ها، بندها و گره‌ها روش‌های گوناگونی ذکر شده است. یکی از روش‌ها تعیین اعضا بر اساس تشکیل و گسترش ترک می‌باشد (شکل 22).



شکل 22: تشخیص مسیر انتقال بار و بست‌های فشاری بر اساس نحوه تشکیل ترک در تیر

به منظور استفاده از روش بست و بند، اعضای کششی، فشاری و گره‌ها ترسیم گردید. در شکل 23 بست‌های کششی با خطوط ممتد قرمز، بست‌های فشاری با خطوط نقطه‌چین آبی و گره‌ها با نقاط توپر نشان داده شده است. با بررسی روابط آیین نامه ACI مشخص گردید این آیین نامه برای محاسبه ظرفیت نهایی تیرهای عمیق مسلح شده با میلگردهای فولادی و سایر میلگردهای کامپوزیت تفاوتی قائل نشده است. در جدول 8 به بررسی نتایج آزمایش و نتایج بر اساس روابط آیین نامه ACI پرداخته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد انحراف از معیار و میانگین نسبت نتایج آزمایش به آیین‌نامه، برابر 12/6 درصد و 1/15 می‌باشد و به طور میانگین مقادیر محاسبه شده توسط روابط آیین نامه به میزان 14 درصد کمتر از نتایج آزمایش می‌باشد.



شکل 23: اعضای کششی، فشاری و گره‌ها در تیرها

جدول 8: مقایسه نتایج آزمایش با روابط آیین نامه ACI

نمونه	P_U (kN)		
	EXP	ACI	$\frac{EXP}{ACI}$
N1H0	549	499	1/1
N2H1LD14	173	138	1/25
N3H1CD14	605	465	1/3
N4H2L&RD14	161	169	0/95
N5H1LD24	135	117	1/15
N6H1CD24	575	410	1/4
N7H2L&RD24	132	110	1/2
Mean	-	-	1/15
SD%	-	-	12/6
COV%	-	-	10/8

6- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی رفتار آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو با میلگردهای طولی GFRP و میلگردهای عرضی فولادی است. برای این منظور 7 تیر (6 تیر دارای بازشو و یک تیر بدون بازشو) تحت خمش چهار نقطه تا لحظه گسیختگی قرار گرفت. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل می باشد.

- تشکیل اولین ترک در نمونه ها به صورت خمشی یا برشی است و در تمامی نمونه ها شکست نهایی به دلیل افزایش قطر ترک های برشی و به صورت برشی صورت می پذیرد.
- با مقایسه نتایج آزمایش با سایر تحقیقات مشخص گردید شروع باربری میلگردهای کششی GFRP نسبت به میلگردهای فولادی در بار کمتری رخ می دهد، این موضوع به دلیل وقوع ترک در بخش کششی تیر است. با بررسی تمامی نمونه ها و نحوه گسیختگی میلگردهای GFRP مشخص گردید که در هیچ یک از نمونه ها جداسازی رخ نداده است و در نظر گرفتن طول مهار 30 سانتی متری برای آن ها مناسب است.
- شیب اولیه نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط تیرهای دارای بازشو 14 سانتی متری تقریباً بر یکدیگر منطبق است و در نزدیکی یکدیگر قرار دارند. این موضوع نشان می دهد در صورت تعبیه بازشو با ابعاد مناسب و لحاظ نمودن آرما توره های عرضی در اطراف آن، می توان تاثیر وجود بازشو را بر سختی تیر و در محدوده ابتدایی نمودار کاهش داد. این در حالی است که در خصوص تیرهای دارای بازشو 24 سانتی متری این موضوع صدق نمی کند.
- با فرض ثابت بودن ابعاد بازشو، جانمایی بازشو و تعداد آن ها تاثیر مستقیمی در بار نهایی تحمل شده توسط تیرها دارد. به طوری که تیرهای دارای دو بازشو به دلیل کاهش بخش بیشتری از مسیر انتقال بار نسبت به تیرهای تک بازشو در سمت چپ تیر، بار نهایی کمتری را تحمل می نماید. قرار گیری بازشو در وسط دهانه در نمونه ها سبب بالارفتن میزان بار نهایی تحمل شده توسط تیر می گردد. این موضوع در خصوص تیرهای دارای 14 سانتی متری علاوه بر افزایش بار نهایی سبب افزایش تغییر مکان وسط تیر نسبت به تیر بدون بازشو می گردد این در حالی است که در تیرهای دارای بازشو 24 سانتی متری تنها افزایش بار نهایی صورت می پذیرد و تغییر مکان وسط تیر کمتر از نمونه شاهد است. قرار گیری یک بازشو در مسیر انتقال بار، با قطرهای 14 و 24 سانتی متر به ترتیب سبب کاهش مقاومت نهایی تیرها به میزان 68 و 75 درصد نسبت به تیر بدون بازشو می شود. مقاومت نهایی

برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 14 سانتی‌متر از یک به دو عدد، 6 درصد و برای نمونه‌ها با افزایش تعداد بازشو به قطر 24 سانتی‌متر از یک به دو عدد 3 درصد کاهش می‌یابد.

- با فرض ثابت بودن ابعاد بازشو، تیرهای دارای یک بازشو در ناحیه برشی تیر، با کاهش جذب انرژی بسیار بیشتری نسبت به تیر دارای بازشو در وسط دهانه روبرو هستند. با توجه به نتایج، جذب انرژی در تیرهای N2H1LD14 و N3H1CD14 به ترتیب به میزان 89/6 و 3 درصد و جذب انرژی در نمونه‌های N5H1LD24 و N6H1CD24 به ترتیب به میزان 90/4 و 14 درصد نسبت به تیر N1H0 کاهش یافته است. با بررسی نتایج مشخص است با افزایش قطر بازشو از 14 به 24 سانتی‌متر نیز جذب انرژی در نمونه‌ها کاهش یافته است. میزان جذب انرژی در تیر N5H1LD24 نسبت به تیر N2H1LD14 به میزان 7 درصد و در تیر N6H1CD24 نسبت به N3H1CD14 به میزان 12 درصد کاهش یافته است. افزایش تعداد بازشو بر میزان جذب انرژی اثر کاهشی دارد. با توجه به نتایج تحقیق جذب انرژی نمونه N4H2L&RD14 نسبت به تیر N2H1LD14 به میزان 25 درصد و نمونه N7H2L&RD24 نسبت به تیر N5H1LD24 به میزان 12 درصد کمتر می‌باشد.
- با مقایسه ظرفیت تیرها بر اساس نتایج آزمایش با مقادیر محاسبه شده بر اساس روابط آیین نامه ACI ملاحظه می‌گردد، روابط آیین‌نامه محافظه‌کارانه می‌باشد و به طور میانگین به میزان 14 درصد کمتر از نتایج آزمایش می‌باشد.

مراجع

- [1] Elsanadedy, Hussein. Al-Salloum, Yousef. Almusallam, Tarek and Alshenawy, Abdulhafiz. (2019). Experimental and numerical study on FRP-upgraded RC beams with large rectangular web openings in shear zones. *Construction and Building Materials*, 194, 322-343
- [2] Choo Chin, Siew. Mat Yahaya, Fadzil. Shu Ing, DOH. Kusbiantoro, Andri and Khai Chong, Wen. (2015). Proceedings of International Conference on Architecture. In *Structure and Civil Engineering*, 1-7.
- [3] Al Rjoub, Yousef S. Hamad, Azhar G. (2020). Forced vibration of axially-loaded, multi-cracked Euler-Bernoulli and Timoshenko beams. *Structures*, 25, 370-385.
- [4] Al-Enezi, Meshal S. Yousef, Ahmed M. Tahwia, Ahmed M. (2023). Shear capacity of UHPFRC deep beams with web openings. *Case Studies in Construction Materials*, 18.
- [5] Hafiz, Rezwana Binte. Ahmed, Shaibal. Barua, Saikat. Chowdhury, Sharmin Reza. (2014). Effects of Opening on the Behavior of Reinforced Concrete Beam. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(2), 52-61.
- [6] Alsaq, Haider M. (2013). Effects of opening shape and location on the structural strength of RC deep beams with openings. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 7(6), 494-499.
- [7] Saleh, Mona. AlHamaydeh, Mohammad. Zakaria, Mohamed. (2023). Shear capacity prediction for reinforced concrete deep beams with web openings using artificial intelligence methods. *Engineering Structures*, 280.
- [8] Pertiwi D. Komara I. Fristian R. (2021). Design concept of reinforced concrete beams with large web openings. IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, 1010(1).
- [9] Saleh, Mona. AlHamaydeh, Mohammad. Zakaria, Mohamed. (2023). Finite element analysis of reinforced concrete deep beams with square web openings using damage plasticity model. *Engineering Structures*, 278.
- [10] Campione, Giuseppe. Minaf, Giovanni. (2012). Behaviour of concrete deep beams with openings and low shear span-to-depth ratio. *Engineering Structures*, 41, 294-306
- [11] K.w, Nasser. A, Acavalos and H.r, daniel. (1967). behavior and design of large openings in reinforced concrete beams. *ACI journal*, 25-33
- [12] Ashour, Ashraf. Rishi, F. G. (2000). Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings. *ACI Structural Journal*, 97(3), 418-426
- [13] Yanga, Keun-Hyeok. Eunb, Hee-Chang and Chungc, Heon-Soo. (2006). The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams. *Engineering Structures*, 28(13), 1825-1834.
- [14] Tan, K. H. Tang , C. Y. and Tong, K. (2004). Shear strength predictions of pierced deep beams with inclined web reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 56(8), 443-452
- [15] Hu, O. E. Tan, K. H and Liu, X. H. (2007). Behaviour and strut-and-tie predictions of high-strength concrete deep beams with trapezoidal web openings. *Magazine of Concrete Research*, 59(7), 529-541.
- [16] Tan, K. Lu, H. (1999). Shear behavior of large reinforced concrete deep beams and code comparisons. *ACI Structural Journal*, 96(5), 836-845.
- [17] Ismail, Kamaran S. Guadagnini, Maurizio and Pilakoutas, Kypros. (2018). Strut-and-Tie Modeling of Reinforced

- Concrete Deep Beams. *Journal of Structural Engineering*, 144(2), 1-13.
- [18] Chen, Hui. Yi, Wei-Jian and Hwang, Hyeon-Jong. (2018). Cracking strut-and-tie model for shear strength evaluation of reinforced concrete deep beams. *Engineering Structures*, 163, 396-408.
- [19] He, Zhi-Qi. Liu, Zhao and John Ma, Zhongguo. (2013). Investigation of load-transfer mechanisms in deep beams and corbels. *ACI Structural Journal*, 110(3), 534.
- [20] Senthil, K. Gupta, A and Singh, S.P. (2018). Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method. *Advances in Concrete Construction*, 6(3), 245-268.
- [21] Ali, Yasar Ameer. Assi, Lateef Najeh. Abas, Hussein. Taresh, Hussein R. Dang, Canh N and Ghahari, SeyedAli. (2023). Numerical Investigation on Effect of Opening Ratio on Structural Performance of Reinforced Concrete Deep Beam Reinforced with CFRP Enhancements. *Infrastructures*, 8(1), 2.
- [22] Nie, X.F. Zhang, S.S. Chen, G.M. and Yu, T. (2020). Strengthening of RC beams with rectangular web openings using externally bonded FRP: Numerical simulation. *Composite Structures*, 248.
- [23] Nie, X.F. Zhang, S.S. Chen, G.M. and Yu, T. (2020). Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. *Composite Structures*, 31(6-7), 461-470.
- [24] Abadel, Aref. Alenzi, Saleh. Almusallam, Tarek. Abbas, Husain and Al-Salloum, Yousef. (2023). Shear behavior of self-consolidating concrete deep beams reinforced with hybrid of steel and GFRP bars. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(9), 102-136.
- [25] Abbas, Husain. Almusallam, Tarek. Abadel, Alenzi, ArefSaleh and Al-Salloum, Yousef. (2023). Shear strength of functionally graded self-compacting concrete deep beams reinforced with steel and GFRP bars. *Case Studies in Construction Materials*, 18.
- [26] Peng, Fei. Cai, Yuhang. Yi, Weijian and Xue, Weichen. (2023). Shear behavior of two-span continuous concrete deep beams reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*, 290.
- [27] Shuqing, Liu. (2022). *Analysis of Concrete Deep Beams with Fibre Reinforced Polymer Reinforcements using Indeterminate Strut-and-Tie Method*. degree of Master of Applied Science, University of Waterloo.
- [28] Mohamed, Khaled. Farghaly, Ahmed Sabry and Benmokrane, Brahim. (2016). Strut efficiency-based design for concrete deep beams reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*, 113(4), 791-800.
- [29] F. Andermatt, Matthias. and Lubell, Adam S. (2013). Strength modeling of concrete deep beams reinforced with internal fiber-reinforced polymer. *ACI Structural Journal*, 110(4), 595-605.
- [30] F. Andermatt, Matthias and Lubel, S. Adam. (2013). concrete deep beams reinforced with internal fiber-reinforced polymer-experimental study. *ACI Structural Journal*. 110(4), 585-594.
- [31] Frappier, Jacob. Mohamed, Khaled. Farghaly, Ahmed Sabry. and Benmokrane, Brahim. (2019). Behavior and Strength of Glass Fiber-Reinforced Polymer- Reinforced Concrete Deep Beams with Web Openings. *ACI Structural Journal*, 116(5).
- [32] Murugan, R. and Prasanna, G. (2021). GFRP Reinforced RC Deep Beam with Multiple Web Openings. Springer Nature Singapore Pte Ltd, *Advances in Civil Engineering*, 83, 453-469.
- [33] Arabasi, Somoud. and El-Maaddawy, Tamer. (2020). Reinforcing of discontinuity regions in concrete deep beams with GFRP composite bars. *Composites Part C: Open Access*, 3.
- [34] Cosenza, E. Manfredi, G. and Realfonzo, R. (2002). Development length of FRP straight rebars. *Composites Part B: Engineering*, 33(7), 493-504.
- [35] Ehsani, M.R. Sadatmanesh, H. and Tao, S. (1977). Bond Behavior of Deformed GFRP Rebars. *Journal of Composites Materials*, 31(14).
- [36] Fava, Giulia. Carvelli, Valter. and Pisani, Marco Andrea. (2016). Remarks on bond of GFRP rebars and concrete. *Composites Part B: Engineering*. 93, 210-220
- [37] Hea, Zheng. and Tian, Guo-Wen. (2011). Probabilistic evaluation of the design development length of a GFRP rod pull-out from concrete. *Engineering Structures*, 33(10), 2943-2952.
- [38] Shahnewaza, Md. Rteilb, Ahmad. and Alam, M. Shahria. (2020). Shear strength of reinforced concrete deep beams – A review with improved model by genetic algorithm and reliability analysis. *Structures*, 23, 494-508