



Research Article

Numerical study of performance of reinforced concrete beams with hollow core under torsional loading by finite element method

Babak Alinejad^{1*}, Saeed Mohammadi²

^{1*}-Assistant Professor, department of engineering, university of Maragheh, Maragheh, Iran.

²- MS student of structural eng., department of engineering, university of Maragheh, Maragheh, Iran.

Received: 01 August 2024; Revised: 07 September 2024; Accepted: 09 September 2024; Published: 09 September 2024

Abstract:

Twisting in structural components, especially with non-circular sections due to distortion, can be considered as a critical load to cause small or extensive failures. Nowadays, the saving of consumable materials is considered among the first priorities of engineering, and beams, as one of the main and frequent components in the load-bearing system of structures, can play an important role in the stability of the structure and at the same time the cost price of the structure. In this regard, the use of beams with a hollow core can help us achieve this goal. FRP fibers can be described as new developed materials outstandingly with high strength-to-weight ratio and durability in corrosive environments, which has made their application especially significant in space structures and marine industries. In this research, after validating the laboratory sample and confirming the obtained results, the modeling of 7 samples of concrete beams with circular and square holes with CFRP sheets under the effect of torsional force in different situations was done. The obtained results show that the samples in which CFRP sheets were used to improve the performance of the concrete beam had the same performance in the elastic region, and with the continuation of loading and changing the slope of the curve and entering the plastic region of the samples, we have seen an increase in the difference between the samples. Also, the values of stress and plastic strain in the places where CFRP sheets were used were of lower value and intensity and also spread in a shorter length. So, in the sample with CFRP sheets at the beginning and end of the beam, the amount of stress and strain distributed in a larger length is created. One of the significant results of this study is that the capacity of a beam with a square hollow core shows a 15.71% increase in torsional capacity compared to a circle with the same cross-sectional area, as well as a 12.15% increase in the capacity of a beam with four hollow circles in the cross-section compared to a circle with an equal area.

Keywords: Reinforced concrete beam, torsion, CFRP sheet, elastic area, bearing capacity, plastic strain, Finite Element Method

Cite this article as: Alinejad, B. and Mohammadi, S. (2024). Numerical study of performance of reinforced concrete beams with hollow core under torsional loading by finite element method. (e204790). Civil and Project, 6(10), e204790. <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.476424.1319>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مطالعه عددی عملکرد تیرهای بتن مسلح دارای هسته توخالی تحت بار پیچشی به روش اجزاء محدود

بابک علی نژاد^{۱*}، سعید محمدی^۲

* ۱- استادیار رشته مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۱ مرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ شهریور ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۹ شهریور ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۹ شهریور ۱۴۰۳

چکیده:

پیچش در اجزای سازه‌ای بخصوص با مقاطع غیردایروی به دلیل ایجاد اعوجاج می‌تواند به عنوان یک بار بحرانی جهت ایجاد خرابی‌های اندک یا گسترده به حساب آید. امروزه صرفه‌جویی در مصالح مصرفی جزو اولویتهای اول مهندسی به حساب می‌آید و تیرها به عنوان یکی از اجزای اصلی و پرتکرار در سیستم باربری سازه‌ها می‌توانند نقش مهمی در پایداری سازه و در عین حال قیمت تمام شده سازه ایفا نمایند. در این راستا استفاده از تیرهای دارای هسته توخالی می‌تواند ما را به این مقصود نایل سازد. گاهی می‌توان جهت حفظ پایداری یا مقاومت جز سازه‌ای با داشتن هسته توخالی از الیاف تقویت‌کننده استفاده کرد. الیاف FRP به عنوان مصالح جدید رشد یافته به‌طور برجسته‌ای با نسبت مقاومت به وزن بالا و دوام در محیط‌های خوردگی قابل توصیف هستند، که کاربرد آنها را به خصوص در سازه‌های فضایی و صنایع دریایی قابل توجه کرده است. در این پژوهش بعد از صحت‌سنجی نمونه آزمایشگاهی و اطمینان از نتایج بدست آمده، به مدل‌سازی ۷ نمونه تیر بتنی با سوراخ دایره‌ای و مربعی با ورق CFRP تحت اثر نیروی پیچشی در حالات مختلف پرداخته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که نمونه‌هایی که در آنها از ورق‌های CFRP جهت بهبود عملکرد تیر بتنی استفاده گردیده، عملکرد یکسانی در ناحیه الاستیک داشته که با ادامه بارگذاری و تغییر شیب منحنی و وارد شدن نمونه‌ها به ناحیه پلاستیک شاهد افزایش اختلاف در بین نمونه‌ها بوده‌ایم. همچنین مقادیر تنش و کرنش پلاستیک در محل‌هایی که از ورق CFRP استفاده شده است از مقدار و شدت کمتری برخوردار بوده و همچنین در طول کمتری گسترش یافته است. به‌طوریکه در نمونه با ورق‌های CFRP در ابتدا و انتهای تیر مقدار تنش و کرنش توزیع شده در طول بیشتری ایجاد شده است. از نتایج قابل توجه این مطالعه اینکه ظرفیت تیر با هسته توخالی مربعی نسبت به دایروی با مساحت مقطع یکسان ۱۵٫۷۱ درصد و نیز ظرفیت تیر با چهار دایره توخالی در مقطع نسبت به یک دایره در مساحتی برابر معادل ۱۲٫۱۵ درصد افزایش ظرفیت پیچشی از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:

تیر بتن آرمه، پیچش، ورق CFRP، ناحیه الاستیک، ظرفیت باربری، کرنش پلاستیک، روش اجزاء محدود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: alinejad@maragheh.ac.ir

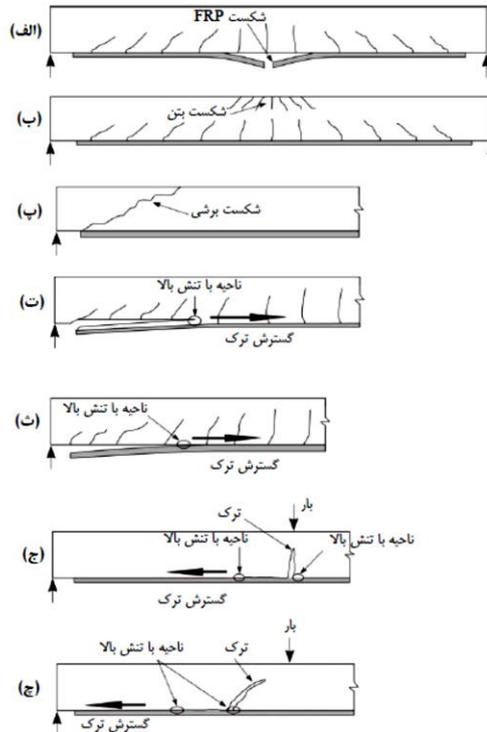
۱- مقدمه

ورق‌های FRP را می‌توان برای ترمیم یا تقویت و بهسازی انواع سازه‌های بتنی (با نصب بر روی سطح) مانند دالها و تیرها، ستون‌ها، دیوارهای حمال، شناژها و فونداسیون هم در ساختمانهای مسکونی و هم در ساختمان‌های اداری و تجاری و ساختمان‌های صنعتی، تکیه‌گاه‌های ماشین‌آلات و تاسیسات سنگین و همچنین در سازه‌های آبی از قبیل سد، کانال و مانند اینها، پل‌های جاده‌ای ریلی، مخازن و منابع آب و مایعات، سیلواها و برج‌های خنک‌کننده به کار برد. به عبارت دیگر FRP به یک ماده مرکب و کامپوزیتی اطلاق می‌شود که از یک ماتریس و یک ماده تقویت‌کننده بصورت الیاف تشکیل شده است. ماتریس خود نیز ترکیبی از یک رزین (پلی‌استر، اپوکسی، ...) و مواد افزودنی مناسبی است که برای کاهش قیمت ماتریس و بهبود بخشیدن به ویژگی رزین از آنها استفاده می‌شود. در کامپوزیت‌ها ماده تقویت‌کننده باعث افزایش کیفیت مکانیکی می‌گردد، در حالیکه ماتریس نقش انتقال بار خارجی به الیاف و محافظت آنها را در مقابل تهاجم محیط خارجی دارد. الیاف در کامپوزیت‌ها حجم قابل توجهی را بخود اختصاص داده و وظیفه اصلی تحمل بار بر عهده آنها می‌باشد. نوع الیاف، مقدار مناسب آنها جهت مصرف و نحوه قرارگیری آنها می‌تواند بر مقاومت کششی، فشاری، خمشی، خستگی، ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته و مهم‌تر از همه، قیمت، تاثیرگذار باشد که هر یک از فاکتورهای ذکر شده می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای جهت رد یا قبول انواع الیاف مختلف باشد. خواص مکانیکی الیاف، آرایش الیاف (جهت بافته شدن الیاف دوجته) و چسب مورد استفاده فاکتورهای اصلی در کارایی فیزیکی کامپوزیت‌های FRP هستند. استفاده از کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری در بهسازی و تقویت سازه‌های بتن‌آرمه طی سالیان اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است که دلیل اصلی آن نیاز به افزایش عمر بهره‌برداری، تغییر و ارتقای آیین‌نامه‌های طراحی، تغییر کاربری ساختمان‌ها و ارتقای اساسی زیرساخت‌ها در تمامی نقاط دنیا می‌باشد. امروزه تعداد قابل توجهی از مقالات علمی در نشریات و کنفرانس‌های معتبر مربوط به بحث کاربرد این مصالح در مقاوم‌سازی انواع سازه‌ها اختصاص دارد. این رشد فزاینده بیانگر رویکرد و اهمیت این فناوری نو می‌باشد. به دنبال گسترش نیاز و توجه به تقویت با استفاده از مصالح کامپوزیت و به منظور کاربردی نمودن دانش فنی، روش‌های طراحی نیز تدوین گردیده‌اند تا در حرفه مهندسی مورد استفاده قرار گیرند. تبیین روش‌های تحلیل و در نظر گرفتن ضرایب ایمنی در طراحی با ملاحظات اقتصادی منجر به تدوین دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های محاسباتی و اجرایی شدند که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه‌های ISIS کانادا، FIB اروپا و سایر استانداردهای مهم جهانی اشاره کرد (Habibullah, 1389).

۱-۱- استفاده از FRP در محدوده‌های بحرانی

با کاهش مقاومت و بروز ترک و خرابی در تیر بتن مسلح استفاده از روشی مناسب جهت ترمیم و مقاوم‌سازی بسیار ضروری است. در این میان استفاده از روشی که بهترین عملکرد را در مواردی همچون افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیر بتن مسلح، مقرون به صرفه بودن، سرعت اجرا، دوام و سایر پارامترهای موثر را داشته باشد، در میان سایر روش‌های مقاوم‌سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. برای بهسازی و تقویت تیرهای بتن مسلح، ورق‌های FRP به دلیل مقاومت بالا، انعطاف‌پذیری خوب در شرایط اجرایی مختلف و عدم ایجاد تغییر فیزیکی زیاد در شکل و ابعاد عضو، گزینه بسیار مناسبی جهت استفاده در ترمیم و تقویت تیرهای بتن مسلح به‌شمار می‌رود. در تیرهای بتن مسلح اتصال ورق FRP به ناحیه کششی بتن بطوریکه راستای الیاف آن در جهت طولی یک عضو خمشی باشد، باعث افزایش مقاومت خمشی عضو می‌شود. به‌طور کلی موده‌های گسیختگی عضو بتن مسلح تقویت شده در خمش با تقویت‌کننده‌های FRP چسبیده از خارج عضو، می‌تواند به حالت‌های ارائه شده در شکل ۱ تقسیم شود. استفاده از ورق‌های FRP به عنوان رکابی‌های خارجی، به منظور افزایش مقاومت برشی مقاطع بتن‌آرمه می‌باشد. در این روش صفحات FRP به وجوه جانبی تیر چسبانده می‌شود بطوریکه راستای الیاف عمود بر محور طولی تیر یا مایل باشد. برای

داشتن رکابی خارجی U شکل، ورق‌های FRP بصورت ممتد روی دو وجه جانبی و زیر تیر نصب می‌شود که این امر سبب بهبود مهارت تقویت خمشی FRP نیز می‌گردد. برای افزایش کارایی تقویت‌های برشی، تامین مهار انتهایی لازم است. به‌طور مثال در حالتی که طول مهار محدود باشد، با تعبیه نوارهای طولی اضافی به انتهای رکابی‌های U شکل مهار انتهایی تامین شده است. به‌منظور پرهیز از گسیختگی رکابی‌های FRP در اثر تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع تیر، این گوشه‌ها باید به شعاع حداقل ۳۵ میلی‌متر گرد شوند (Sharbatdar, 2012).

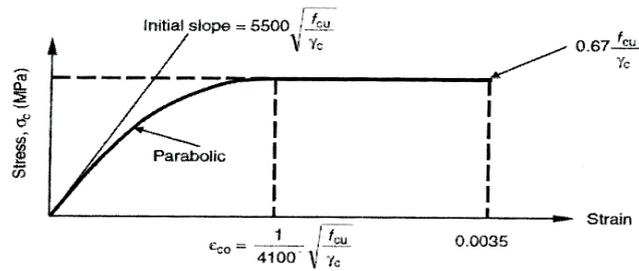


شکل ۱- مودهای گسیختگی تیر بتن آرمه تقویت شده با ورق FRP (Sharbatdar, 2012)

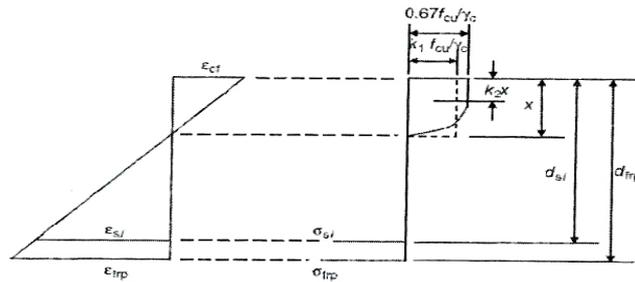
الف) گسیختگی FRP؛ ب) خرد شدن بتن فشاری؛ پ) گسیختگی برشی؛ ت) ورقه شدن پوشش بتن؛
ث) جدایش در فصل مشترک FRP و بتن در انتها؛ ج) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک خمشی
چ) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک برشی

۲-۱- معادلات طراحی

بعد از BS 8110 (BSI, 1997)، کرنش نهایی در دورترین نقطه تار فشاری بتن برابر 0.0035 در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش بتن که توسط BS پذیرفته شده و با دقت بیشتری توسط کنگ و ایوان (۱۹۸۷) تعریف شده است و در شکل ۲ ارائه شده است. از آنجا که رفتار تسلیح CFRP به صورت ترد است، هنگامی که تسلیح CFRP به واسطه پارگی می‌شکند ممکن است بتن به این کرنش فشاری نهایی نرسد. بنابراین بلوک ساده شده تنش مستطیلی از آیین‌نامه (BS 8110, 1997)، برای بتن فشاری دیگر معتبر نیست. کرنش‌ها و تنش‌ها در روی عمق یک تیر ورقه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی تنش- کرنش بتن برای کاربرد طراحی (Sharbatdar, 2012)



شکل ۳- تنش‌ها و کرنش‌ها در عمق تیر (Sharbatdar, 2012)

۱-۳- مواد و روش‌ها

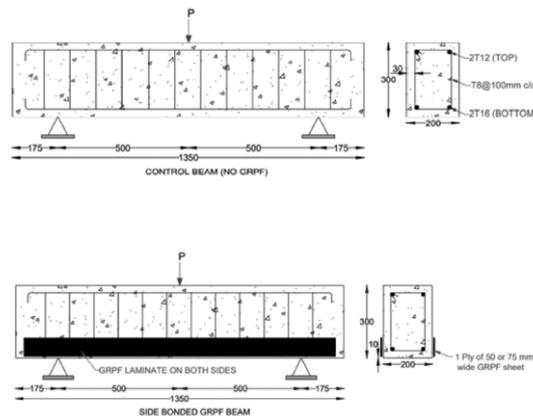
وجود فضای خالی در مقاطع اجزای سازه‌ای در صورت کفایت مقاومت و پایداری جز مورد نظر از این لحاظ که در استفاده از مصالح صرفه‌جویی انجام می‌شود می‌تواند مطلوب باشد. تیرها به عنوان یک جز سازه‌ای خمشی نقش مهمی در تحمل بارها و انتقال آنها به ستونها و فونداسیون سازه دارند. از این جهت لحاظ مقاطع با فضای خالی در مقطع که می‌تواند دایروی و مربعی باشد مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل به روش اجزای محدود که تقریب به دقت است توسط نرم‌افزار Abaqus در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. بعد از صحت‌سنجی نرم‌افزار با نمونه آزمایشگاهی که از ادبیات موضوعی انتخاب شده است ۷ نمونه مدل تیر بتن آرمه با مقاطع توخالی دایروی و مربعی البته با مساحت مقطع یکسان با وجود و عدم وجود نوارهای CFRP مدلسازی و بارگذاری شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. نوارها در ابتدا و وسط و انتهای تیرها بسته به نوع مدل توزیع شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. بارگذاری سازه تیر بصورت بارگذاری پیچشی می‌باشد. علت انتخاب بارگذاری پیچشی بحرانی بودن این نوع بارگذاری در اجزای سازه‌ای با مقاطع غیردایروی است. نتایج حاصله بصورت مقایسه‌ای بین مدل‌های بررسی شده در قالب نمودار مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- تاریخچه تحقیقات گذشته

مقصودی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی در زمینه‌ی شکل‌پذیری تیرهای سراسری پس‌تنیده مقاوم‌سازی شده با FRP پرداخته‌اند. در این تحقیق دو عدد تیر بتنی با سطح مقطع، طول و میزان میلگرد کششی، فشاری و برشی یکسان ساخته

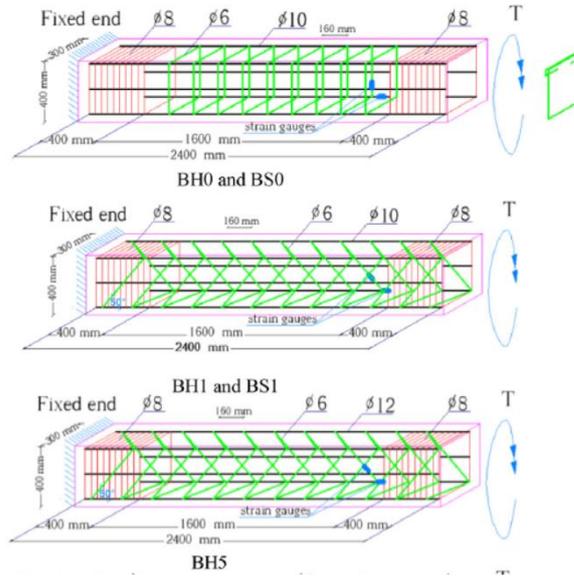
شده و تحت آزمایش بارگذاری تا مرحله تخریب قرار می‌گیرد. یکی از تیرها بعنوان نمونه شاهد و تیر دیگر با لمینیت FRP مقاوم‌سازی شده است. جهت بررسی دقیق‌تر رفتار تیرها، تعداد قابل توجهی کرنش‌سنج بر سطح میلگردهای کششی، فشاری، برشی و تاندون‌های پس‌تنیده، بتن و لمینیت FRP نصب و دو نوع شکل‌پذیری بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و مقادیر با روابط تئوریک مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب ورق‌های FRP و شکل‌پذیری مقطع به علت وجود مهارهای انتهایی لمینیت‌ها بوده است (Maqsoodi et al., 2012). داودی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تغییرات میرایی در تیر بتن مسلح تقویت‌شده با ورق FRP پرداخته‌اند. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش فرکانس طبیعی در کلیه تیرها بعد از بارگذاری و ایجاد ترک‌خوردگی بوقوع پیوسته است، که دلیل آن را می‌توان در کاهش سختی تیر دانست. این کاهش در کلیه گام‌های بارگذاری تا قبل از تقویت ادامه داشته است. بعد از تقویت تیرها با الیاف FRP به دلیل افزایش سختی تیرها فرکانس طبیعی آنها نیز افزایش یافت. محصورسازی اجزا بتن مسلح با پوشش پیرامونی FRP باعث بهبود رفتار تنش-کرنش بتن و افزایش مقاومت، سختی و کرنش نهایی آن می‌گردد که در نهایت باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه خواهد شد. در میان چندین تکنیک بروز و در دسترس، بهره‌برداری از ورق‌های FRP که بتواند به صورت خارجی به اجزای سازه‌های موجود متصل شود، موجبات توجهات بسیاری از محققان هم در زمینه‌ی آزمایشگاهی و هم تحقیقاتی را فراهم آورده است. همچنین پژوهشگران بسیاری به بررسی طول مورد نیاز ورق‌های FRP برای تقویت تیر بتنی در برابر نیروهای اعمالی پرداختند (Davodi et al., 2012). در سال ۱۹۹۵ ماهری، تحقیقی بر روی سه گروه نوار FRP در دو حالت دوزنقه‌ای یکی به صورت پله‌ای و دیگری به صورت ماشین‌شده و حالت سوم نوار FRP کاملاً یکنواخت تحت آزمایش کشش انجام داد و ثابت کرد نوارهای دوزنقه‌ای مقاومت بالاتری نسبت به حالت یکنواخت دارند (Maheri, 1995). در سال ۲۰۰۶ در هنگ‌کنگ کریستوفر و همکاران در آزمایشی، تیر بتنی مسلح به ابعاد ۳/۶ متر در طول و با مقطعی با ابعاد ۱۵۰*۴۰۰ میلی‌متر انتخاب کرده و برای تقویت این تیر از الیاف کربنی به ضخامت ۰/۴۴ میلی‌متر که مدول الاستیسیته آن برابر ۲۳۵ گیگاپاسکال و مقاومت کششی آن برابر ۴/۲ گیگاپاسکال بود، استفاده نمودند. بعد از چسباندن ورق FRP در زیر تیر، بارگذاری بر روی تیر انجام گردیده و در باری معادل ۳۴۱ کیلونیوتن تیر به مقاومت نهایی خود رسید و در اثر پدیده تورق گسیخته شد. البته در باری معادل ۲۶۰ کیلونیوتن ترک‌ها در انتهای ورق FRP به صورت آشکار نمایان شده بودند که این بار معادل ۷۵ درصد مقاومت نهایی تیر می‌باشد. بنابراین با تجمع تنش برشی و نرمال در انتهای ورق ترک‌خوردگی در آن قسمت تیر آغاز شده و با افزایش نیروی وارد بر تیر این ترک‌ها ابتدا در طول تیر و درست در زیر قسمت آرماتور کششی تیر ادامه می‌یابد و با رسیدن نیروی وارده بر تیر به اندازه ۷۵ درصد بار نهایی، این ترک‌ها به صورت ترک برشی مسیر خود را ادامه می‌دهند که در نهایت باعث گسیختگی مقطع تیر می‌شوند و وقتی که به بار نهایی تیر نزدیک می‌شویم در سرتاسر تیر پوشش بتن در قسمت زیرین آرماتور کششی جدا شده و باعث انهدام تیر می‌گردد (Christopher et al., 2006). کریشنا و همکاران در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی از طریق یک مدل عددی و آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای مهم تاثیرگذار در عملکرد تیر بتن‌آرمه می‌پردازند. در این تحقیق ۴ نمونه تیر بتن مسلح با استفاده از بتن معمولی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسکال بتن‌ریزی شدند. سطح مقطع تیرها مستطیل شکل در ابعاد ۲۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر و به طول ۱۳۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. تیرهای تقویت شده با آرماتور فولادی متشکل از دو عدد آرماتور به قطر ۱۶ میلی‌متر در ناحیه تنش کششی و ۲ عدد آرماتور به قطر ۱۰ میلی‌متر در ناحیه فشاری بودند. از بین تمامی تیرها، ۳ عدد تیر پیچیده شده با ورق‌های GFRP با استفاده از تکنیک SB، همراه با یک نمونه تیر کنترلی بدون ورق مورد استفاده قرار گرفت. یکی از تیرها با ورق‌های GFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و بقیه با ورق‌های GFRP عرض ۷۵ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر چسبانده

شده‌اند. با استفاده از چسب اپوکسی این ورق‌ها در تمام طول تیر چسبانده شدند. شکل ۴ نمای کلی از تیر بتنی کنترل و تقویت‌شده را نشان می‌دهد. با مقایسه پارامترهای سختی و ظرفیت باربری مشاهده می‌شود که برای نمونه‌هایی که با ورق‌های FRP تقویت شده بودند ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی داشته است. با افزایش اندازه ورق‌های FRP، خاصیت شکل‌پذیری تیر بتنی افزایش یافته است. با کاهش عمق ورق‌های CFRP، ظرفیت باربری تیرها افزایش یافته و عمق و ظرفیت باربری نسبت عکس دارند. با این حال، مقاومت فشاری مشخصه بتن تأثیر اسمی بر ظرفیت باربری تیر دارد. برای مقاومت فشاری متفاوت از ۲۵ مگاپاسکال، ۳۵ مگاپاسکال و ۴۵ مگاپاسکال، افزایش ظرفیت باربری به ترتیب ۴۰/۸۶، ۶۶/۶ و ۶۰/۳ درصد بود (Krishna et al., 2021).



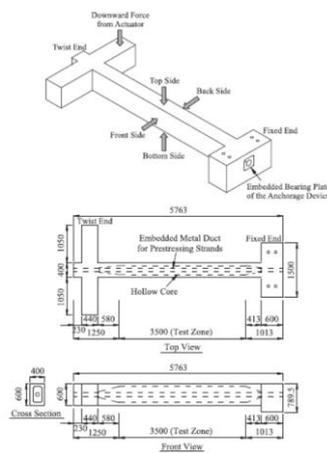
شکل ۴- مقطع و جزئیات هندسی تیرهای بتنی (Krishna et al., 2021)

ابراهیم و همکاران در سال ۲۰۲۰، نقش خاموت‌های مارپیچ مستطیل‌شکل پیوسته، به‌عنوان یک آرماتور عرضی با گام قابل کنترل (P) و زاویه شیب (h) در افزایش عملکرد رفتار پیچشی تیرهای توپر مستطیلی و توخالی به صورت تجربی را مورد بررسی قرار دادند. مارپیچ‌ها برای همه نمونه‌های برنامه آزمایشی این تحقیق شامل آزمایش ده نمونه از تیرهای بتنی با مقاومت معمولی بود که دو تا از آنها توپر با خاموت‌های مستطیل‌شکل بسته و مارپیچ بود. در حالیکه بقیه نمونه‌ها توخالی بودند، سایر نمونه‌ها شامل یک تیر تقویت‌شده توسط خاموت‌های بسته و هفت عدد تیر بتنی تقویت‌شده توسط خاموت‌های مارپیچ مستطیلی با نسبت‌های تقویت‌کننده متفاوت بود. در شکل ۵ مشخصات هندسی نمونه‌های مورد مطالعه و شرایط مرزی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است (Ibrahim et al., 2020).



شکل ۵- مشخصات هندسی نمونه‌های مورد مطالعه (Ibrahim et al., 2020)

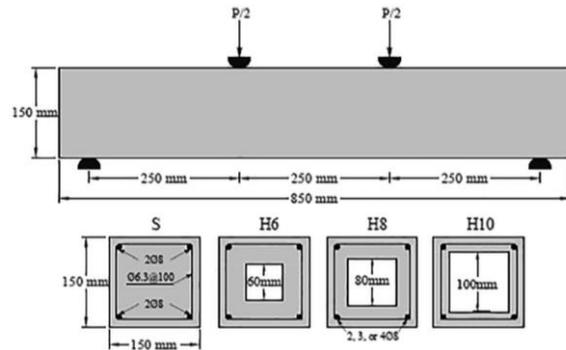
جنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در یک پروژه نوآورانه ۱۰ نمونه تیر بتنی توخالی را تحت پیچش خالص در شرایط آزمایشگاهی مدل‌سازی کردند (Jeng et al., 2019). در شکل ۶ مشخصات هندسی و شرایط مرزی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. این آزمایش همچنین امکان ارزیابی نمونه‌های نسبتاً بزرگ با سطوح پیش‌تندگی متوسط تا بالا و مقاومت بتن بالا را فراهم کرد. نتایج تجربی از ۱۰ نمونه در این مقاله ارائه شده است. مقادیر تجربی گشتاور پیچشی برای ۱۰ نمونه با مقادیر پیچشی که با استفاده از فرمول منطقی اخیراً توسعه‌یافته برای بتن مسلح محاسبه شده است، مقایسه گردیده است. با استفاده از این مقایسه‌ها، یک فرمول پیچشی جدید برای نمونه‌های بتنی توخالی پیشنهاد شده است.



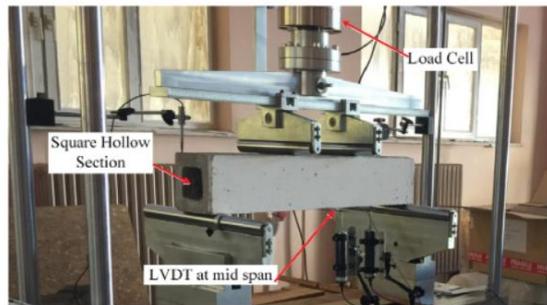
شکل ۶- مشخصات هندسی نمونه‌های مورد مطالعه (Jeng et al., 2019)

۳- صحت‌سنجی نتایج عددی

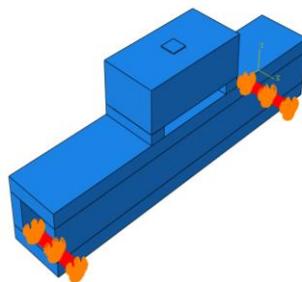
با توجه به اهمیت موضوع نمونه آزمایشگاهی که توسط عباس و همکاران در سال ۲۰۲۰ به انجام رسیده است، برای راستی‌آزمایی آزمایش انتخاب گردیده است (Abbas et al., 2020). در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مشخصات تیر بتنی و شرایط مرزی نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است. در شکل ۹ تنظیمات و محل اعمال تکیه‌گاه گیردار نشان داده شده است. در آزمایشگاه به وسیله‌ی جک هیدرولیکی به بالای تیر بتنی نیرو اعمال شده است. برای این کار در نرم‌افزار با استفاده از روش کنترل تغییرمکان، جابجایی به بالای تیر در راستای محور ۲ اعمال شده است. در شکل ۱۰ نحوه بارگذاری نمونه عددی نشان داده شده است.



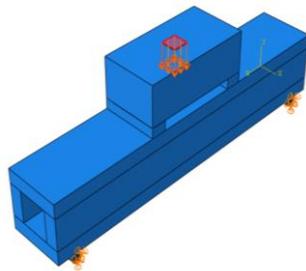
شکل ۷- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی (Abbas et al., 2020)



شکل ۸- نحوه اعمال بار و شرایط مرزی تیر بتنی در شرایط آزمایشگاهی (Abbas et al., 2020)

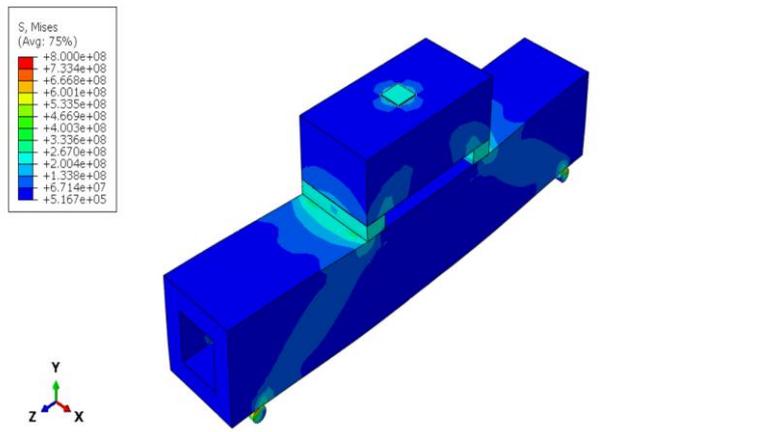


شکل ۹- اختصاص تکیه‌گاه به تیر بتنی نمونه عددی

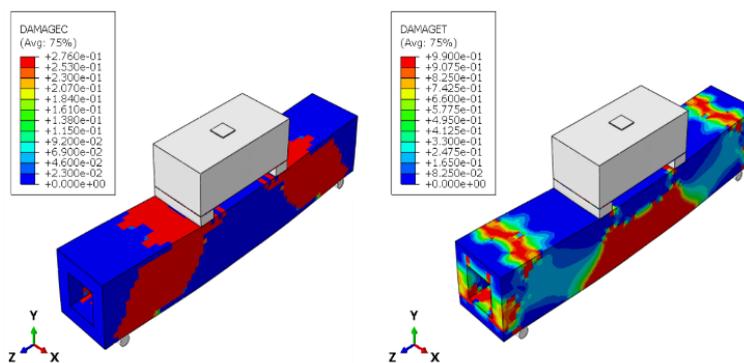


شکل ۱۰- محل اعمال جابجایی به قسمت فوقانی تیر بتنی

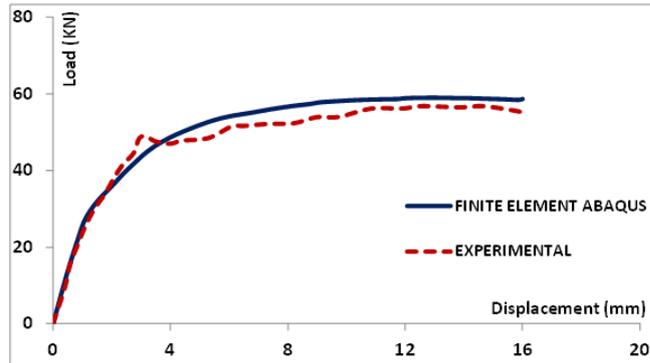
در ادامه بعد از انجام تنظیمات مورد نیاز تا این مرحله، تحلیل نمونه عددی به انجام می‌رسد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایی از نمونه در موقعیت‌های مختلف بعد از آنالیز نشان داده شده است. در شکل ۱۳ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل، نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌سازی و روش تحلیلی در نظر گرفته شده بوده و نتیجتاً قابل تعمیم به سایر مشخصات مقطع در مطالعه پارامتری می‌باشد.



شکل ۱۱- تنش‌های ایجاد شده در نمونه عددی



شکل ۱۲- به ترتیب از راست به چپ توزیع خسارت کششی و فشاری در تیر بتنی نمونه عددی



شکل ۱۳- مقایسه منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه عددی و آزمایشگاهی

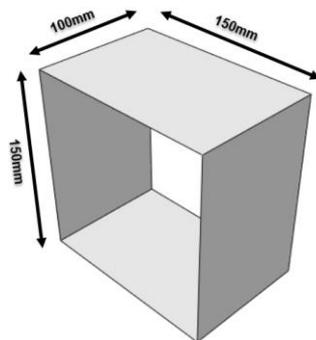
۴- توسعه نمونه‌های عددی

نوآوری اصلی این تحقیق مقایسه عملکرد تیرهای بتن‌آرمه دارای سوراخ‌های دایروی و مربعی شکل با لحاظ مساحت مقطع یکسان تحت اثر بارگذاری پیچشی با وجود و عدم وجود CFRP می‌باشد. مقایسه نمونه‌ها از نظر تعداد سوراخ‌های بیشتر با ابعاد کوچکتر یا سوراخ کمتر با ابعاد بزرگتر و نیز سوراخ دارای اشکال دایروی و مربعی می‌تواند نتایج راهبردی و عملی در استفاده از این اجزای سازه‌ای را به همراه داشته باشد. این تحقیق شامل ۷ نمونه تیر بتنی با سوراخ دایره‌ای و مربعی بوده و با ورق CFRP در حالات مختلف تقویت گردیده است. بارگذاری از نوع پیچشی در دو انتهای تیر در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌های عددی نشان داده شده است. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین ورق‌های CFRP و تیر بتنی از تماس سطح به سطح در محیط اندرکنشی نرم‌افزار استفاده شده است. در شکل ۱۳ مشخصات هندسی ورق CFRP نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های عددی مورد مطالعه

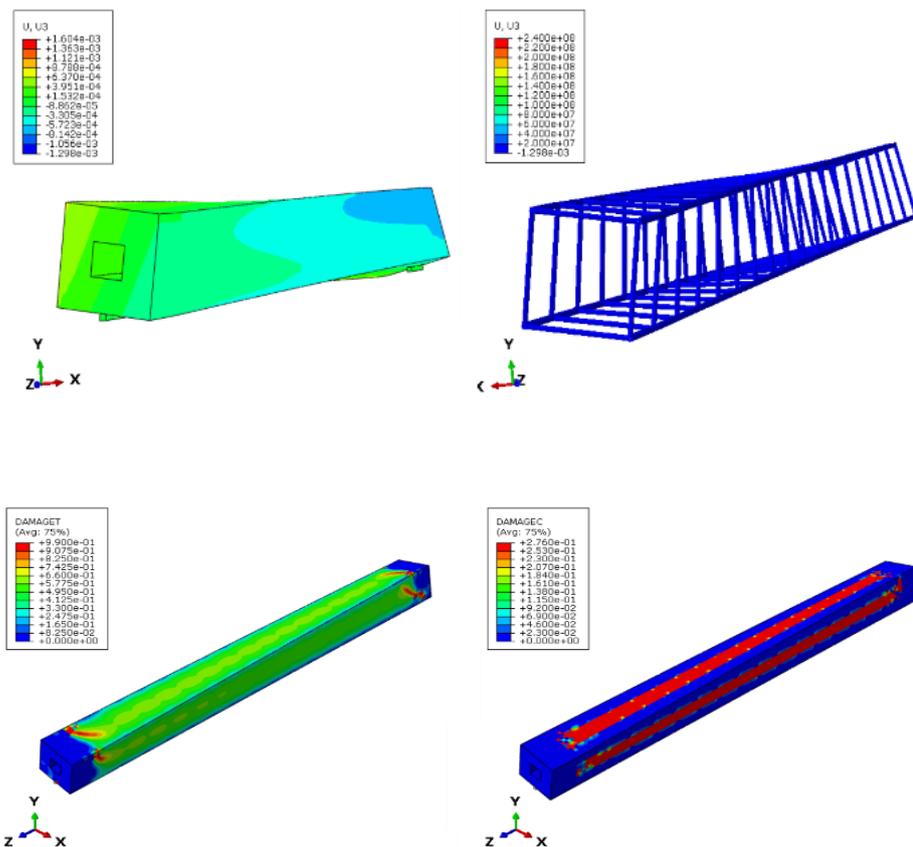
شماره نمونه	طول تیر	عرض تیر	ارتفاع تیر	شکل سوراخ	اندازه سوراخ	تعداد سوراخ	ورق CFRP	تعداد ورق CFRP	موقعیت قرارگیری ورق CFRP
m1	1850	150	150	مربع	50	1	ندارد	-----	-----
m2	1850	150	150	دایره	57	1	ندارد	-----	-----
m3	1850	150	150	دایره	28.5	4	ندارد	-----	-----
m4	1850	150	150	مربع	50	1	دارد	8	ابتدا و انتهای تیر
m5	1850	150	150	مربع	50	1	دارد	8	وسط تیر
m6	1850	150	150	مربع	50	1	دارد	7	سرتاسری
m7	1850	150	150	مربع	50	1	دارد	7	ابتدا-انتها-وسط

اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



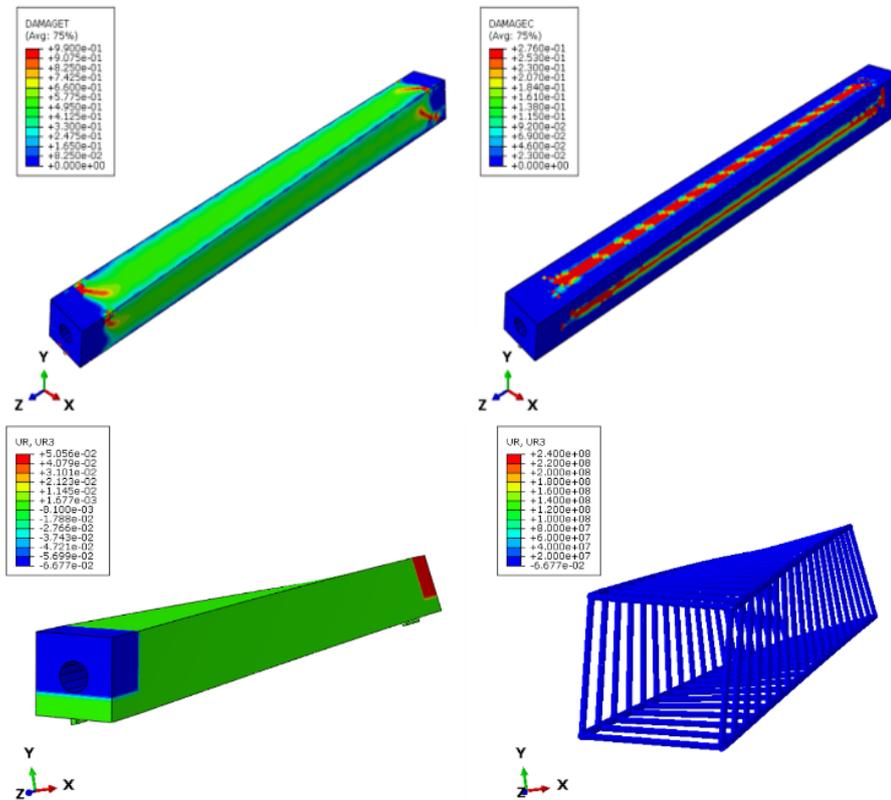
شکل ۱۴- مشخصات هندسی ورق CFRP به ضخامت ۰/۳۸۱ میلی‌متر

در شکل ۱۵ خسارت‌های کششی و فشاری ناشی از بار پیچشی، همچنین تنش و کرنش‌های نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع خسارت فشاری به صورت یکنواخت و در جداره‌های تیر بتنی ایجاد شده است.



شکل ۱۵- کانتور تنش‌های ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و خسارت‌های کششی و فشاری در تیر بتنی شماره ۱

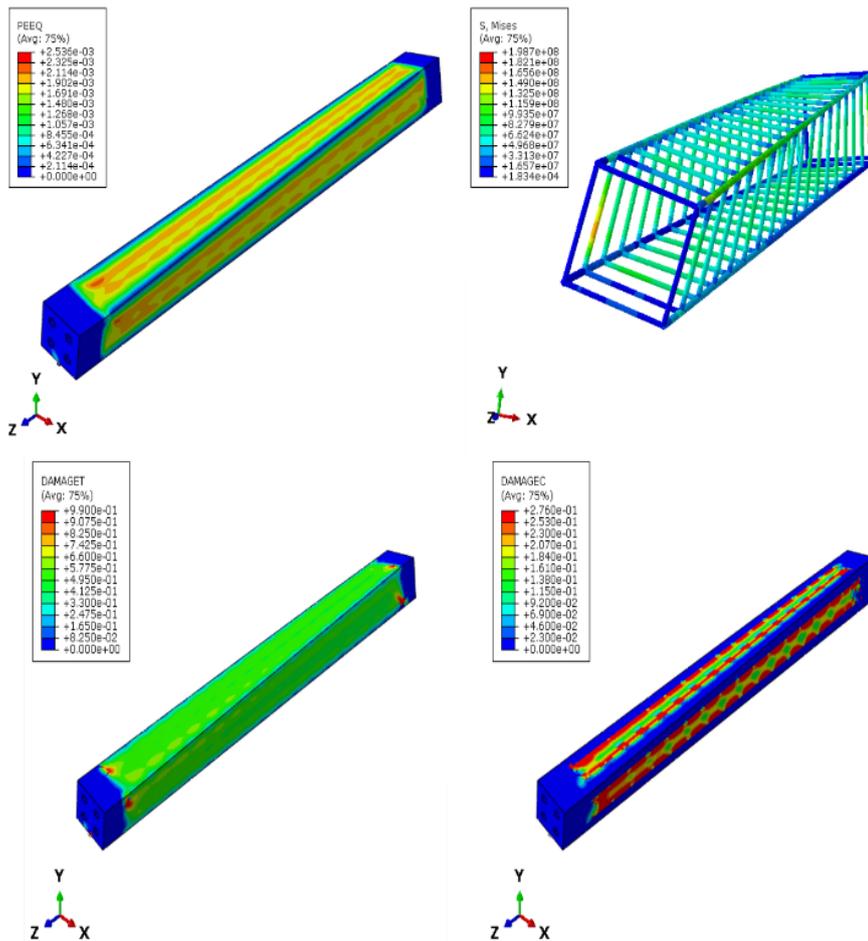
در ادامه به بررسی تیر بتنی نمونه شماره ۲ با سوراخ دایره‌ای به اندازه ۵۷ میلی‌متر و بدون ورق CFRP پرداخته شده است. خصوصیات مصالح نیز همانند نمونه صحت‌سنجی شده بوده و از نظر بارگذاری نیز تیر در دو انتها تحت بار پیچشی قرار گرفته است. در شکل ۱۶ خسارت‌های کششی و فشاری ناشی از بار پیچشی، همچنین تنش و کرنش المان‌های نمونه شماره ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع خسارت فشاری به صورت یکنواخت و در جداره‌های تیر بتنی و تقریباً با شدت کمتری ایجاد شده است. با بررسی آرماتورهای طولی و عرضی نیز مشاهده می‌شود که در برخی از آرماتورهای عرضی نزدیک به تکیه‌گاه‌ها مقدار تنش تسلیم از حد تسلیم (۲۴۰ مگاپاسکال) فراتر رفته است.



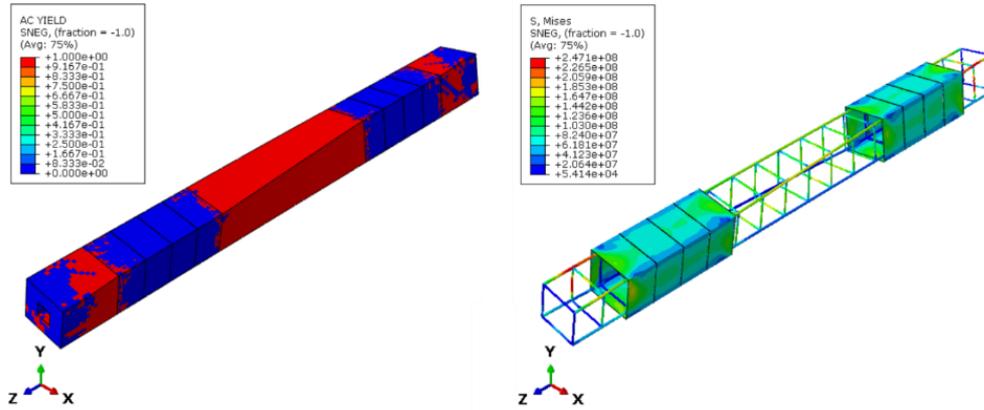
شکل ۱۶- کانتور تنش‌های ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و توزیع خسارت‌های کششی و فشاری در تیر بتنی شماره ۲

در ادامه به بررسی نمونه تیر بتنی با ۴ عدد سوراخ دایره‌ای در اندازه ۱۴/۵ میلی‌متر و بدون ورق CFRP پرداخته شده است. خصوصیات مصالح نیز همانند نمونه صحت‌سنجی شده بوده و از نظر بارگذاری نیز تیر در دو انتها تحت بار پیچشی قرار گرفته است. در شکل ۱۷ خسارت‌های کششی و فشاری ناشی از بار پیچشی، همچنین تنش و کرنش المان‌های نمونه شماره ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع خسارت فشاری به صورت یکنواخت و در جداره‌های تیر بتنی ایجاد شده است. همچنین در برخی از آرماتورهای نزدیک به تکیه‌گاه نیز تسلیم‌شدگی ایجاد شده و کرنش پلاستیک نیز در سطح گسترده‌تری

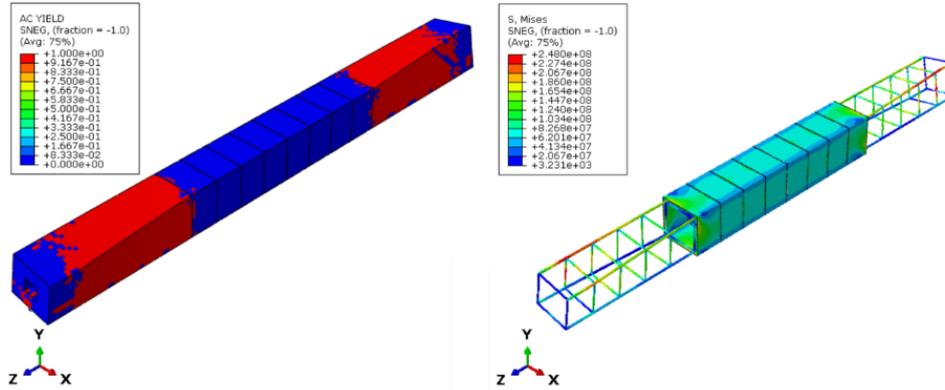
از وجوه تیر گسترش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع خسارت فشاری به صورت یکنواخت و در جداره‌های تیر بتنی و تقریباً با شدت کمتری ایجاد شده است. با بررسی آرماتورهای طولی و عرضی نیز مشاهده می‌شود که در برخی از آرماتورهای عرضی نزدیک به تکیه‌گاه‌ها مقدار تنش تسلیم از حد تسلیم (۲۴۰ مگاپاسکال) فراتر رفته است. در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ تنش‌های ایجاد شده در سایر نمونه‌ها نشان داده شده است.



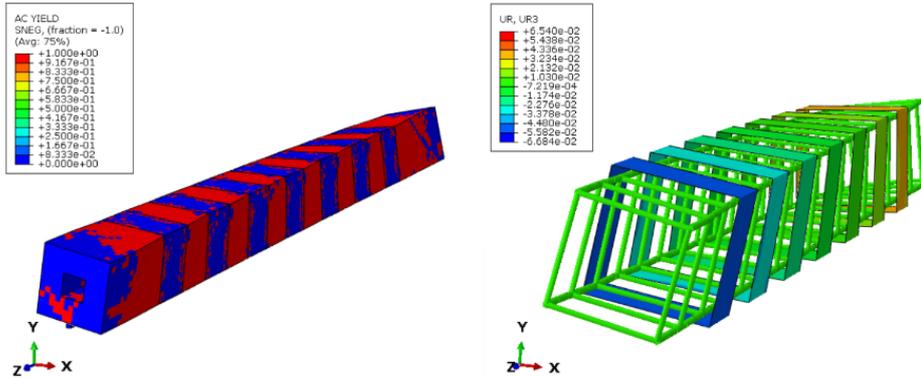
شکل ۱۷- کانتور تنش‌های ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و توزیع خسارت‌های کششی و فشاری در تیر بتنی شماره ۳



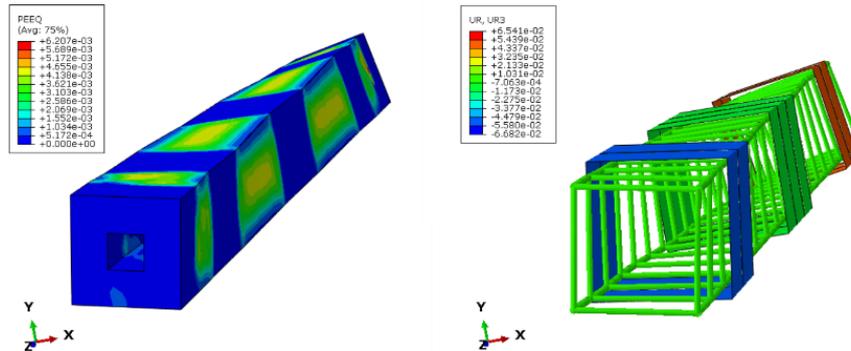
شکل ۱۸- تنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و نمایی از تسلیم‌شدگی تیر بتنی نمونه شماره ۴



شکل ۱۹- تنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و نمایی از تسلیم‌شدگی تیر بتنی نمونه شماره ۵

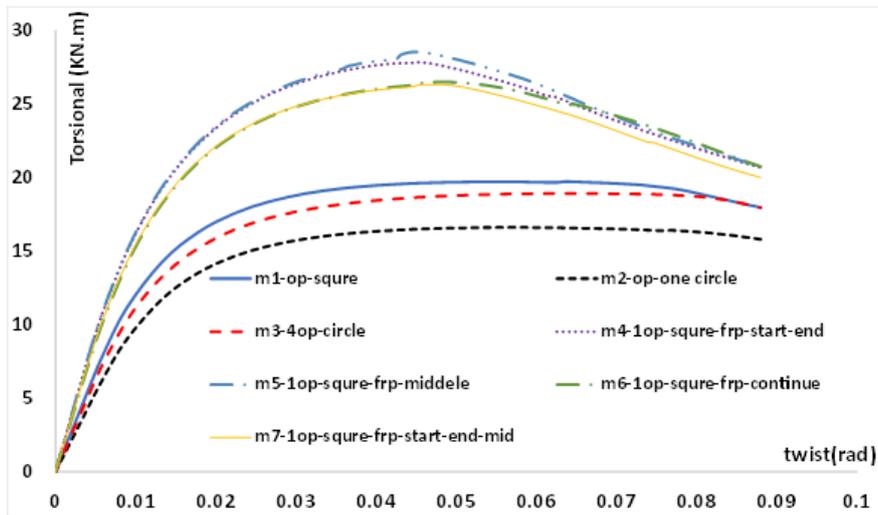


شکل ۲۰- تنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و نمایی از تسلیم‌شدگی تیر بتنی نمونه شماره ۶

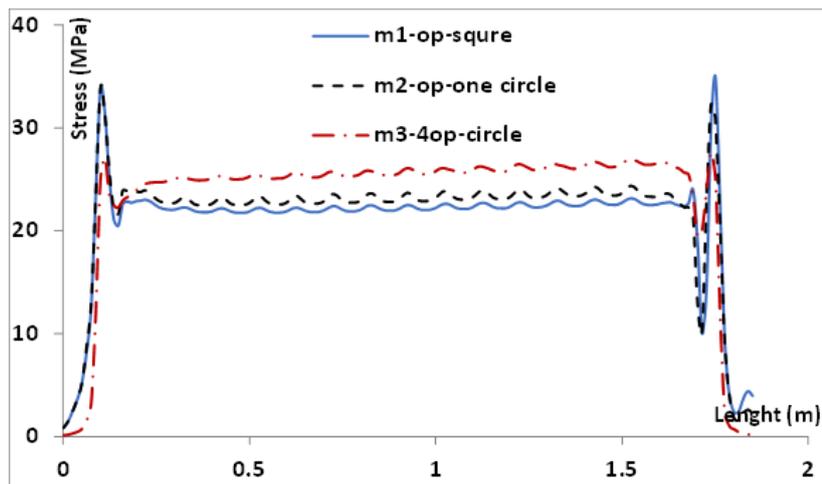


شکل ۲۱- تنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی و نمایی از تسلیم‌شدگی تیر بتنی نمونه شماره ۷

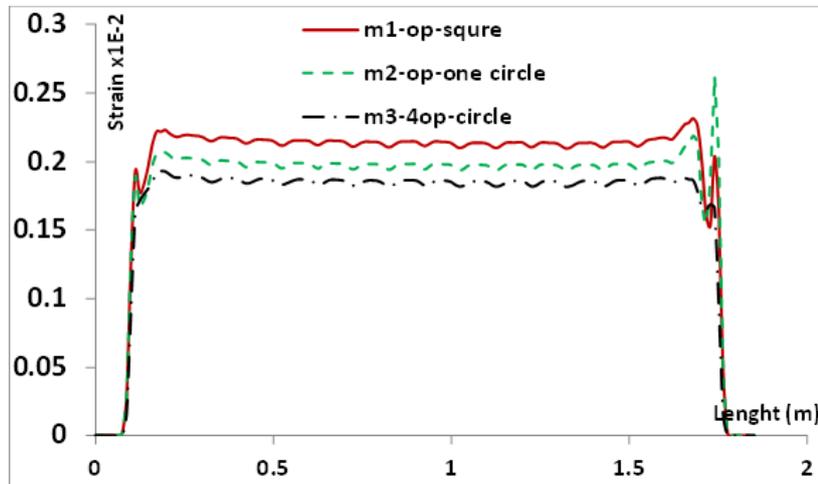
در شکل ۲۲ به مقایسه منحنی نیرو-دوران نمونه‌های عددی پرداخته شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود در نمونه‌هایی که از ورق CFRP استفاده شده است ظرفیت لنگر پیچشی افزایش قابل توجهی یافته است و از نقطه ماکزیمم به بعد با شیب تندتری از شدت لنگر کاسته شده است. این در حالی است که در نمونه‌های بدون ورق بعد از ناحیه الاستیک با تغییر جهت شیب منحنی مقدار لنگر در طول بیشتری از تیر با شدت ثابتی ادامه یافته و در انتها نیز از شدت افت کمتری برخوردار بوده است. از نظر عددی در نمونه با سوراخ مربعی نسبت به نمونه با سوراخ دایره‌ای با یک سوراخ به قطر ۵۸ میلیمتر مقدار ظرفیت پیچشی ۱۵،۷۱ درصد افزایش یافته و این در حالی است که با معادل‌سازی مساحت سوراخ‌ها و افزایش تعداد آنها از ۱ به ۴ سوراخ، ظرفیت پیچشی نسبت به نمونه با یک سوراخ دایره‌ای به مقدار ۱۲،۱۵ درصد افزایش یافته است. در نهایت به طور کلی می‌توان گفت که نمونه با سوراخ مربعی و استفاده از تعداد بیشتر سوراخ معادل‌سازی شده نسبت به نمونه با یک سوراخ، تاثیرگذاری بیشتری در افزایش ظرفیت پیچشی تیر بتنی با سوراخ دایره‌ای داشته است. در ادامه در نمونه‌هایی که از ورق‌های CFRP جهت بهبود عملکرد تیر بتنی استفاده شده است مشاهده می‌شود که اغلب نمونه‌ها عملکرد یکسانی در ناحیه الاستیک داشته که با ادامه بارگذاری و تغییر شیب منحنی و وارد شدن نمونه‌ها به ناحیه پلاستیک شاهد افزایش اختلاف در بین نمونه‌ها بوده، به طوری که از نظر عددی نمونه با ورق CFRP در ابتدا و انتهای تیر و نمونه با ورق CFRP در وسط تیر دارای عملکرد یکسانی هستند. در آنها به طور متوسط بیشترین مقدار لنگر پیچشی ۲۸ کیلونیوتن بوده است. با مقایسه عملکرد نمونه‌ها مشاهده می‌شود که نمونه با ورق CFRP در ابتدا- انتهای تیر (نمونه ۴) و استفاده از ورق CFRP در وسط تیر (نمونه ۵) نسبت به نمونه‌هایی با موقعیت قرارگیری ورق CFRP در سرتاسر تیر (نمونه ۶) و در سه موقعیت ابتدا-انتها و وسط تیر (نمونه ۷) به طور متوسط ۷/۱۴ درصد ظرفیت پیچشی بیشتری داشته است. در ادامه در شکل‌های ۲۳ تا ۲۶ مشاهده می‌شود که مقادیر تنش و کرنش ایجاد شده در طول تیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر تنش به صورت یکنواخت توزیع شده و تقریباً در فاصله‌ای کمتر از d از بر تکیه‌گاه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است. (منظور از پارامتر d ارتفاع موثر تیر تا سطح فشاری مقطع تیر می‌باشد). همچنین میزان گسترش کرنش پلاستیک در میانه تیر، تقریباً در ۹۰ درصد از طول تیر به بیشترین مقدار خود رسیده است.



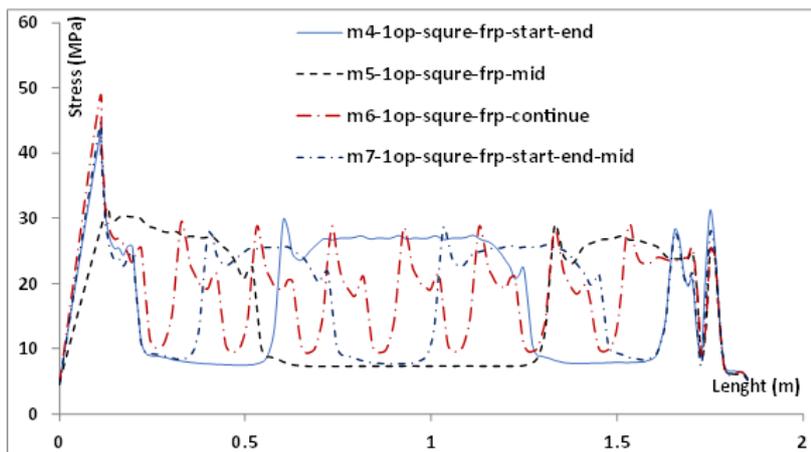
شکل ۲۲- مقایسه منحنی دوران- لنگر نمونه‌های عددی ۱ تا ۷



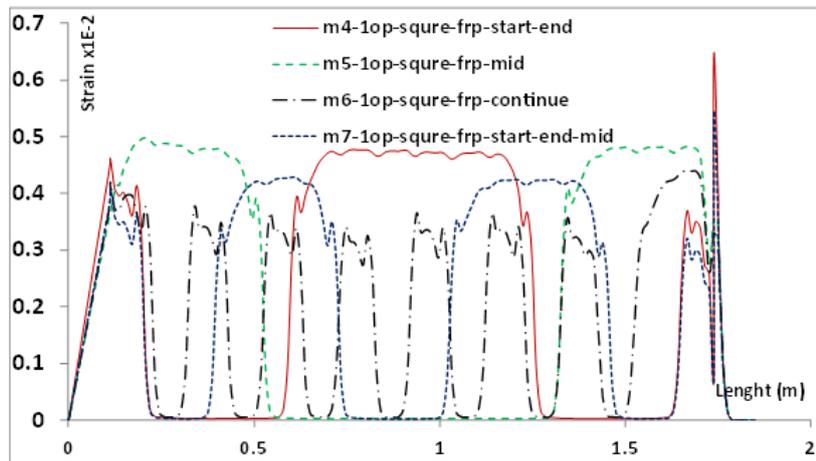
شکل ۲۳- توزیع مقادیر تنش در طول نمونه‌های عددی ۱ تا ۳



شکل ۲۴- توزیع مقادیر کرنش در طول نمونه‌های عددی ۱ تا ۳



شکل ۲۵- توزیع مقادیر تنش در طول نمونه‌های عددی ۴ تا ۷



شکل ۲۶ - توزیع مقادیر کرنش در طول نمونه‌های عددی ۴ تا ۷

در ادامه با بررسی نمونه‌های ۴ تا ۷ همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر تنش و کرنش ایجاد شده در میانه تیر به صورت غیریکنواخت توزیع شده و تقریباً در فاصله‌ای برابر با d از بر تکیه‌گاه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است. (منظور از پارامتر d ارتفاع موثر تیر تا سطح فشاری مقطع تیر می‌باشد). همچنین مقادیر تنش و کرنش پلاستیک در محل‌هایی که از ورق CFRP استفاده شده است از مقدار و شدت کمتری برخوردار بوده و همچنین در طول کمتری گسترش یافته است. به طوری که در نمونه شماره ۴ با ورق‌های CFRP در ابتدا و انتهای تیر مقدار تنش و کرنش توزیع شده در طول بیشتری ایجاد شده است. نتایج انطباق خوبی با انتظارات قبلی از عملکرد تیرها دارد. نظر به عملکرد پیچشی تیر بتن‌آرمه و دور شدن از محل تکیه‌گاهها در وسط تیر و امکان کاملی برای تشکیل تنشهای برشی پیچشی در میانه تیر، استفاده حداکثری از ایلاف در میانه تیر انتظار می‌رود که ظرفیت پیچشی تیر را افزایش بیشتری دهد. از سویی دیگر استفاده از تعداد سوراخ بیشتر به عنوان هسته توخالی در مقطع تیر در قیاس با یک سوراخ نیز انتظار این را می‌برد که ظرفیت پیچشی بیشتری را بدست دهد.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از سوراخ در مقاطع تیرهای سازه‌ای ضمن حفظ عملکرد سازه‌ای میتواند به کاهش مصالح مورد استفاده منجر گردد. در این تحقیق مقایسه عملکرد تیرهای بتن‌آرمه دارای سوراخهای دایروی و مربعی شکل با لحاظ مساحت مقطع یکسان با وجود عدم وجود CFRP تحت اثر بارگذاری پیچشی منظور گردیده است. مقایسه نمونه‌ها از نظر تعداد سوراخهای بیشتر دایروی با ابعاد کوچکتر یا سوراخ کمتر با ابعاد بزرگتر و نیز سوراخ دارای اشکال دایروی و مربعی می‌تواند نتایج راهبردی و عملی در استفاده از این اجزای سازه‌ای را به همراه داشته باشد. در کنار این میزان تغییر عملکرد تیر تحت بار پیچشی با تغییر محل قرارگیری نوارهای CFRP در طول تیر از دیگر مقاصد این تحقیق بشمار می‌رود. نتایج زیر از برآیند تحلیلهای صورت گرفته قابل بیان است.

نمونه با سوراخ مربعی تاثیرگذاری بیشتری در افزایش ظرفیت پیچشی تیر بتنی در مقام قیاس با سوراخ دایره‌ای داشته است. از نظر عددی نمونه با سوراخ مربعی نسبت به نمونه با سوراخ دایره‌ای در حدود ۱۵٫۷۱ درصد ظرفیت باربری پیچشی بیشتری دارد.

در نمونه‌هایی که در آنها از ورق‌های CFRP جهت بهبود عملکرد تیر بتنی استفاده شده است مشاهده می‌شود که اغلب نمونه‌ها عملکرد یکسانی در ناحیه الاستیک داشته که با ادامه بارگذاری و تغییر شیب منحنی و وارد شدن نمونه‌ها به ناحیه پلاستیک شاهد افزایش اختلاف در بین نمونه‌ها هستیم، بطوریکه از نظر عددی نمونه با ورق CFRP در ابتدا و انتهای تیر و نمونه با ورق CFRP در وسط تیر دارای عملکرد یکسانی بوده و در آنها به طور متوسط بیشترین مقدار لنگر پیچشی قابل اعمال ۲۸ کیلونیوتن-متر بوده است که فرق چندانی بلحاظ عددی در دو نمونه مشاهده نمی‌شود. نمونه با ورق CFRP در ابتدا- انتهای تیر (نمونه ۴) و استفاده از ورق CFRP در وسط تیر (نمونه ۵) نسبت به نمونه‌هایی با موقعیت قرارگیری ورق CFRP در سرتاسر تیر (نمونه ۶) و در سه موقعیت ابتدا-انتها و وسط تیر (نمونه ۷) به طور متوسط ۷,۱۴ درصد ظرفیت پیچشی بیشتری داشته است. مقادیر تنش ایجاد شده در میانه تیر به صورت یکنواخت توزیع شده و همانطوریکه انتظار میرفت تقریباً در فاصله‌ای کمتر از d از بر تکیه‌گاه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است. مقادیر تنش و کرنش ایجاد شده در میانه تیر به صورت غیریکنواخت توزیع شده و تقریباً در فاصله‌ای برابر d از بر تکیه‌گاه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است. (منظور از پارامتر d ارتفاع موثر تیر تا سطح فشاری مقطع تیر می‌باشد). همچنین مقادیر تنش و کرنش پلاستیک در محل‌هایی که از ورق CFRP استفاده شده است از مقدار و شدت کمتری برخوردار بوده و همچنین در طول کمتری گسترش یافته است. بطوریکه در نمونه شماره ۴ با ورق‌های CFRP در ابتدا و انتهای تیر مقدار تنش و کرنش توزیع شده در طول بیشتری ایجاد شده است. میزان گسترش کرنش پلاستیک در میانه نمونه‌های مورد مطالعه، تقریباً در ۹۰ درصد از طول تیر به بیشترین مقدار خود رسیده است. از نقطه نظر نوع و تعداد سوراخ در مقطع تیر از برآیند تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان اذعان نمود که استفاده از نمونه‌ها با سوراخ مربعی در مقایسه با استفاده از سوراخ‌های دایره‌ای شکل و تعداد کمتر ظرفیت باربری پیچشی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. هزینه بالای عملیات محاسباتی تحلیل این نمونه‌ها از محدودیتهای عمومی این پژوهش و پژوهش‌های مشابه بشمار می‌رود که مجال مدلسازی و تحلیل تعداد با تنوع بیشتر نمونه‌ها را محدود می‌کند. لذا مناسب است که در کنار این نمونه‌ها مدل‌هایی با تنوع سوراخ در مقطع و به عنوان مثال استفاده از ترکیبی از سوراخ‌های دایروی و مربعی در مقطع، مدلسازی و تحلیل و ارزیابی گردیده و با نتایج سایر نمونه‌ها نتایج تحلیل مقایسه گردد.

- Ahmmad A. Abbass, Sallal R. Abid, Farid H. Arna'ot, Raad A. Al-Ameri, Mustafa Özakça (2020). Flexural response of hollow high strength concrete beams considering different size reductions, *Structures* 23 69–86.
- Aldemir, A., & Aydin, B. B. (2017, June). Effect of double-slotted beams on the frame behavior. In *XVII International Scientific Conference VSU. Sofia, Bulgaria*.
- Alsaeq, H. 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.
- Chalioris, C. E., & Karayannis, C. G. (2013). Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion. *Engineering structures*, 56, 286-297.
- Chyuan-Hwan Jeng, Min Chao, Hui-Chun Chuang, (2019), Torsion experiment and cracking-torque formulae of hollow prestressed concrete beams, *Engineering Structures* 196 (2019) 109325.
- Chin, S. C., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2011). Strengthening of RC beams containing large opening at flexure with CFRP Laminates. *Int. J. Civ. Environ. Eng*, 5, 743-749.
- Christopher K.Y, Leung, Gao Bo, Jang-Kyo Kim, (2006) Optimization of tapered end design for strip bonded to RC beam Composites, *Science and Technology*, Pages 1266–1273.
- Damian I. Kachlakev, "Finite Element Analysis and Model Validation of Shear Deficient Reinforced Concrete Beams Strengthened With GCFRP Laminates", *United States Department of Transportation- Federal Highway Administration*.
- Daryabigi, Seyyed Reza, Hosseini, Hossein, Rezaifar, Omid, (2006), Reinforcement and improvement of concrete structures with CFRP materials, concepts and applications. Persian.
- Dash, N. (2009). *Strengthening of reinforced concrete beams using glass fiber reinforced polymer composites* (Doctoral dissertation).
- Davodi, Mohammad Reza, Mostafaviyan, Amin, Fallahnejad, Hossein, (2012), Laboratory study of damping changes in reinforced concrete beam reinforced with CFRP sheet, 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, May 19-21. Persian.
- El Maaddawy, T., & Sherif, S. (2009). FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings. *Composite Structures*, 89(1), 60-69.
- Elamary, A. S., Sharaky, I. A., & Alqurashi, M. (2021, August). Flexural behaviour of hollow concrete beams under three points loading: Experimental and numerical study. In *Structures* (Vol. 32, pp. 1543-1552). Elsevier.
- Habibullah Akbar, (1389), design of reinforced concrete structures. Second edition. Azar publications
- Ibrahim, A., Askar, H. S., & El-Zoughiby, M. E. (2022). Torsional behavior of solid and hollow concrete beams reinforced with inclined spirals. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(5), 309-321.
- Islam, M. R., Mansur, M. A., & Maalej, M. (2005). Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 413-420.
- Jayajothi, P., Kumutha, R., & Vijai, K. (2013). Finite element analysis of FRP strengthened RC beams using ANSYS.
- Jeng, C. H., Chao, M., & Chuang, H. C. (2019). Torsion experiment and cracking-torque formulae of hollow prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 196, 109325.
- Karayannis, C. G., & Chalioris, C. E. (2013). Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement. *Construction and Building Materials*, 46, 86-97.
- Krishna, M. S., Kumar, G. S., & Thomas, A. C. (2021). Behaviour of reinforced concrete beams bonded with side bonded FRP sheets. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2404-2410.

- M, Mohammadhassani, MohdZaminJumaat, Ashraf Ashour and Mohameed Jameel, "Failure modes and serviceability of high strength self-compacting concrete deep beams", Department of Civil Engineering, University of Malaya, Malaysia, *Department of Civil Engineering, University of Bradford, UK*, 2011.
- Maheri, Mahmoud R, (1995), Recent Advances In Seismic Retrofit of Rc Frames, In *Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing)* Vol. 6, No. 5, Pages 373-391.
- Mansour, W., Ebead, U., Nagib, M. T., & Fayed, S. (2023, June). Behavior of hollow self-compacted concrete beams reinforced with aluminum sections. In *Structures* (Vol. 52, pp. 549-567). Elsevier.
- Maqsoodi, Ali Akbar, Saeed Ghasemi, Rahnama Flavarjani, Ismail, (2012), Deformability of post-tensioned beams reinforced with CFRP, 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, May 19-21. Persian.
- McSwiggan, C., & Fam, A. (2017). Bio-based resins for flexural strengthening of reinforced concrete beams with FRP sheets. *Construction and building materials*, 131, 618-629.
- Mostofi Nejad d. (1385). Reinforced concrete structures (first volume), Arkan publications. Persian.
- Nedjhioui, O., Madi, R., Nedjhioui, M., & Guenfoud, M. (2023, November). Flexural behaviour of hollow reinforced concrete T-beams strengthened or retrofitted with carbon-fibre-reinforced laminates: Experimental and numerical investigation. In *Structures* (Vol. 57, p. 105222). Elsevier.
- Obaidat, Y. T., Heyden, S., Dahlblom, O., Abu-Farsakh, G., & Abdel-Jawad, Y. (2011). Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. *Construction and Building Materials*, 25(2), 591-597.
- Ohkubo, M., & Hamamoto, T. (2004, August). Developing reinforced concrete slotted beam structures to reduce earthquake damage and to enhance seismic structural performance. In *Proceedings of the 13th annual world conference on earthquake engineering, Vancouver*.
- Panahi Darcheh, Mohammad, Arabzadeh, Abolfazl, (2008), Effective parameters on shear strengthening of reinforced concrete deep beams using CFRP sheets, 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz, Shiraz University. Persian.
- Ramana, V. P. V., Kant, T. A. R. U. N., Morton, S. E., Dutta, P. K., Mukherjee, A. B. H. I. J. I. T., & Desai, Y. M. (2000). Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 461-470.
- Sayed, A. M., Wang, X., & Wu, Z. (2013). Modeling of shear capacity of RC beams strengthened with FRP sheets based on FE simulation. *Journal of Composites for Construction*, 17(5), 687-701.
- Sharbatdar, Mohammad Kazem, (2012), Strengthening and improvement of civil infrastructures with CFRP polymer fiber composites, Semnan University Publications. Persian.
- Shatarat, N., Katkhuda, H., & Alqam, M. (2016). Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforcement in shear. *Construction and Building Materials*, 125, 585-594.
- Shatarat, N., Mahmoud, H. M., & Katkhuda, H. (2018). Shear capacity investigation of self compacting concrete beams with rectangular spiral reinforcement. *Construction and Building Materials*, 189, 640-648.
- Yang, J., Haghani, R., Blanksvärd, T., & Lundgren, K. (2021). Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 301, 124076.
- Yang, K. H., Kim, G. H., & Yang, H. S. (2011). Shear behavior of continuous reinforced concrete T-beams using wire rope as internal shear reinforcement. *Construction and Building Materials*, 25(2), 911-918.
- Yin, J., & Wu, Z. S. (2003). Structural performances of short steel-fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets. *Construction and building materials*, 17(6-7), 463-470.
- Zhou, J., Yu, P., Yoo, D. Y., Yu, L., & Ke, L. (2023). Effectiveness of flange plates on torsional behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete hollow beams. *Developments in the Built Environment*, 16, 100227.