

## Shear Strengthening of RC Deep Beams with Circular Openings by Means FRP Composites

Abolfazl Arabzadeh<sup>1\*</sup>, Hamid Karimizadeh<sup>1</sup>

1- Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

The high depth created favorable space for placing the openings which are to provide some capabilities such as mechanical and electrical installations, but these openings reduced load bearing capacity of the beams. One solution to the mentioned shortcoming is to use FRP-Composite sheets; the effect of FRP-Composites in improving load bearing and ductility of concrete members such as columns and beams is approved in previous investigations. This study utilizes the CFRP sheets to compensate for weakness arisen from the created openings. To this end, 5 deep beams with 10x50x120 cm dimensions, each having two circular openings with 20 cm diameter placed in symmetrical order, are constructed and undergone a three-point monotonic bending. The Externally Bounded Reinforcement (EBR) and Externally Bounded Reinforcement on Grooves (EBROG) methods have been utilized to install the FRP sheets in two configurations being wrapped around and inclined. The results have shown the superiority of EBROG method as well as the efficiency of the inclined orientation of strengthening sheets in increasing the load bearing-capacity. Also, Shear failure was the type of failure in beams and it has been observed that generally, diagonal cracks, which lead to the strut formation, tend to be formed in the beams. The cracks started from the support plates and propagated towards the loading plate. In addition to the extended cracking, the strengthened specimens have experienced debonding and failure in their composite strips. The strengthening strips have experienced failure in the wrapped specimen as a result of providing suitable confinement and leaving no chance for strip debonding as well as in the specimen with inclined strengthening strips as a result of the high efficiency of tensile stresses on the strips. Compared to the related non- strengthened specimens, the load bearing capacity increase arising from inclined orientation is 40% to 43%. In addition, this amount compared to the wrapped around specimen is about 16%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 September 2019

**Revise Date:** 21 January 2020

**Accept Date:** 16 February 2020

### Keywords:

Reinforced concrete deep beams;  
Opening;  
CFRP composites;  
EBR method;  
EBROG method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.200210.1941

\*Corresponding author: Abolfazl Arabzadeh  
Email address: arabzade@modares.ac.ir

## بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای گشودگیهای دایروی

### تقویت شده با ورق های CFRP

ابوالفضل عربزاده<sup>۱\*</sup>، حمید کریمی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

#### چکیده

ایجاد گشودگی در تیرهای عمیق بتنی به منظور عبور تاسیسات مکانیکی و الکترونیکی و دیگر دلایل معماری باعث کاهش ظرفیت باربری این اعضا می شود؛ از جمله روش های مورد استفاده برای جبران این نقص، تقویت این اعضا با ورق های CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) است که کارایی بالای آن ها در افزایش مقاومت و شکل پذیری اجزای بتنی در بسیاری از تحقیقات گذشته به اثبات رسیده است. در این پژوهش با انجام آزمایش بارگذاری تک نقطه ای مونوتونیک بر روی ۵ عدد تیر عمیق بتن مسلح با ابعاد mm100x500x1200 و دارای یک زوج گشودگی دایروی به قطر ۲۰۰ میلی متر، به بررسی روش و جهت نصب ورق های تقویتی CFRP و اثر آن ها بر روی رفتار این تیرها پرداخته شده است. روش های مورد بررسی در این تحقیق شامل آماده سازی سطحی EBR (Externally Bonded Reinforcement On Grooves) و شیارزنی از نوع EBROG (Externally Bonded Reinforcement On Grooves) بوده که به دو صورت دورپیچ و مورب مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده ی تاثیر گشودگی ها در کاهش حدود ۵۹ درصدی ظرفیت باربری و ۶۶ درصدی جذب انرژی است؛ همچنین در حالی که روش دورپیچی باعث افزایش ۲۷ درصدی ظرفیت باربری نسبت به نمونه بدون تقویت شده است، آرایش مورب این مقدار را تا حدود ۴۳ درصد افزایش داده که از مود گسیختگی نمونه ها می توان به وضوح اثر شیارها در افزایش کارایی کامپوزیت را مشاهده نمود. علاوه بر بررسی آزمایشگاهی، در این تحقیق مدلی تحلیلی بر مبنای مودهای مختلف شکست تیر عمیق ارائه شده است که با استفاده از آن و با دقت مناسبی می توان ظرفیت نهایی تیرهای عمیق را پیش بینی کرد.

کلمات کلیدی: تیر عمیق بتن مسلح، گشودگی، کامپوزیت های CFRP، روش های EBR و EBROG، مدل تحلیلی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2020.200210.1941	doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.200210.1941		۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۱۱/۲۷	۱۳۹۸/۱۱/۲۷	۱۳۹۸/۱۱/۰۱	۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ابوالفضل عربزاده arabzade@modares.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

نیاز به عبور تاسیسات مکانیکی و الکتریکی از میان سازه‌های بتنی و همچنین بعضی ملاحظات معماری، ایجاد گشودگی‌هایی را در این نوع سازه‌ها الزام آور ساخته است. مهم‌ترین اعضایی که تحت تاثیر این نوع گشودگی‌ها قرار می‌گیرند، تیرهای عمیق هستند که با توجه به ارتفاع آن‌ها، فضای بیشتری برای این نوع گشودگی‌ها فراهم می‌آید؛ بر طبق آیین نامه بتن ایران (آبا) و همچنین مبحث نهم مقررات ملی ایران، حداکثر نسبت طول دهانه تیر عمیق به عمق آن به مقدار دو محدود می‌شود [۱، ۲]. این مقدار در آیین‌نامه ACI-318 در دو حالت خمشی و برشی تعریف شده است؛ از دیدگاه خمشی اعضای با نسبت دهانه خالص به ارتفاع کل  $2/5$  برای دهانه‌های سراسری (پیوسته) و کوچکتر از  $1/25$  برای دهانه‌های ساده تحت عنوان تیر عمیق معرفی می‌گردند. از دیدگاه برشی نیز، تیر عمیق عضوی است که نسبت دهانه خالص به ارتفاع آن کوچکتر یا مساوی ۴ باشد [۳].

از آنجایی که وجود گشودگی در یک عضو باعث کاهش ظرفیت باربری آن عضو می‌شود، لزوم بررسی این نوع اعضا و تقویت آن‌ها به موضوعی غیرقابل اغماض تبدیل شده است.

در بسیاری از مطالعات، تیر عمیق را به صورت خرپایی تحلیل می‌کنند که شامل اعضای فشاری (Strut) و کششی (Tie) بوده و انتقال بار به نقاط تکیه‌گاهی از طریق این اعضا انجام می‌گیرد [۴-۷]. بنابراین واضح است که چنانچه هر عاملی در یک تیر عمیق مانع از انتقال این تنش‌های فشاری به نقاط تکیه‌گاهی شود کاهش ظرفیت باربری تیر را به همراه خواهد داشت. گشودگی‌ها از جمله این عوامل کاهنده‌ی ظرفیت باربری بوده که چنانچه در طراحی‌های سازه‌ای نقش منفی آن‌ها در نظر گرفته نشود باعث خسارات جبران ناپذیری خواهند شد [۸-۱۲]. از جمله راهکارهای پیشنهادی برای جبران ضعف ناشی از وجود بازشوها، استفاده از ورق‌های کامپوزیتی FRP<sup>1</sup> می‌باشد [۱۳-۱۷]. از آنجایی که مطالعات بسیار کمی روی این نوع تقویت (تقویت تیر عمیق دارای گشودگی با ورقه‌های کامپوزیتی FRP) انجام گرفته است، آیین‌نامه‌های طراحی نیز به بررسی اثرات مواد کامپوزیتی در تقویت این نوع المان‌ها نپرداخته و بنابراین لزوم بررسی بیشتر این نوع اعضا و با این نوع تقویت بیش از پیش احساس می‌شود. علی‌رغم انجام تحقیقات عددی و اجزای محدودی بر روی این سیستم‌ها (به میزان بسیار محدودی) [۱۸، ۱۹]، به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی تاکنون مدل‌های بسیار کمی به منظور بررسی رفتار این نوع سازه‌ها ارائه شده که با توجه به جامع نبودن تحقیقات در نظر گرفته شده در ارائه این مدل‌ها، نمی‌توان از آن‌ها برای استخراج نتایج قابل اعتماد استفاده کرد [۱۶، ۱۸-۲۱].

در تقویت خمشی تیرها با استفاده از ورق‌های FRP، سطوح زیرین تیر در نواحی با لنگر مثبت و سطوح فوقانی تیر در نواحی با لنگر منفی به روش‌های EBR<sup>1</sup>، NSM<sup>1</sup> [۲۲-۲۵]، EBROG<sup>2</sup> و EBRIG<sup>2</sup> [۲۶-۲۹] تقویت می‌شوند. دلیل تقویت این قسمت از تیر، تاثیرگذاری بیشتر تارهای انتهایی تیر در خمش و ضعف کششی بتن در این نواحی از تیر می‌باشد که در نهایت به شکست خمشی تیر در این نواحی منجر می‌گردد؛ اما در مکانیزم‌هایی که در آن‌ها شکست برشی حاکم است، به دلیل تاثیر بیشتر جان تیر در برش، معمولاً ضعف در جان باعث شکست تیر می‌شود و لذا در مکانیزم‌های برشی برخلاف مکانیزم‌های خمشی از تقویت جان برای جلوگیری از شکست تیر استفاده می‌شود. تیرهای عمیق به دلیل ممان اینرسی بالا حول محور خنثی، معمولاً در خمش بسیار قوی‌تر از برش هستند؛ بنابراین مکانیزم گسیختگی معمول در این نوع تیرها گسیختگی برشی بوده و به همین دلیل برخلاف تیرهای معمولی، این نوع تیرها بیشتر تحت تقویت برشی قرار می‌گیرند [۱۳-۱۵، ۳۰]. چسباندن الیاف به طرفین تیر، چسباندن الیاف به صورت U شکل در طرفین و وجه کششی تیر و دورپیچ نمودن تیر مهم‌ترین روش‌های تقویت برشی جان تیر با استفاده از ورق‌های کامپوزیتی FRP می‌باشند.

در سال ۲۰۰۹ مداوی و شریف [۱۳] با انجام بارگذاری دو نقطه‌ای بر روی تیرهای عمیق تقویت شده با ورق‌های CFRP و دارای گشودگی‌های مربعی با موقعیت‌های متفاوت، به این نتیجه رسیدند که استفاده از FRP باعث افزایش ۳۵ تا ۷۳ درصدی ظرفیت برشی تیرها شده است. همچنین با توجه به روش نصب U شکل ورق‌ها، بررسی‌ها نشان داد که هرچه موقعیت گشودگی به سمت بالای تیر منتقل شود

<sup>1</sup> Near Surface Mounted

<sup>2</sup> Externally bonded Reinforcement In Grooves

به دلیل اثرات محصورشدگی ناحیه تحتانی تیر، میزان مقاومت حاصله افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج این آزمایش، سختی بیشتر نمونه‌های تقویت شده در تیرهای با گشودگی‌های میانی بوده در حالی که در تیرهای با گشودگی‌های تحتانی و فوقانی افزایش سختی بسیار ناچیز بود.

هچنین مداوی و اریس [۱۴] در سال ۲۰۱۲ با انجام آزمایش روی تیرهای عمیق، به بررسی اثرات ورق‌های FRP در تقویت تیرهای موجود، که گشودگی در آنها ایجاد شده بود، پرداخته‌اند. شکست تیرهای تقویت شده، با ورقه ورقه شدن و یا گسیختگی ورقه‌های FRP در گوشه‌های گشودگی به دلیل تمرکز تنش شروع شده است. در همه نمونه‌ها ترک‌هایی شکافی (Splitting Crack) در وجه بالایی تیر به موازات آرماتورهای فشاری، در لحظه آغاز ترک خوردگی و یا قبل از شکست نهایی مشاهده شده است؛ لازم است اشاره شود که این ترک‌ها در تیرهای با مقدار تقویت بالا مشاهده شده است که می‌توان گفت به دلیل تنش‌های کششی عرضی ناشی از تنش‌های فشاری زیاد در بالای تیر و در آرماتورهای فشاری به وجود می‌آید. مقدار تقویت زیاد تیرها با استفاده از FRP باعث افزایش مقاومت برشی آن‌ها شده که ترکیب این افزایش مقاومت با ضخامت نسبتاً کم تیر و مقاومت فشاری کم آن باعث بسط این ترک‌های شکافی در وجه فوقانی تیر می‌گردد؛ ورقه‌های تقویتی در پایین و اطراف گشودگی باعث محصورشدگی آرماتورهای طولی شده و از این طریق مانع ایجاد ترک‌های طولی در پایین تیر (که برای نمونه‌های تقویت نشده مشاهده شده بود) می‌شود.

رئیس‌زاده و خالو [۳۱] در سال ۲۰۱۰، با استفاده از نرم‌افزار Ansys به بررسی تیرهای عمیق دارای گشودگی پرداختند که توسط کامپوزیت‌های FRP و با آرایش‌های مختلف تقویت شده‌اند. ایشان با بیان اینکه تقویت برشی باعث افزایش حدود ۱۴ درصدی ظرفیت برشی نمونه‌ها می‌شود به اثرات موثرتر تقویت قطری نسبت به سایر آرایش‌ها اشاره کردند. نتایج نشان داده است که وجود گشودگی در تیر، ظرفیت آن را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین مود شکست نمونه‌ها به صورت خردشدگی بتن و بدون پارگی FRP گزارش شده است.

ها و همکاران [۳۰، ۳۲] در سال ۲۰۰۲، با آزمایش تیرهای عمیق تقویت شده با ورق‌های FRP، به اثرات بالای این کامپوزیت‌ها در استحصال ظرفیت باربری تیرهای عمیق دارای گشودگی اشاره کردند؛ تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از یک لایه کامپوزیت در هر طرف تیر باعث بازیابی ظرفیت تیر تا ۷۰ درصد ظرفیت باربری اولیه (بدون گشودگی) و بدون تقویت می‌شود. همچنین استفاده از این تقویت کننده‌ها باعث افزایش سختی تیرها شده بود.

استفاده از روش شیار زنی به عنوان روشی برای جلوگیری از جداشدگی ورق‌های تقویتی، اولین بار در سال ۲۰۰۸ و توسط مستوفی نژاد و محمودآبادی [۲۷] انجام گرفته است؛ محققان در این تحقیق به بررسی سه روش بدون آماده‌سازی سطح، با آماده سازی سطح و شیارزنی (با ایجاد شیارهایی طولی، عرضی و قطری با عمق‌های متفاوت) به عنوان روش‌های نصب ورق CFRP بر روی تیرهای معمولی پرداختند؛ نتایج به دست آمده از این تحقیق بیانگر تاثیر قابل توجه روش شیارزنی در جلوگیری از جداشدگی ورق FRP بوده است. در تحقیق دیگری که توسط مستوفی نژاد و حاج رسولی‌ها [۳۳] در سال ۲۰۰۹ برای بررسی کامل‌تر پارامترهای تاثیرگذار در روش شیارزنی انجام گرفت، نتایج نشان داد که به منظور جلوگیری از گسیختگی زود رس ورق‌ها، بهینه‌ترین عمق و عرض شیارها به ترتیب برابر با ۱۰ و ۸ میلی‌متر می‌باشد.

بر اساس مطالب بیان شده، هدف از این تحقیق استفاده از ورق‌های CFRP در جبران ضعف ناشی از وجود گشودگی در تیرهای بتن مسلح عمیق می‌باشد. مهمترین موضوعاتی که نویسندگان در این تحقیق در پی پاسخ به آن‌ها می‌باشند اثر ورقه‌های FRP در تقویت برشی تیرهای عمیق، بررسی اثر آرایش الیاف، اثر شیارها در افزایش ظرفیت باربری و همچنین ارائه مدلی برای پیشبینی ظرفیت باربری تیرهای عمیق دارای گشودگی است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

از آنجایی که در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی نمونه‌ها مدنظر بوده لذا در ادامه نحوه ساخت، آماده سازی و تقویت پنج عدد تیر عمیق بتنیو در نهایت تست آن‌ها که به روش مونوتونیک در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته، شرح داده می‌شود.

## آماده سازی نمونه‌ها

به منظور برآورده کردن اهداف تحقیق، ۵ عدد تیر عمیق مسلح دو سر ساده به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر، دهانه خالص ۱۰۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای ساخت تیرها از بتنی با مقاومت فشاری حدود ۵۰ مگاپاسکال استفاده شده است؛ جدول شماره ۱ میزان مصالح مصرفی در طرح اختلاط که بر اساس آیین نامه ACI-211 [۳۴] طراحی شده است را نشان می‌دهد. همه تیرها از لحاظ ابعاد، شکل آرماتورگذاری و مقاومت مشخصه مشابه هم بوده و تفاوت آن‌ها در نوع تقویت می‌باشد. بارگذاری تیرها به صورت خمشی سه نقطه‌ای و مونوتونیک انجام گرفت؛ آرماتورگذاری این تیرها طبق روش STM بوده و از آیین‌نامه بتن آمریکا ACI 318-14 [۳]، مطابق شکل ۱ استفاده شده است. بر اساس این آیین‌نامه، آرماتورهای کششی بر اساس ظرفیت عضو کششی (Tie)، آرماتورهای فشاری به منظور تامین تکیه‌گاه مناسب برای آرماتورهای جان و همچنین کمک به تامین ظرفیت اعضای فشاری (Strut)، و آرماتورهای جان بر اساس کنترل حالت باطری شکلی Strut ها طراحی شده‌اند. مشخصات مکانیکی آرماتورها در جدول ۲ آورده شده است.

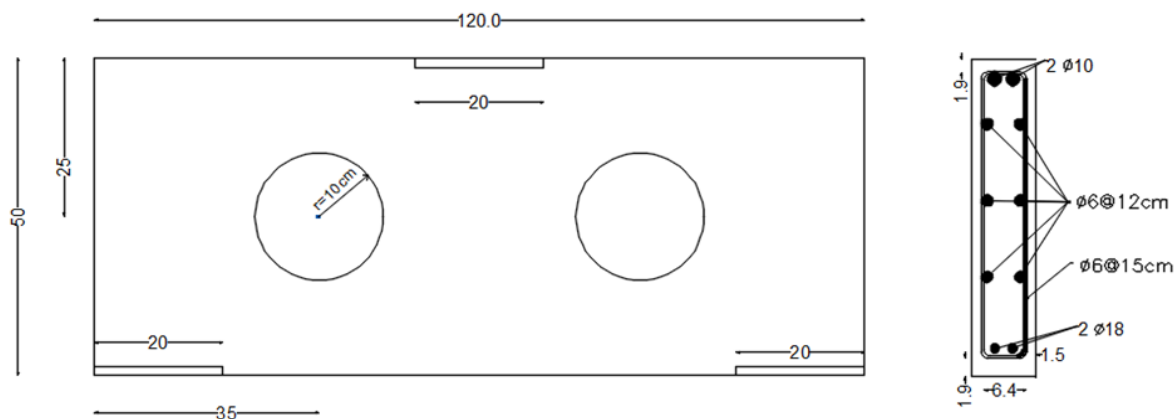
جدول ۱: میزان مصالح استفاده شده در طرح اختلاط

نوع مصالح	میزان مصرف (kg/m <sup>3</sup> )
آب	۱۸۱
سیمان	۴۶۷
شن	۷۵۹
ماسه	۱۱۵۷

گشودگی‌ها به شکل دایروی و به قطر ۲۰۰ میلی‌متر بوده و توزیع آن‌ها به صورت متقارن و به گونه ای است که اعضای فشاری مدل خرپایی (Strut) را قطع کنند.

همه نمونه‌ها به همراه نمونه‌های استاندارد یک روز پس از بتن‌ریزی از قالب خارج شده و در حوضچه آب با دمای ۲۵ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. حوضچه‌ها در فضایی سر بسته قرار گرفته و از نظر رطوبت و دمایی شرایط استاندارد را دارند. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز از حوضچه خارج شده و تعدادی از نمونه‌های استاندارد به منظور تعیین مقاومت مشخصه ۲۸ روزه بتن بعد از خروج از حوضچه تحت بار فشاری قرار گرفته و بقیه آن‌ها نیز در موقع تست نمونه اصلی بارگذاری شده‌اند.

بازشوها با استفاده از دستگاه مغزه‌گیری (Core Drilling) با قطر ۲۰۰ میلی‌متر ایجاد شده‌اند. در حین مغزه‌گیری و ایجاد بازشو، دو عدد از میلگردهای طولی و یک عدد از میلگردهای عرضی جان نیز توسط دستگاه مغزه‌گیر قطع شده‌اند. ایجاد گشودگی و قطع این میلگردها نوعی شبیه‌سازی ایجاد گشودگی در تیرهای موجود می‌باشد. در واقع با این روش ایجاد گشودگی، بررسی تقویت تیرهای موجودی که بنا به دلایلی نیاز به ایجاد گشودگی در آنها می‌باشد در دستور کار قرار می‌گیرد.



شکل (۱) آرماتور گذاری نمونه‌ها (اندازه‌ها بر حسب سانتی‌متر می‌باشند)

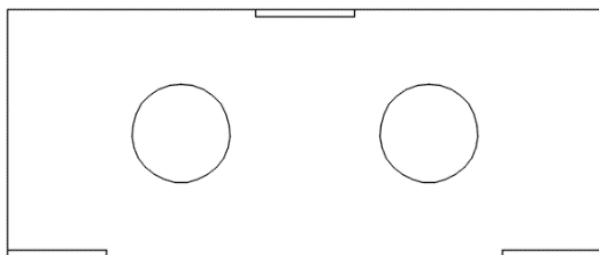
## تقویت نمونه‌ها

تقویت نمونه‌ها در این تحقیق با استفاده از الیاف کامپوزیتی کربن (CFRP) به همراه رزین مناسب انجام شده است. مشخصات این مواد مطابق جدول ۲ می‌باشد.

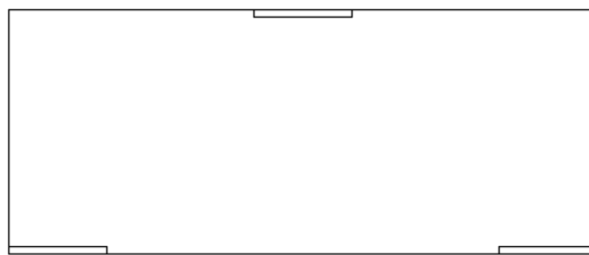
همانگونه که پیش‌تر بیان شد، این تحقیق شامل ۵ عدد تیر عمیق با ابعاد  $100 * 500 * 1200$  میلی‌متر می‌باشد که یکی از آن‌ها بدون گشودگی و بدون تقویت می‌باشد و به عنوان نمونه شاهد مورد استفاده قرار گرفته است (نمونه C1 مطابق شکل ۲-الف). نمونه دوم نیز بدون تقویت می‌باشد اما گشودگی‌هایی مشابه نمونه‌های دیگر در آن ایجاد شده است (نمونه C2 مطابق شکل ۲-ب). سه نمونه دیگر که نمونه‌های تقویت شده هستند قبل از تقویت سطح آن‌ها ساب زده شده تا دانه‌های سنگی آن‌ها مشاهده گردد. این کار به منظور عدم چسپندگی ورق FRP به سطح سست و شیره‌ای بتن انجام گرفته است. برای نمونه پنجم که تقویت به روش EBROG می‌باشد عمل ایجاد شیار بعد از ساب زدن توسط سنگ فرز انجام می‌گیرد.

جدول (۲) مشخصات مکانیکی مواد

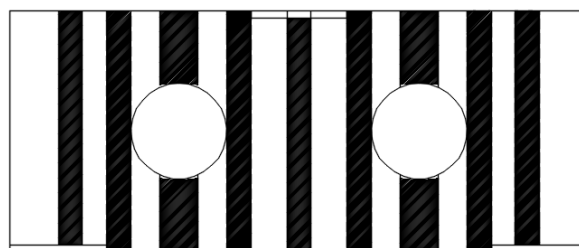
آرماتور	(میلی متر) قطر	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	
نمره ۶	۶	۳۰۰	۴۹۵	
نمره ۱۲	۱۲	۳۹۸	۷۲۸	
نمره ۱۸	۱۸	۴۷۲	۶۶۷	
رزین	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)	
Sikadur-330	۳۰	۴/۵	۰/۹	
الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)	ضخامت (mm)
Sika Wrap-200 C	۳۹۰۰	۲۳۰	۱/۵	۰/۹



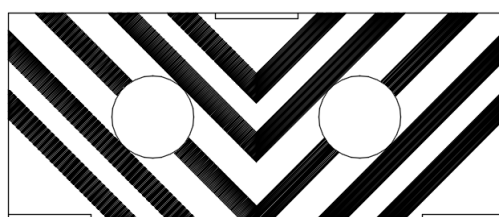
(ب)



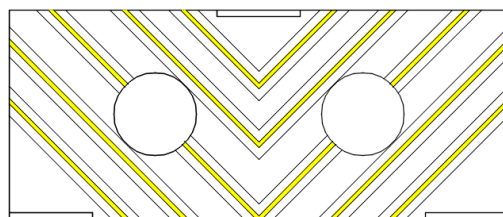
(الف)



(ج)



(د)

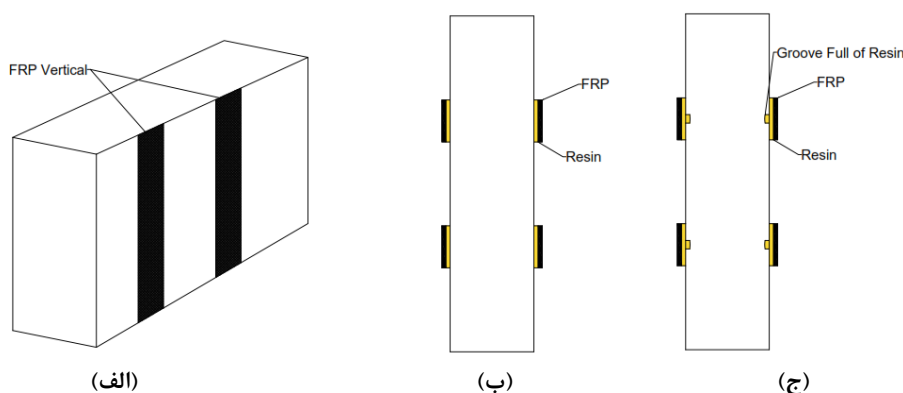


(ه)

شکل (۲) آرایش تقویتی نمونه ها؛ الف) نمونه C1؛ ب) نمونه C2؛ ج) نمونه W-EBR؛ د) D-EBR؛ ه) شیارها در نمونه D-EBROG (بعد از اشباع کامل حفره ها نوارهای FRP مطابق شکل ب بر روی این شیارها نصب میگردند)

بعد از عملیات ساب، نوارهایی اغلب به عرض ۵۰ میلی‌متر و مطابق شکل ۲-ج توسط یک لایه FRP در اطراف نمونه سوم به روش EBR دورپیچ (Wrapping) شده است (نمونه W-EBR)؛ نمونه چهارم نیز توسط نوارهایی به همان عرض اما به صورت مورب (Diagonal) و مطابق شکل ۲-د و به روش EBR تقویت شده است (نمونه D-EBR). نمونه پنجم نیز مشابه نمونه چهارم بوده اما شیارهایی (Grooves) در زیر نوارها در نظر گرفته شده است (نمونه D-EBROG با شیارهایی مطابق شکل ۲-ه)؛ لازم به ذکر است که عرض و عمق شیارها حدوداً ده میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین در دو نمونه آخر، نوارهای FRP تا لبه‌های وجوه ادامه پیدا کرده و به منظور فراهم کردن مهار کامل و جلوگیری از جداسدگی زودرس، به اندازه ۵۰ میلی‌متر از وجوه فوقانی و تحتانی را می‌پوشانند. در شکل ۳ نمایی از روش‌های نصب نشان داده شده است.

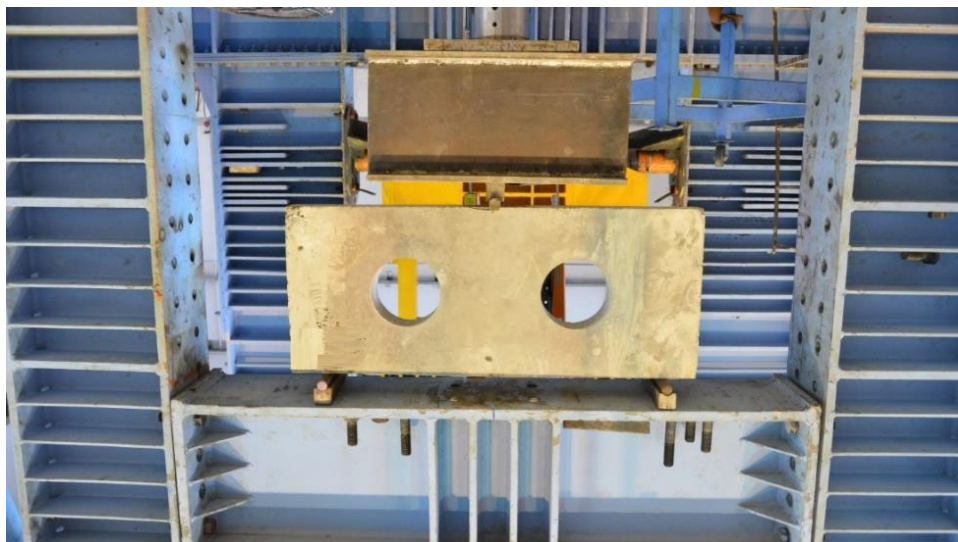
لازم به ذکر است که در آیین‌نامه‌های مختلف برای تقویت نمونه‌ها با کامپوزیت‌های FRP، آرایش خاصی برای ورق‌ها لحاظ نشده است و اساس آرایش استفاده شده در این تحقیق به گونه‌ای بوده است که اولاً کل طول تیر به گونه‌ای موثر تحت تاثیر ورق‌ها قرار گیرد و دوماً از هر ترک احتمالی برشی حداقل دو تا سه ورق تقویتی عبور کند. همچنین تلاش شده است که از نوارهایی با عرض و ضخامت یکسان استفاده شود تا با مقایسه گسیختگی و ظرفیت باربری آن‌ها، بتوان آنالیز بهتری از نتایج ارائه نموده و روش موثرتر در افزایش کارایی FRP را انتخاب نمود.



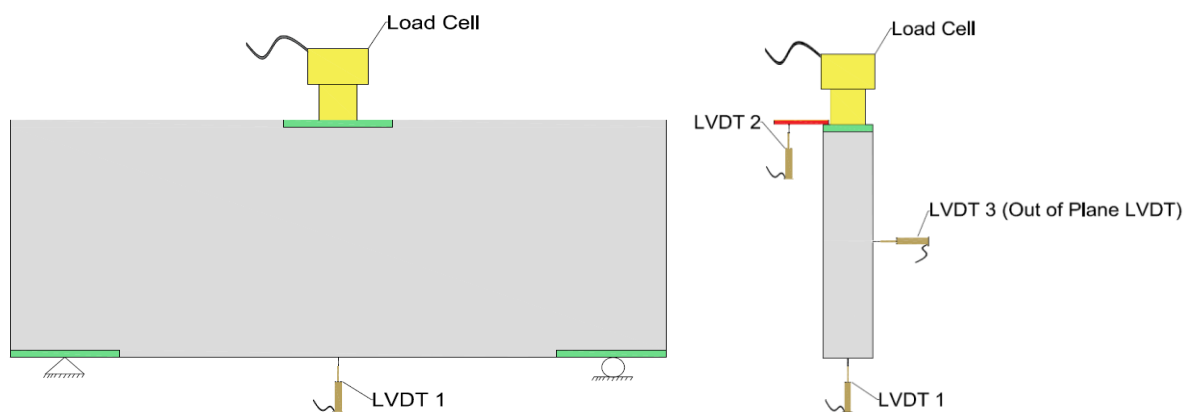
شکل (۳) نمایی از روش‌های نصب FRP در روش‌های EBR و EBROG؛ الف) تقویت قائم تیر با روش‌های EBR و EBROG؛ ب) روش EBR از نمای بالای تیر؛ ج) روش EBROG از نمای بالای تیر

## انجام آزمایش

در این تحقیق بارگذاری همه نمونه‌ها با استفاده از قابی فولادی مطابق شکل ۴ و به صورت نک نقطه‌ای می‌باشد؛ تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری شامل ۳ عدد LVDT<sup>۳</sup>، یک عدد Load Cell<sup>۴</sup> و دستگاه Data Logger<sup>۵</sup> می‌باشد. در وسط دهانه و در هر کدام از وجوه بالا و پایین نمونه، از یک عدد LVDT به منظور تعیین تغییر شکل نقاط میانی استفاده شده است. به منظور اطمینان از عدم وجود تغییر شکل‌های خارج از صفحه، از یک عدد LVDT نیز به صورت عمود بر وجوه قائم تیر استفاده شده است. روش اعمال بار به صورت کنترل تغییر مکان بوده که از طریق پمپ هیدرولیکی به نمونه اعمال شده و اندازه آن به کمک Load Cell محاسبه گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴) تجهیزات آزمایش؛ الف) قاب بارگذاری؛ ب) تصویر شماتیک نصب LVDT ها و Load Cell

<sup>۳</sup> جابه جایی سنج  
<sup>۴</sup> بارسنج  
<sup>۵</sup> داده بردار



## ۳- بررسی نتایج

برای بررسی نتایج حاصل از آزمایشات مود شکست نمونه مطابق شکل ۵ به همراه منحنی‌های بار- تغییرمکان ( $P-\delta$ ) آن‌ها در یک نمودار و مطابق شکل ۶ ارائه می‌شود. در این نمودار تغییرمکان در مرکز وجه پایینی تیر مورد نظر است ( $\delta$ )؛ همچنین از آن جایی که ظرفیت باربری، تغییر شکل نهایی و میزان جذب انرژی نمونه‌ها به عنوان عوامل اصلی در بررسی ظرفیت تیرها شناخته می‌شوند مقادیر آن‌ها برای هر نمونه در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است جذب انرژی برای هر نمونه از محاسبه سطح زیر نمودار بار- تغییرمکان مربوط به آن نمونه به دست می‌آید که واحد آن نیوتن-متر (ژول) می‌باشد [۳۷-۳۵]. همچنین برای تعیین لحظه نهایی، مطابق برخی مطالعات گذشته [۳۸، ۳۹]، چنانچه افت بار به صورت ناگهانی باشد لحظه افت بار به عنوان لحظه نهایی در نظر گرفته می‌شود و چنانچه افت به صورت تدریجی باشد بار متناظر با ۸۵ درصد بار حداکثر به عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده و تغییرمکان متناظر با آن نیز به عنوان تغییرمکان نهایی لحاظ می‌گردد.

جدول ۳: نتایج مربوط به آزمایش تیرها

نمونه	C1	C2	W-EBR	D-EBR	D-EBROG
مقاومت فشاری بتن نمونه (Mpa)	۵۳/۶۳	۵۳/۶۳	۵۳/۶۳	۵۳/۶۳	۵۳/۶۳
بار حداکثر (kN)	۷۲۰	۲۹۵	۳۷۴	۴۲۳	۴۱۳
تغییر شکل متناظر با بار حداکثر (mm)	۷/۵۵	۶/۸۷	۸/۰۶	۸/۱۴	۷/۰۸
بار نهایی (kN)	۶۱۲	۲۴۹	۳۱۷	۴۲۳	۴۱۲
تغییر شکل متناظر با بار نهایی (mm)	۹/۶۸	۷/۹۵	۸/۸۹	۸/۱۴	۷/۰۸
جذب انرژی (N.m)	۴۳۹۵	۱۵۰۸	۲۰۸۴	۱۹۳۱	۱۴۸۰
نسبت بار حداکثر به بار حداکثر نمونه C1	۱	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۵۷
نسبت جذب انرژی به جذب انرژی نمونه C1	۱	۰/۳۴	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۳۴
نسبت بار حداکثر به بار حداکثر نمونه C2	۲/۴۴	۱	۱/۲۷	۱/۴۳	۱/۴۰
نسبت جذب انرژی به جذب انرژی نمونه C2	۲/۹۱	۱	۱/۳۸	۱/۲۸	۰/۹۸

## بررسی مود شکست نمونه‌ها

در نمونه C1 که به عنوان نمونه شاهد مورد آزمایش قرار گرفت، اولین ترک‌ها به صورت قطری بوده است که با شروع از بر داخلی تکیه‌گاه‌ها تا میانه صفحه بارگذاری امتداد پیدا کرده و با ادامه بارگذاری عرض این ترک‌ها بیشتر شده تا در باری در حدود ۷۲۰ کیلونیوتن گسیخته شده است. مطابق مود شکست مورد انتظار که در همه مطالعات قبلی مشاهده شده بود [۷، ۴۰-۴۴]، در این نمونه نیز شکست نهایی بعد از تشکیل اعضای فشاری قطری (Strut) اتفاق افتاده است.

مود شکست نمونه C2 در شکل ۵- الف نشان داده شده است؛ همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترک‌های اولیه از بر داخلی تکیه‌گاه‌ها به سمت گشودگی حرکت کرده و در بالای گشودگی نیز این ترک ادامه یافته و تا صفحه بارگذاری امتداد یافته است. بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط کنگ [۴۲] ترک خوردگی در تیرهای با گشودگی به گونه‌ای است که ترک ناحیه بتنی پایین گشودگی به سمت قوس پایینی گشودگی و ترک ناحیه بتنی بالای گشودگی به سمت قوس بالای گشودگی حرکت می‌کند. ترک‌های بیشتر بخش سمت چپ نمونه و الگوی منظم‌تر آن‌ها در شکل ۵- الف، نشانگر تشکیل Strut در این بخش از نمونه می‌باشد؛ لازم به ذکر است به دلیل وجود گشودگی در این قسمت، به نظر می‌رسد Strut به گونه‌ای کاملاً ناقص شکل گرفته است. همچنین به دلیل شکست بخش سمت چپ، فرصت تشکیل Strut مشابه برای بخش سمت راست نمونه فراهم نشده است؛ هرچند وقوع ترک‌هایی مقدماتی در این بخش، میل تشکیل Strut را به وضوح نشان می‌دهد.

در نمونه W-EBR اولین ترک‌ها که از قسمت پایین گشودگی سمت راست و در جهت تکیه‌گاه شروع شده بود در باری حدود ۱۳۰ کیلونیوتن و تغییرمکانی برابر با ۱/۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است که با افزایش بارگذاری و وقوع ترک‌های بیشتر، ترک اولیه در باری حدود ۲۶۰ کیلونیوتن و تغییرمکان ۴/۴ میلی‌متر به طور قابل ملاحظه‌ای باز شده و همزمان ورق FRP در ناحیه بین گشودگی و نقطه بارگذاری و در روی خط واصل نقاط بارگزاری و تکیه‌گاهی دچار گسیختگی شده است. همچنین در وجه دیگر تیر، نوار متناظر دچار

جداشدگی شده است که این جداشدگی روی ناحیه همپوشانی اتفاق افتاده است. همزمان این نیرو به بتن زیر نوارهای مختلف FRP منتقل شده و دچار کندگی قسمت‌هایی از بتن زیر خود شده اند. بعد از وقوع این ترک، نمونه همچنان به باربری خود ادامه داده تا در بار ۳۷۴ کیلو نیوتن و تغییر مکان ۸/۰۶ میلی‌متر به ظرفیت حداکثر خود رسیده است.

در نمونه D-EBR شکست بتن با ترک خوردگی بتن در نواحی بالا و پایین یکی از گشودگی‌ها همراه بوده است ( شکل ۵-ج)؛ جداشدگی بتن در ناحیه نزدیک به تکیه‌گاه و صفحه بارگذاری به خوبی موید این موضوع است که ترک به صورت قطری، مطابق الگوی ترک در تیرهای دارای گشودگی، اتفاق افتاده است؛ با افزایش بارگذاری، عرض ترک‌ها نیز افزایش یافته است. رفتار ورق‌های تقویتی در این تیر، بعد از شکست به دو حالت متفاوت مشاهده شده است؛ در ورق‌های نزدیک گشودگی، به دلیل عبور ترک‌ها از ناحیه میانی آن‌ها، نیروی بسیار زیادی به این ورق‌ها وارد شده که باعث گسیختگی آن‌ها شده است؛ اما در نواحی دور از گشودگی، با توجه به عبور ترک‌ها از نواحی انتهایی نوارها، مود جداشدگی بر مود گسیختگی غلبه کرده و رفتار غیر مطلوبی برای ورق‌ها به وجود آمده است. در بعضی از نوارهایی که دچار جداشدگی شده‌اند مقدار زیادی از بتن نمونه نیز همراه با ورق جدا شده است که نشان از چسبندگی مناسب ورق‌ها در این نمونه‌ها دارد.

مود گسیختگی نمونه D-EBROG، مانند نمونه D-EBR، از لحاظ ترک خوردگی و رفتار پسا شکست تفاوت قابل ملاحظه‌ای با سه نمونه دیگر داشته است. بارگذاری نمونه تا قبل از رسیدن به بار حداکثر با صداهایی از سطح نمونه همراه بوده است که بیشتر به دلیل شکست چسب‌ها و ترک‌های ریزی در سطح نمونه بوده است که کاهش را در ظرفیت باربری نمونه ایجاد نکردند. با توجه به صداهای خروجی از نمونه و همین‌طور نمودار بار- تغییر مکان نمونه ( شکل ۶) به نظر می‌رسد شروع ترک‌های اصلی، که به شکست نمونه منجر می‌گردد، در باری حدود ۳۰۰ کیلو نیوتن رخ داده است. ترک‌های نهایی در نمونه مطابق شکل ۵-د به گونه‌ای بوده است که از پایین یکی از گشودگی‌ها و از نزدیک تکیه‌گاه شروع شده و تا قسمت تحتانی گشودگی امتداد یافته است؛ در ناحیه فوقانی گشودگی نیز از نزدیک صفحه بارگذاری تا بالایی گشودگی ترک امتداد یافته است؛ وقوع ترک در این نواحی باعث گسیختگی نوارهای این نواحی شده است، به گونه‌ای که در شکل ۵-د کاملاً مشهود است نوارها به جای جداشدن از سطح نمونه، گسیخته شده‌اند؛ نیروی بالای وارده از طرف نوارها به عمق بتن، باعث کندن بتن شده است؛ بار حداکثر و نهایی در این نمونه برابر با ۴۱۳ کیلو نیوتن و تغییر مکان متناظر با آن‌ها نیز برابر با ۷/۰۸ میلی‌متر به دست آمد.



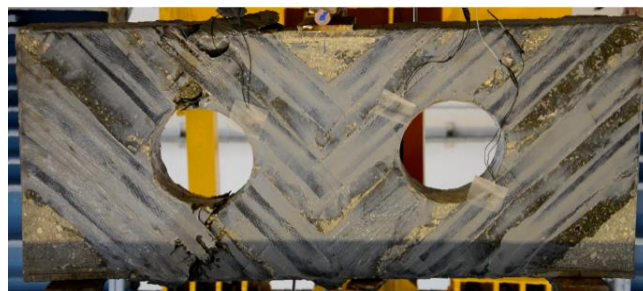
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵) تیرها در لحظه شکست: الف) تیر C2؛ ب) تیر W-EBR؛ ج) تیر D-EBR؛ د) تیر D-EBROG

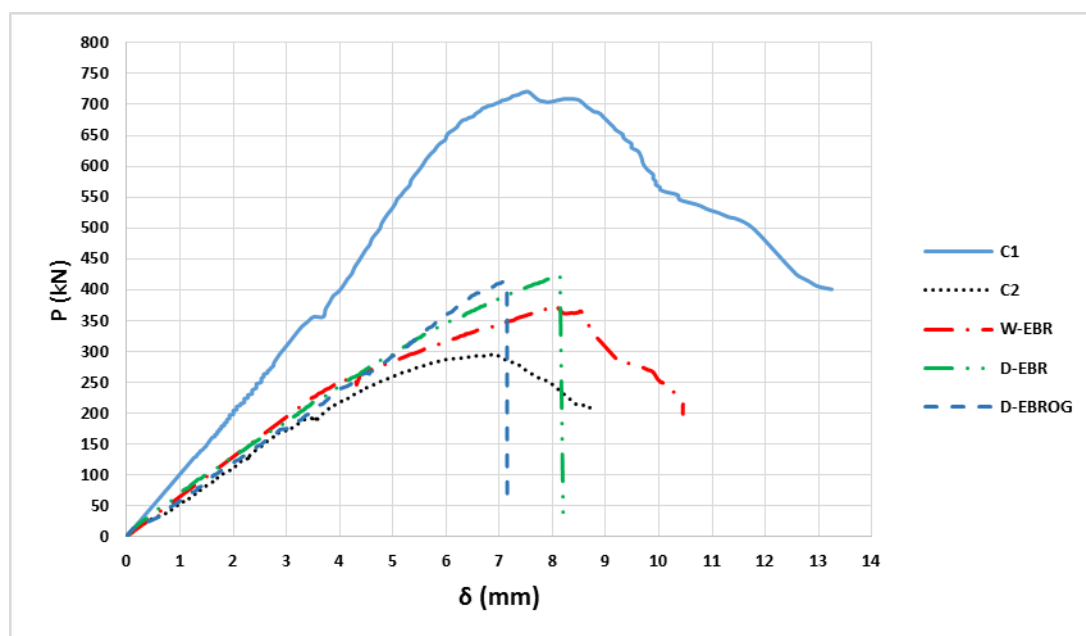
### بررسی نمودار بار - تغییر مکان تیرها

با دقت در نمودارهای شکل ۶ می‌توان به این نتیجه رسید که به جز برای نمونه شاهد که فاقد گشودگی بوده، شیب اولیه منحنی سایر نمونه‌ها، که بیان‌کننده سختی آن‌ها است، تقریباً برابر می‌باشند. سختی نمونه‌های دارای گشودگی (سختی حدود ۵۴ مگاپاسکال) به مراتب کمتر از سختی نمونه بدون گشودگی (سختی حدود ۱۰۱ مگاپاسکال) می‌باشد؛ کامل و بدون نقص بودن Strut های نمونه C1 باعث افزایش سختی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها شده است. در واقع با ایجاد گشودگی در نمونه‌های دیگر، علاوه بر انحراف مسیر انتقال تنش، تغییر شکل‌های متناظر با یک بار خاص نیز نسبت به نمونه بدون گشودگی افزایش یافته است. لازم به ذکر است از آنجایی که ورق‌های FRP تا سطح خاصی از بار، که به ترک خوردگی نمونه منجر می‌گردد، فعال نمی‌شوند لذا نمی‌توان انتظاری برای نقش آن‌ها در افزایش سختی نمونه‌ها قائل شد. بنابراین همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود سختی نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP مشابه سختی نمونه‌های دارای گشودگی و تقویت نشده بوده و تفاوت آن‌ها در محدوده ی بعد از الاستیک می‌باشد.

از جدول ۳ می‌توان برای مقایسه روش‌های تقویتی مورد استفاده و تاثیر گشودگی در تیرها استفاده کرد. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود ایجاد گشودگی در تیر باعث کاهش حدود ۵۹ درصدی ظرفیت باربری و ۶۶ درصدی میزان جذب انرژی در آن می‌شود. این گشودگی علاوه بر کاهش ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی تیر، باعث کاهش سختی و افزایش میزان تغییر شکل نهایی آن شده است. همچنین از نظر رفتار پسا شکست، دو نمونه‌ی بدون تقویت رفتاری غیر ترد و تقریباً مشابه از خود نشان داده که بیانگر مسلح بودن نمونه‌های بتنی می‌باشد.

به عنوان اولین گام برای تقویت تیر دارای گشودگی، از نوارهای کامپوزیتی به صورت دورپیچ استفاده شده است؛ همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود این روش ظرفیت باربری را به مقدار ۵۲ درصد و جذب انرژی را به مقدار ۴۷ درصد مقادیر متناظر برای نمونه بدون گشودگی می‌رساند. همچنین این نمونه نسبت به نمونه‌ی دارای گشودگی و بدون تقویت (C2)، ظرفیت باربری را ۲۷ درصد و جذب انرژی را ۳۸ درصد افزایش داده است. استفاده از نوارهای قائم تقویتی در نمونه W-EBR تاثیری در سختی الاستیک تیر نسبت به نمونه C2 نداشته اما با ترک خوردگی نمونه و فعال شدن ورق‌های تقویتی در باری حدود ۷۰ درصد بار حداکثر نمونه تقویت نشده (C2)، این دو منحنی از هم جدا شده و تاثیر ورق تقویتی نمایان می‌شود. این تاثیر باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی می‌شود.

همچنین بعد از رسیدن نمونه به بار حداکثر، نمونه با حالتی شکل پذیر به بار نهایی خود می‌رسد؛ چنانچه نمونه‌های تقویت شده با نوارهای FRP به عنوان ماده‌ای مرکب با دو جزء بتن مسلح ( به عنوان جزء شکل پذیر) و FRP ( به عنوان جزء ترد) در نظر گرفته شود می‌توان گفت در نمونه‌ی دورپیچ شده W-EBR، رفتار ماده‌ی کلی بیشتر تحت تاثیر جزء شکل پذیر (بتن مسلح) بوده و بنابراین منحنی بار- تغییر مکان نیز در لحظه شکست حالتی انعطاف پذیر خواهد داشت.



شکل (۶) منحنی بار-جابجایی نمونه‌ها

به طور کلی مواد جامد تحت محصورشدگی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ محصورشدگی به صورت قیدی که مانع از تغییر شکل بیشتر مواد می‌شود مود رفتاری و شکست آن‌ها را تغییر داده و در نهایت به افزایش ظرفیت و جذب انرژی مواد می‌انجامد. همچنین لازم است اشاره گردد تاثیر محصورشدگی در افزایش میزان جذب انرژی قابل توجه‌تر از نقش آن در افزایش ظرفیت باربری می‌باشد. در مورد جداسدگی این نوارها، بسیار مهم است که طول همپوشانی لازم برای روش دورپیچی فراهم گردد؛ عدم کفایت طول همپوشانی می‌تواند به جداسدگی نوار و عدم رسیدن نمونه به ظرفیت مطلوب منجر گردد. در کنار مزایای باربری مناسب و قابل توجه این روش، لازم است که سختی اجرایی این روش، بخصوص در تیرهایی که به دال متصل می‌باشند، مورد توجه قرار گیرد؛ علاوه بر این به دلیل حجم زیاد FRP مصرفی در این روش، ممکن است در برخی پروژه‌ها استفاده از آن مقرون به صرفه نبوده و از دیگر آرایش‌های تقویتی مانند آرایش مورب، که هم FRP کمتری مصرف می‌کنند و هم خواص باربری مناسبی فراهم می‌کنند، استفاده شود.

نوع دیگر تقویت استفاده از ورق‌های مورب و عمود بر جهت ترک برای تقویت می‌باشد. برای این منظور دو نمونه D-EBR و D-EBROG در نظر گرفته شده‌اند که دومی دارای شیارهایی در زیر ورق تقویتی می‌باشد. از نمودار شکل ۶ به وضوح تفاوت منحنی مربوط به این دو نمونه با نمونه‌های دیگر مشاهده می‌شود. مهم‌ترین تفاوت مشاهده شده، رفتار ترد نمونه‌ها به محض رسیدن به بار حداکثر می‌باشد. از نظر سختی اولیه، منحنی مربوط به این دو نمونه تقریباً مشابه بقیه نمونه‌های دارای گشودگی بوده و تاثیر FRP در باری حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد بار حداکثر مربوط به نمونه‌ی دارای گشودگی و بدون تقویت ظاهر می‌شود که متعاقب با آن منحنی تا رسیدن به مقدار حداکثر خود امتداد یافته و دچار افت ناگهانی می‌گردد. دلیل افت ناگهانی منحنی مربوط به این دو نمونه را می‌توان در غالب بودن رفتار FRP بر رفتار بتن مسلح در این نمونه‌ها جستجو کرد. در واقع در حالت تقویت مورب بتن مسلح، ورق‌های FRP تا رسیدن به کرنش گسیختگی خود مانع بازشدگی بیشتر ترک‌ها شده و به محض رسیدن عرض ترک به این مقدار، دچار شکست ترد (متناسب با رفتار اصلی خود) می‌گردند.

بنابراین در این حالت رفتار ماده مرکب بتن مسلح-FRP تحت تاثیر رفتار FRP ( به عنوان جزء ترد) قرار گرفته و شکست نهایی نمونه نیز به صورت ترد خواهد بود.

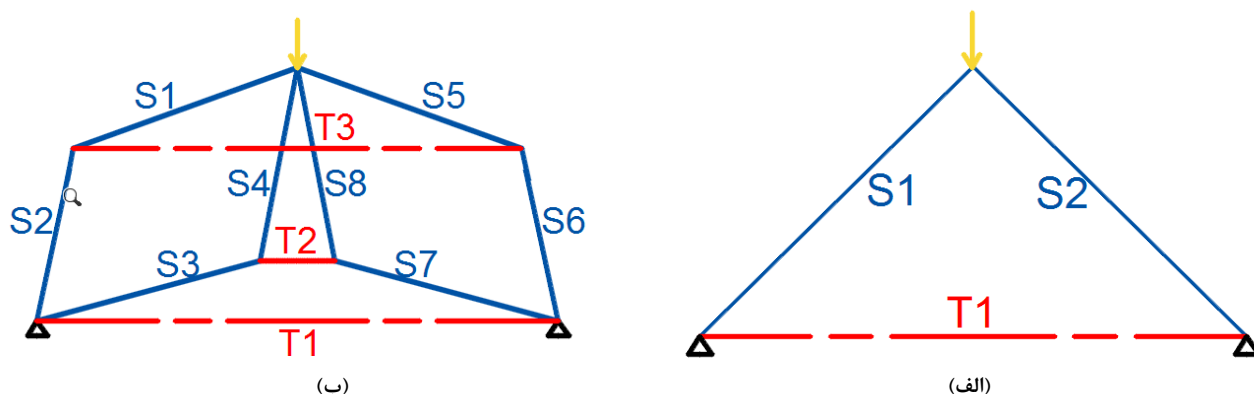
از جدول ۲ مشاهده می‌گردد که تاثیر نوارهای مورب در نمونه D-EBR افزایش ۴۳ درصدی بار حداکثر و حدود ۲۸ درصدی میزان جذب انرژی نسبت به نمونه شاهد دارای گشودگی می‌باشد. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که علی‌رغم استفاده‌ی کمتر از ورق FRP نسبت به روش دورپیچ، روش تقویت مورب توانسته است تاثیری مناسب و حتی بیشتر از نمونه دورپیچ در ظرفیت باربری تیر داشته باشد. در مقایسه با نمونه‌ی بدون گشودگی نیز، تیر تقویت شده با این روش تقویتی، به ظرفیت باربری حدود ۵۹ درصد و جذب انرژی حدود ۴۴ درصد مقادیر متناظر برای C1 رسیده است.

نقش ورق‌های تقویتی همراه با شیار مطابق جدول ۳، افزایش حدود ۴۰ درصدی ظرفیت باربری و عدم تاثیر قابل توجه در جذب انرژی نسبت به نمونه شاهد دارای گشودگی بوده است. این مقادیر از مقادیر به دست آمده برای نمونه بدون شیار (D-EBR) کمتر می‌باشد؛ در صورتیکه با توجه به اینکه در این نمونه از شیار استفاده شده بود انتظار می‌رفت که مقادیر به دست آمده از مقادیری که برای نمونه بدون شیار به دست آمده است بیشتر باشد؛ در توضیح این موضوع لازم است یادآوری شود که هدف از شیارزنی جلوگیری از جداسازی ورق‌های تقویتی، انتقال نیرو به هسته بتن و میل ورق‌ها به سمت گسیختگی می‌باشد. همان‌گونه که پیش از این نیز توضیح داده شده است در نمونه همراه با شیار (D-EBROG) اکثر ورق‌ها دچار گسیختگی شده‌اند در حالی که در نمونه بدون شیار (D-EBR) تعداد کمی از نوارها گسیخته شده و اکثر آن‌ها با پدیده جداسازی مواجه شده‌اند؛ دیگر عاملی که باعث می‌شود نقش شیارها در این نمونه‌ها را قابل توجه دانست تغییر مود شکست بتن و نحوه ترک خوردگی نمونه می‌باشد. در نمونه بدون شیار، ترک خوردگی تقریباً مانند نمونه‌های تقویت نشده به صورت قطری و از سمت تکیه‌گاه به سمت ورق بارگذاری بوده است در حالی که همان‌گونه که در شکل ۵-د مشاهده می‌شود ترک نمونه به صورت قائم و از وسط بازشو اتفاق افتاده است. این تغییر مود ترک خوردگی از قطری به قائم بیانگر میل نمونه به جذب انرژی بیشتر و ظرفیت باربری بیشتر می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد صرف نظر از اینکه مقادیر ظرفیت نهایی در دو روش و تفاوت آن‌ها به چه مقدار تغییر کرده است، یکی از اهداف مطالعه حاضر، که بررسی تاثیر شیارها بوده است، به خوبی شناخته شده و می‌توان تاثیر قابل قبول و موثر آن‌ها را در کارایی کامپوزیت‌ها پذیرفت و عدم رسیدن به ظرفیت مورد انتظار را در عوامل دیگری مانند نقص‌های ساخت و آزمایش جست و جو کرد که نیاز به مطالعات بیشتری دارد. برای اطمینان بیشتر در این خصوص می‌توان از نمودار مربوط به دو نمونه تقویت شده با ورق مورب کمک گرفت؛ همان‌طور که تاکنون بیان شده است بیشترین ظرفیت باربری مربوط به نمونه D-EBR بوده است که دارای نموداری تقریباً مشابه با نمودار نمونه D-EBROG می‌باشد؛ مشاهده این دو نمودار نشان می‌دهد که منحنی مربوط به نمونه D-EBROG قبل از اینکه وارد ناحیه افت شیب شود به نقطه شکست رسیده است، اما منحنی مربوط به نمونه D-EBR قبل از شکست، افت شیب را تجربه کرده که این موضوع می‌تواند به معنای از دست رفتن بخشی از پتانسیل موجود در نمونه‌ی دارای شیار و تاییدکننده بحث پیشین در باره اثرات شیار باشد.

#### ۴- مدل تحلیلی

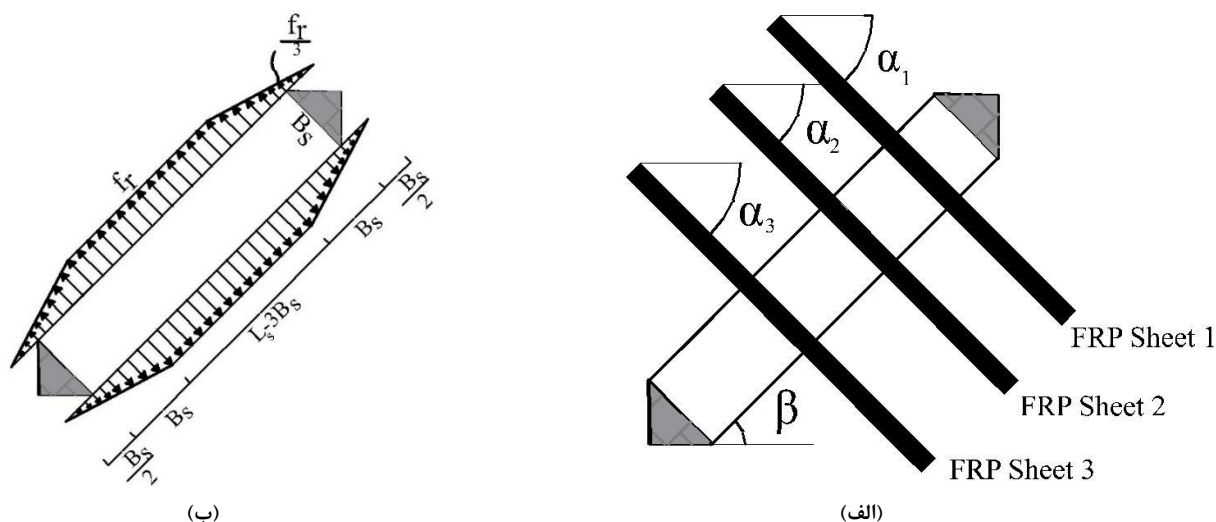
در این تحقیق از مدل خرپایی به منظور تحلیل نیروها درون تیر و از مودهای شکست قطری ( ترک خوردگی قطری و خردشدگی فشاری)، شکست خمشی و شکست ناشی از لهیدگی به منظور بررسی آستانه تحمل آن استفاده شده است. در این تحلیل، ساده ترین مدل خرپایی برای تیرهای بدون گشودگی و با گشودگی مطابق شکل ۷ ارائه شده است و بعد از تعیین ابعاد و تحلیل نیروها، بحرانی-ترین اعضای فشاری مشخص گردیده و با محاسبه ظرفیت‌های مربوط به آن اعضای فشاری، ظرفیت نهایی تیر مشخص می‌گردد. در اشکال زیر S معرف اعضای فشاری و T معرف اعضای کششی است.

در ادامه، معادلات ناشی از هر مود شکست به صورت خلاصه بیان شده و در نهایت بار هر کدام از تیرها طبق این معادلات استخراج شده و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد.



شکل ۷- مدل خربایی معادل؛ (الف) مدل خربایی تیر بدون بازشو؛ (ب) مدل خربایی تیر دارای بازشو

شکل ۸ یک عضو فشاری که با استفاده از ورق‌های FRP تقویت شده است را نشان می‌دهد. استخراج معادلات بر اساس نیروهای وارده به تیر تقویت شده با FRP انجام می‌گیرد و تیر بدون تقویت حالت خاصی از تیر تقویت شده در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۸- عضو فشاری؛ (الف) عضو فشاری تقویت شده با FRP؛ (ب) توزیع تنش ناشی از مقاومت کششی بتن در عضو فشاری

هنگامی که یک عضو فشاری تحت بار محوری قرار می‌گیرد مود شکست آن به دو صورت ترک خوردگی قطری و خرد شدگی فشاری خواهد بود؛ به منظور تحلیل نیروهای وارده به یک عضو فشاری، از شکل ۸ که نشان دهنده نیروهای داخلی و خارجی عضو می‌باشد استفاده می‌گردد. نیروهای مقاوم در برابر ترک خوردگی، شامل نیروهای درونی عضو (ناشی از آرماتور و بتن) و بیرونی عضو (ناشی از FRP) می‌باشند که با محاسبه اثرات هر کدام و جمع آن‌ها، ظرفیت نهایی Strut محاسبه می‌گردد. در ادامه معادلات برای هر کدام از مودهای شکست به تفکیک بیان می‌شود.

شکست قطری به صورتی است که یک ترک در محور عضو فشاری به وجود آمده و به شکست تیر می‌انجامد. در این نوع شکست مقاومت کششی بتن، آرماتورها و الیاف FRP در برابر شکست قطری مقاومت می‌کنند. در این نوع شکست، دو نوع معادله مختلف استخراج می‌شود که یک نوع آن مربوط به لحظه ترک خوردگی قطری (معادله ۱) و نوع دوم مربوط به لحظه بعد از ترک خوردگی می‌باشد (معادله ۲ و ۳) و بیشترین این دو مقدار به عنوان نیروی مربوط به مود شکست قطری معرفی می‌گردد. با استفاده از نیروهای مقاوم کششی (بتن، آرماتور و FRP) ابتدا نیروی کششی عمود بر محور Strut به دست آمده و سپس با توجه به معادل سازی Strut به خربایی متشکل از

اعضای فشاری و کششی که مطابق ACI 318-14 [۱۳] شبیهی به نسبت دو به یک با هم می‌سازند، نیروی محوری Strut دو برابر مجموع نیروهای کششی عمود بر محور آن به دست می‌آید (معادله ۱۰).

$$T_1 = f_r \left[ \frac{(n_s - 1)(3L_s - 5B_s)}{3(L_s - B_s)} A_{s, str} + L_s b - \frac{5}{3} B_s b \right] + \sum_{i=1}^q A_{f, mid, i} n_{f, i} f_r \sin(\beta + \alpha_i) + \frac{4}{3} \sum_{j=1}^p A_{f, cor, j} n_{f, j} f_r \sin(\beta + \alpha_j) \quad (1)$$

$$T_2 = f_r \left[ 2B_s b + \frac{3n_s l_s - B_s (5n + 2)}{l_s - B_s} A_{s, str} \right] + \sum_{i=1}^q A_{f, i} E_{fr, i} \varepsilon_{fr, i} \sin(\beta + \alpha_i) : 3f_r \frac{E_s}{E_c} \leq f_y \text{ اگر} \quad (2)$$

$$3f_r \frac{E_s}{E_c} > f_y \text{ اگر} \quad (3)$$

$$T_2 = A_{s, mid} f_{wy} + 2f_r (B_s b - A_{s, cor}) + A_{s, cor} (f_{wy} + n_s f_r) + \sum_{i=1}^q A_{f, i} E_{fr, i} \varepsilon_{fr, i} \sin(\beta + \alpha_i)$$

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} & \text{for wrapping around} \\ k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 & \text{for U Shape} \end{cases} \quad (4)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 l_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (5)$$

$$l_v = \frac{233000}{(t_f E_f)^{0.58}} \leq d_{fe} \quad (6)$$

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{0.67} \quad (7)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fe} - l_v}{d_{fe}} & \text{for U Shape} \\ \frac{d_{fe} - 2l_v}{d_{fe}} & \text{for two sides} \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{str} = \max(T_1, T_2) \quad (9)$$

$$F_{str, sh} = 2T_{str} \quad (10)$$

$$f_r = 0.67 \sqrt{f_c'} \quad (11)$$

در معادلات فوق طول موثر پیوستگی FRP با سطح بتن با  $l_v$  نشان داده شده است که این مقدار برای تقویت بدون شیار می‌باشد در حالی که انتظار می‌رود طول موثر در نمونه های شیار دار به دلیل پیوستگی موثرتر، بیشتر باشد؛ بنابراین برای تعیین  $l_v$  در این حالت از مدل ارائه شده توسط مقدس و همکاران [۴۵] مطابق زیر استفاده می‌شود.

$$l_{v(EBROG)} = \alpha \frac{(E_f t_f)^{0.1}}{f_c'^{0.25}} e^g \quad (12)$$

$$g = \frac{(b_g + h_g)^{(1 + \frac{h_g}{b_g})}}{b_f^3} \quad (13)$$

در معادله فوق  $\alpha$  ضریب همبستگی برای سطوح احتمالی مختلف می باشد که در این تحقیق با توجه به میزان اطمینان مورد انتظار، از عدد ۶۸ برای آن استفاده شده است.

برای تعیین نیروی خردشدگی فشاری نیز از ۸۵ درصد مقاومت بتن به همراه آرماتورهای درون Strut استفاده می شود که منتج به معادله ۱۴ می گردد.

$$F_{str,c} = 0.85f'_c(A_{cs} - A_{ss}) + A_{ss}f_y \quad (14)$$

$$A_{ss} = A_v \sin \theta + A_h \cos \theta \quad (15)$$

در معادلات فوق  $A_{ss}$  مساحت آرماتورهای جان مطابق معادله ۱۵ و  $A_{cs}$  کوچکترین سطح مقطع فشاری می باشد؛ همچنین  $A_v$  و  $A_h$  به ترتیب مساحت آرماتورهای قائم و افقی جان بوده که Strut را قطع می کند.

مینیمم دو مقدار به دست آمده از معادلات ۱۰ و ۱۴ به عنوان مقدار ظرفیت ناشی از شکست قطری تیر عمیق مطرح می گردد؛ نحوه استفاده از این مقدار به اینگونه است که رابطه بار محوری عضو فشاری بحرانی با ظرفیت نهایی تیر از طریق تحلیل خرپاهای معادل شکل ۷ به دست آمده و در نهایت ظرفیت تیر ناشی از ترک خوردگی قطری محاسبه می گردد؛ این مقدار با  $p_{sh}$  در محاسبات آورده شده است. مقدار محاسبه شده فقط ظرفیت برشی تیر را به دست می دهد و برای تعیین ظرفیت نهایی تیر باید ظرفیت ناشی از خمش مطابق معادلات ۱۶ تا ۱۹ [۴۲] و ظرفیت لهدگی مطابق معادلات ۲۰ تا ۲۲ محاسبه می گردد. لازم به ذکر است معادله ۱۴ برای یک تیر دو سر ساده ارائه شده است.

$$p_f = \frac{4M_{fl}}{L} \quad (16)$$

$$M_{fl} = td^2 f'_c \left[ 0.86 \frac{p_s' f_{sy}}{f'_c} + \frac{0.52 p_{wt} f_y \cos \beta}{f'_c} + 0.33 \right] \quad (17)$$

$$p_s' = \frac{A_s}{td} \quad (18)$$

$$p_{wt} = \frac{A_{sw}}{td} \quad (19)$$

برای محاسبه ظرفیت لهدگی از محاسبه ظرفیت ورق های بارگذاری و تکیه گاهی همراه با بتن زیر آن ها استفاده می شود.

$$P_{b1} = 0.85f'_c(L_p t_p) + A_{sb} f_y \quad (20)$$

$$P_{b2} = \frac{2f_{yp} W_p t_p}{3} \quad (21)$$

$$P_b = \min(P_{b1top}, P_{b2top}, 2P_{b1bot}, 2P_{b2bot}) \quad (22)$$

در نهایت بعد از محاسبه ظرفیت های خمشی، برشی و لهدگی ظرفیت نهایی تیر با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

$$P_u = \min(P_{sh}, P_f, P_b) \quad (23)$$

جدول ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

نمونه	C1	C2	W-EBR	D-EBR	D-EBROG
بار حداکثر آزمایشگاهی (kN)	۷۲۰	۲۹۵	۳۷۴	۴۲۳	۴۱۳
بار حداکثر تحلیلی (kN)	۶۲۲	۳۰۶	۳۶۵	۴۰۳	۴۴۸
نسبت بار تحلیلی به آزمایشگاهی	۰/۸۶	۱/۰۴	۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۰۸



جدول ۴ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای ظرفیت باربری تیرها را نمایش می‌دهد؛ همانگونه که مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از مدل تحلیلی تطابق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد؛ میانگین نسبت‌های ظرفیت ناشی از مدل تحلیلی به نتایج آزمایشگاهی بیانگر محافظه کار بودن مدل فوق می‌باشد؛ همچنین از آنجایی که پیشتر نیز توضیح داده شده است از آنجایی که نمونه D-EBROG دچار شکست زودرس شده است لذا مقدار بار تحلیلی بیشتری را نیز در مدل نمایش نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق استفاده از ورق‌های CFRP در جبران ضعف ناشی از وجود گشودگی‌های دایروی در تیرهای بتن مسلح عمیق می‌باشد. برای این منظور ۵ تیر عمیق بتنی مسلح ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت؛ دو عدد از نمونه‌ها فاقد تقویت و سه نمونه باقیمانده به صورت‌های مورب و دورپیچ و با دو روش EBR و EBROG توسط ورق‌های CFRP مورد تقویت قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است؛

- شکست تیر بدون تقویت و بدون گشودگی به صورت قطری اتفاق افتاده است که از بر صفحات تکیه‌گاهی شروع شده و تا بر صفحه بارگذاری امتداد یافته است.
- در تیر بدون تقویت و دارای گشودگی، ترک‌ها از بر تکیه‌گاه به سمت قوس پایینی گشودگی و از بر صفحه بارگذاری به سمت قوس فوقانی تیر حرکت کرده و با تداوم بارگذاری، عرض ترک‌ها زیاد شده و نهایتاً به شکست نمونه منجر شده است.
- در نمونه‌های تقویت شده علاوه بر ایجاد ترک‌های وسیع در نمونه، جداشدگی و گسیختگی در نوارهای کامپوزیتی نیز اتفاق افتاده بود. در نمونه دورپیچ شده با توجه به محصورشدگی مناسب و عدم امکان جداشدگی، اکثر نوارها گسیخته شده اند؛ در نمونه‌های با نوارهای مورب، با توجه به اثرات بالای تنش‌های کششی بر نوارها، ظرفیت تیرها نسبت به میزان FRP مصرفی افزایش قابل توجهی را از خود نشان داده است. در تیر بدون شیار، بیشتر نوارها دچار جداشدگی شده‌اند اما در تیر دارای شیار گسیختگی نوارها مود حاکم بر شکست نمونه بوده است.
- شکست نمونه بدون شیار همراه با ترک‌خوردگی قطری از بر تکیه‌گاه تا بر ورق بارگذاری بوده است در حالی که در نمونه دارای شیار، شکست به صورت قائم از وسط بازشو عبور کرده است. تغییر مود ترک‌خوردگی از قطری به قائم، بیانگر میل نمونه به جذب انرژی بیشتر و ظرفیت باربری بیشتر می‌باشد.
- روش‌های تقویتی توانستند بخش عمده‌ای از ضعف ناشی از وجود بازشو را جبران کنند که در بین این روش‌ها، روش نوارهای مورب با اسحصال ۵۹ درصد ظرفیت باربری بهترین کارایی را داشته اما از نظر جذب انرژی روش دورپیچ موثرتر بوده است. نقش موثرتر روش دورپیچ، به دلیل اثر محصورشدگی بتن می‌باشد.
- در نمونه‌های تقویت شده علاوه بر ایجاد ترک‌های وسیع در نمونه، جداشدگی و گسیختگی در نوارهای کامپوزیتی نیز اتفاق افتاده بود. در نمونه دورپیچ شده با توجه به محصورشدگی مناسب و عدم امکان جداشدگی، اکثر نوارها گسیخته شده اند؛ در نمونه‌های با نوارهای مورب، با توجه به اثرات بالای تنش‌های کششی بر نوارها، ظرفیت تیرها نسبت به میزان FRP مصرف شده افزایش قابل توجهی را از خود نشان داده است. در تیر بدون شیار بیشتر نوارها دچار جداشدگی شده‌اند اما در تیر دارای شیار گسیختگی نوارها مود حاکم بر شکست نمونه بوده است.
- استفاده از نوارهای مورب به هر دو روش با شیار و بدون شیار، باعث افزایش حدود ۴۰ تا ۴۳ درصدی بار نسبت به نمونه شاهد دارای بازشو شده است. علی‌رغم ظرفیت باربری تقریباً مشابه نمونه‌های تقویت شده با دو روش EBR و EBROG، اما به دلیل تغییر مود گسیختگی، عدم مشاهده ناحیه نرم شدگی در نمودار بار- تغییرمکان و پاره شدن اکثر نوارهای تقویتی نمونه‌های دارای شیار، می‌توان به نقش مثبت و موثر شیار در افزایش ظرفیت نمونه‌ها اشاره کرد. همچنین استفاده از نوارهای دورپیچ شده باعث افزایش حدود ۲۷ درصدی ظرفیت باربری و ۳۸ درصدی جذب انرژی نسبت به نمونه شاهد دارای بازشو شده است. تاثیر بیشتر این روش در جذب انرژی، به دلیل محصورشدگی ایجاد شده توسط این روش بوده است.

- به منظور برآورد ظرفیت تیرها، یک مدل مبتنی بر مودهای شکست تیر عمیق و با کمک روش خرابایی بسط داده شده است که پیشبینی‌های بسیار خوبی از ظرفیت باربری تیرها داشته است؛ با در نظر گرفتن میانگین مقاومت‌های ارائه شده توسط این مدل می‌توان آن را مدلی محافظه کار در نظر گرفت.

## ۶- فهرست علائم

$T_1, T_2, T_{str}$	نیروی کششی درون عضو فشاری،	$kN$
$f_r$	تنش کششی بتن،	$Mpa$
$l_s$	طول عضو فشاری،	$mm$
$t$	ضخامت تیر،	$mm$
$n$	نسبت مدول الاستیک فولاد به مدول الاستیک بتن	
$B_s$	متوسط عرض دو انتهای عضو فشاری،	$mm$
$A_{str}$	مساحت مقطع عضو فشاری،	$mm^2$
$A_{f,i}$	مساحت کلی مقطع FRP شماره $i$ در ناحیه میانی	
$A_{f,mid,i}$	مساحت مقطع FRP شماره $i$ در ناحیه میانی	
$A_{f,cor,i}$	مساحت مقطع FRP شماره $i$ در یکی از نواحی انتهایی	
$n_f$	نسبت مدول الاستیک FRP به مدول الاستیک بتن	
$A_f$	مساحت مقطع FRP،	$mm^2$
$E_f$	مدول الاستیسیته FRP،	$Mpa$
$E_c$	مدول الاستیسیته بتن،	$Mpa$
$f_y$	تنش تسلیم آرماتورهای جان،	$Mpa$
$f_{yp}$	تنش تسلیم ورق بارگذاری،	$Mpa$
$f'_c$	مقاومت فشاری بتن،	$Mpa$
$l_v$	طول موثر پیوستگی FRP با سطح بتن،	$mm$
$l_f$	طول ورق FRP،	$mm$
$F_{str,sh}$	نیروی مقاوم محوری عضو فشاری در حالت ترک خوردگی قطری،	$kN$
$F_{str,c}$	نیروی مقاوم محوری عضو فشاری در حالت خردشدگی فشاری،	$kN$
$l_v(EBROG)$	طول موثر پیوستگی FRP با سطح بتن در حالت شیاردار،	$mm$
$b_g$	عرض شیار،	$mm$
$h_g$	عمق شیار،	$mm$
$b_f$	عرض ورق FRP،	$mm$
$A_{cs}$	کوچکترین سطح مقطع عضو فشاری،	$mm^2$
$A_{ss}$	مساحت معادل آرماتورهایی از جان که عضو فشاری را قطع می‌کنند،	$mm^2$
$A_v$	مساحت آرماتورهای قائم جان که عضو فشاری را قطع می‌کنند،	$mm^2$
$A_h$	مساحت آرماتورهای افقی جان که عضو فشاری را قطع می‌کنند،	$mm^2$

$$A_s \text{ مساحت آرماتورهای کششی، } mm^2$$

$$A_{sw} \text{ مساحت آرماتورهای افقی جان که در زیر تار خنثی قرار میگیرند، } mm^2$$

$$l \text{ طول تیر (فاصله مرکز تا مرکز تکیه گاه های تیر)، } m$$

$$M_{fl} \text{ ظرفیت خمشی مقطع، } kN.m$$

$$P_{b1top}, P_{b2top} \text{ نیروهای لهیدگی در ورق بارگذاری، } kN$$

$$P_{b1bot}, P_{b2bot} \text{ نیروهای لهیدگی در ورق تکیه گاهی، } kN$$

$$P_{sh} \text{ ظرفیت در برابر شکست قطری، } kN$$

$$P_f \text{ ظرفیت در برابر شکست خمشی، } kN$$

$$P_b \text{ ظرفیت در برابر شکست لهیدگی، } kN$$

$$P_u \text{ ظرفیت نهایی تیر، } kN$$

$$f_{ys} \text{ تنش تسلیم آرماتورهای کششی، } Mpa$$

$$d \text{ عمق موثر تیر، } mm$$

$$\alpha_i \text{ زاویه ورق FRP شماره } i \text{ با افق}$$

$$\beta \text{ زاویه عضو فشاری با افق}$$

$$\epsilon_{fe} \text{ کرنش موثر FRP}$$

$$\epsilon_{fu} \text{ کرنش نهایی FRP}$$

## مراجع

- [1] Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings. (1392). Code 9, Office of the Building National Regulations, (In Persian)
- [2] Iran Concrete Regulation. (1383). Management and Planning Organization, (In Persian)
- [3] A. Committee, 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14) (2014), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 519.
- [4] Arabzadeh. A, Rahaie. A, Aghayari. A. (2009). A simple strut-and-tie model for prediction of ultimate shear strength of rc deep beams, International Journal of Civil Engineering, 7(3), 141-153.
- [5] Chen. H, Yi. W.-J, Hwang. H.-J. (2018). Cracking strut-and-tie model for shear strength evaluation of reinforced concrete deep beams, Engineering Structures, 163, 396-408.
- [6] Deng. M, Ma. F, Ye. W, Liang. X. (2018). Investigation of the shear strength of HDC deep beams based on a modified direct strut-and-tie model, Construction and Building Materials, 172, 340-348.
- [7] Ismail. K.S, Guadagnini. M, Pilakoutas. K. (2017). Strut-and-Tie Modeling of Reinforced Concrete Deep Beams, Journal of Structural Engineering, 144(2), 04017216.
- [8] Campione. G, Minafò. G. (2012). Behaviour of concrete deep beams with openings and low shear span-to-depth ratio, Engineering Structures, 41, 294-306.
- [9] Chegeni. I.B, Dalvand. A. (2016). Finite Element Study of Reinforced Concrete Deep Beams with Rectangular Web Openings, Journal of Engineering of and Applied Science, 11(2), 3167-3176.

- [10] Hu. O, Tan. K. (2007), Large reinforced-concrete deep beams with web openings: test and strut-and-tie results, Magazine of Concrete Research, 59(6), 423-434.
- [11] Senthil. K, Gupta. A, Singh. S. (2018). Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method, Advances in Concrete Construction, 6(3), 245-268.
- [12] Tseng. C-C, Hwang. S.-J, Lu. W.-Y. (2017). Shear Strength Prediction of Reinforced Concrete Deep Beams with Web Openings, ACI Structural Journal, 114(6), 1569-1579.
- [13] El-Maaddawy .T, Sherif. S. (2009) FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings, Composite Structures, 89(1), 60-69.
- [14] El-Maaddawy. T, El-Ariss. B. (2012). Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthened in shear with CFRP composites, Journal of Composites for Construction, 16(1), 47-59.
- [15] Islam. M, Mansur. M, Maalej. M. (2005). Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, Cement and Concrete Composites, 27(3), 413-420.
- [16] Kumar.H. Eexperimental and numerical studies on behaviour of FRP strengthened deep beams with openings, MSc Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, (2012).
- [17] Lu. W-Y, Yu. H-W, Chen. C-L, Liu. S-L, Chen. T-C. (2015). High-strength concrete deep beams with web openings strengthened by carbon fiber reinforced plastics, Computers and Concrete.
- [18] Hanoon. A.N, Jaafar. M, Hejazi. F, Aziz F.N.A. (2017). Strut-and-tie model for externally bonded CFRP-strengthened reinforced concrete deep beams based on particle swarm optimization algorithm: CFRP debonding and rupture, Construction and Building Materials, 147, 428-447.
- [19] Hawileh. R, El-Maaddawy T.,Naser. M. (2012). Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites, Materials & Design, 42, 378-387.
- [20] Ha. S.T. (2000). Design of concrete deep beams with openings and carbon fiber laminate repair, Master's Theses and Graduate Research, San Jose State University.
- [21] Kim. M, Kim. H, Park.H, Ahn. N, Lee.N. (2015). Evaluation of shear behavior of deep beams with shear reinforced with GFRP plate, Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering, 22(6), 2142.
- [22] Dias. S, Barros. J, Janwaen. W. (2018). Behavior of Rc Beams Flexurally Strengthened with Nsm Cfrp Laminates, Composite Structures, 201, 363-376.
- [23] Hajihashemi. A, Mostofinejad. M,Azhari. M. (2011). Investigation of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP laminates, Journal of Composites for Construction, 15(6), 887-895.
- [24] Sas. G, Dăescu. C, Popescu. C, Nagy-György. T. (2014). Numerical optimization of strengthening disturbed regions of dapped-end beams using NSM and EBR CFRP, Composites Part B: Engineering, 67, 381-390.
- [25] Sharaky. I, Baena. M, Barris. C, Sallam. M, Torres. L. (2018). Effect of axial stiffness of NSM FRP reinforcement and concrete cover confinement on flexural behaviour of strengthened RC beams: Experimental and numerical study, Engineering Structures, 173, 987-1001.
- [26] Mostofinejad. D, Kashani. A.T. (2013). Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams, Composites Part B: Engineering, 45(1), 1704-1713.
- [27] Mostofinejad. D, Mahmoudabadi. E. (2010). Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams, Journal of Composites for Construction, 14(6), 804-811.

- [28] Mostofinejad. D, Moghaddas. A. (2014). Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams, *Construction and Building Materials*, 54, 605-614.
- [29] Mostofinejad. D, Shameli. S.M. (2013). externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams, *Construction and Building Materials*, 38, 751-758.
- [30] Hussain. Q, Pimanmas. A, (2015) Shear strengthening of RC deep beams with openings using Sprayed Glass Fiber Reinforced Polymer Composites (SGFRP): Part 1. Experimental study, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(7), 2121-2133.
- [31] Raisszadeh. A.H, Khaloo. A.R.. (2010). Finite Element Investigation of Retrofit of RC Deep Beams Using FRP Wraps, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran.
- [32] Arabzadeh. A , Amani Dashlekeh, A, Mahmoudzadeh Kani. I. (2015). Experimental Study of prestressed RC Deep Beams retrofitted by CFRP, *Modares Civil Engineering journal*, 15, 117-126.
- [33] Mostofinejad. D, Hajrasouliha. M, (2011) Experimental study on grooving detail for elimination of debonding of FRP sheets from concrete surface, in: *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer, pp. 545-547.
- [34] Standard.A, 211.1. (1996). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part: 1, 211.211-211.
- [35] Isa. M.A, Alrousan.R.Z, (2009). Experimental and parametric study of circular short columns confined with CFRP composites, *Journal of Composites for Construction*, 13(2), 135-147.
- [36] Piekarczyk. J, Piekarczyk. W, Blazewicz. S. (2011). Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2365-2369.
- [37] Rousakis. T.C, Karabinis. A.I, Kioussis. P.D. (2007). FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling, *Engineering Structures*, 29(7),1343-1353.
- [38] Lei. X, Pham, T.M, Hadi. M.N. (2012). Comparative behaviour of FRP confined square concrete columns under eccentric loading, *6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, IABMAS, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 1207-1214.
- [39] Wang. L.M, Wu. Y.F, (2008). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test, *Engineering structures*, 30(2), 493-505.
- [40] De Paiva. H, Siess. C.P. (1965). Strength and behavior of deep beams in shear, *Journal of the Structural Division*, 91(5) 19-41.
- [41] Kong. F, Garcia. R, Paine, J, Wong, H, Tang, C, Chemrouk, M, (1986), Strength and stability of slender concrete deep beams, *The Structural Engineer B*, 64, 49-56.
- [42] Kong. F.K. (2006). Reinforced concrete deep beams, CRC Press.
- [43] Ramakrishnan. V, Ananthanarayana. Y.(1968). Ultimate strength of deep beams in shear, in: *Journal Proceedings*, pp. 87-98.
- [44] Tan. K, Tang. C, Tong. K, (2003). A direct method for deep beams with web reinforcement, *Magazine of concrete research*, 55(1), 53-63.
- [45] Moghaddas. A, Mostofinejad. D, Iliia. E. (2019). Empirical FRP-concrete effective bond length model for externally bonded reinforcement on the grooves, *Composites Part B: Engineering*, 172, 323-338.