

Experimentally and Analytically Investigating Effect of Confinement on Behavior of RC Beams Reinforced by GFRP Rebars

Mahmoud-Reza Hosseini-Tabatabaei^{1*}, Seyed Mostafa Tabatabaei², Seyed Roollah Mousavi³,
HosseinAli Rahdar¹

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

2- Msc, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Zahedan, Zahedan, Iran

3- Associate Professor Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) rebars have high tensile strength and high resistance against corrosion. This study addressed the investigation of the confining effects of the transverse steel rebars on concrete beams reinforced using GFRP rebars. For this purpose, six beam specimens with cross-section dimensions of 20 and 30 cm and a span length of 200 cm were constructed. The rebars had cross-section area values of 1.7, 2.6, and 3.5 times the balance value. The middle of the three beams was reinforced using stirrups with small spacing. These specimens were called confined beams. The specimens were tested under four-point static loading. The behavior of the unconfined and confined specimens was evaluated using the parameters of the initial yield strength, the stiffness of the cracking part, the ultimate load, and the ductility index. The experimental results indicate that confining the beams by steel stirrups increased the first three behavioral parameters to about 35, 27, and 29 percent, respectively. The ductility index for the two samples, having the longitudinal rebars of 2.6 and 3.5 times the balanced amount, decreased by about 6 and 22 percent. The other sample's ductility index increased approximately 6 percent compared to the control samples. Moreover, the capacities of both unconfined and confined specimens are estimated by existing analytical relationships with an error of 5 to 16 percent, having good agreements with the experimental results.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.254770.2283

*Corresponding author: Mahmoud-Reza Hosseini-Tabatabaei.

Email address: mr.htabatabaei@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 November 2020

Revise Date: 26 September 2021

Accept Date: 14 November 2021

Keywords: Reinforced
concrete beam GFRP
Transverse reinforcement
Bending strength
Ductility

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تاثیر محصورشدگی بر رفتار تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای پلیمری شیشه‌ای

محمود رضا حسینی طباطبائی*^۱، سید مصطفی طباطبائی^۲، سید روح الله موسوی^۳، حسینعلی رهدار^۱

۱ - استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲ - دانش آموخته دوره کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

۳ - دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

چکیده

میلگردهای پلیمری مسلح الیافی شیشه‌ای (GFRP) مقاومت کششی بالا و مقاومت زیاد در برابر خوردگی دارند در این پژوهش، به بررسی اثرات محصورکنندگی میلگردهای عرضی فولادی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای طولی پلیمری شیشه‌ای پرداخته شده است برای این منظور شش نمونه‌ی تیر بتنی با ابعاد مقطع عرضی ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و طول دهانه‌ی بارگذاری ۲ متر ساخته شدند. میلگردهای طولی تیرها دارای سطح مقطع عرضی با مقدارهای ۱/۷، ۲/۶ و ۳/۵ برابر مقدار متوازن بودند. میانه‌ی سه تا از تیرها به کمک خاموت‌های فولادی با فاصله‌ی کم، مسلح شدند. این نمونه‌ها دورگیر شده نامیده شدند. نمونه‌ها به صورت استاتیکی زیر آزمایش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. در بررسی رفتار نمونه‌ها از پارامترهای مقاومت تسلیم نخستین، سختی بخش ترک‌خوردگی، نیروی نهایی و شاخص شکل پذیری استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که محصورشدگی سبب افزایش سه پارامتر نخست به ترتیب تا حدود ۲۷، ۲۹ و ۲۹ درصد شده است. شاخص شکل پذیری برای دو نمونه یا میلگرد طولی ۱/۷ و ۲/۳ برابر متوازن، حدود ۶ و ۲۲ درصد کاهش و در نمونه‌ی دیگر، حدود ۶ درصد افزایش را نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داد. همچنین رابطه‌های تحلیلی موجود برای تخمین ظرفیت تیرهای دورگیر نشده و دورگیر شده بکار رفت که خطای آن بین ۵ تا ۱۶ درصد بود و این بیانگر انطباق خوب نتایج تحلیلی با نتایج آزمایش است.

کلمات کلیدی: تیر بتن مسلح، میلگردهای پلیمری شیشه‌ای، تسلیح عرضی، ظرفیت خمشی، شکل پذیری.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۹/۸/۱۲	۱۴۰۰/۷/۰۴	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۸/۲۶	۱۴۰۱/۵/۰۱	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.254770.2283
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: محمود رضا حسینی طباطبائی mr.htabatabaei@uoz.ac.ir					

۱- مقدمه

در پاره‌ای از شرایط محیطی، میلگردهای فولادی بکار رفته در سازه‌های بتن مسلح دچار خوردگی می‌شوند. بر این پایه، پژوهشگران به بررسی مصالح پلیمری شیشه‌ای (GFRP) یا کربنی (CFRP) و فلزی مانند آلومینیومی که چنین وضعی را ندارند پرداخته‌اند. از این مصالح، به صورت میلگرد یا ورق، برای ساخت، تقویت و یا ترمیم انواع سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. مصالح پلیمری در ساخت تیرهای بتن مسلح مقاوم در برابر خوردگی بیشتر بصورت میلگرد درون بتن قرار می‌گیرند. همچنین برای ترمیم یا تقویت انواع سازه‌های بتنی، به صورت ورق بر روی سطوح آماده‌ی آن‌ها چسبانده می‌شوند [۱-۱۸].

افزون بر رفتار نیمه ترد بتن معمولی و رفتار ترد بتن با مقاومت بالا در فشار، طراحان با سه کاستی میلگردهای GFRP در تیرهای بتنی مسلح شده با آن روبرو هستند، (۱) رفتار ترد کشسانی میلگردها تا هنگام شکست، (۲) ضریب کشسانی پایین آن‌ها، (۳) لغزش میلگردها درون بتن. هر یک از موارد یادشده می‌تواند سبب ایجاد رفتاری نامطلوب در تیر بتن مسلح شود. در مورد رفتار ترد میلگردها و به منظور جلوگیری از پارگی آن‌ها، تیرها بر اساس مقدار میلگرد بیشتر از حد متوازن طراحی می‌شوند. ضریب کشسانی کم میلگردهای GFRP نسبت به میلگردهای فولادی باعث ایجاد خیزهای بزرگ‌تر در بارهای حد سرویس و نیز افزایش تغییرشکل‌های دراز مدت می‌شود. همچنین در مورد سازه‌های بتن مسلح برای حل مسأله‌ی رفتار نیمه ترد بتن (معمولی) در فشار، راهکارهایی از جمله بکارگیری میلگردهای فشاری یا دورگیر (محصور) کردن بتن ناحیه‌ی فشاری با بکارگیری میلگردهای عرضی با فاصله‌ی کم و آرایش مناسب در نواحی لنگر خمشی بیشینه‌ی تیر وجود دارد [۱۵، ۱۹]. این‌گونه مسلح‌سازی، سبب افزایش شکل‌پذیری و ضریب رفتار قاب‌های بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی می‌شود [۲۰]. افزون بر این‌ها پیوستگی میان میلگردهای پلیمری با بتن، کم‌تر از پیوستگی میلگردهای فولادی است و طراحان با پدیده‌ی لغزش میلگرد شیشه‌ای درون بتن روبرو هستند [۷، ۸، ۲۱-۲۴] که برای کاهش این پدیده، پژوهش‌هایی نیز انجام شده است [۲۵].

سانتوز و همکاران [۱۵] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار خمشی و به ویژه ظرفیت بازپخش لنگرها درون تیرهای پیوسته بتنی T شکل مسلح شده با میلگردهای شیشه‌ای و همچنین تاثیر دورگیری بتن ناحیه‌ی فشاری به کمک میلگردهای فولادی عرضی پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که افزایش درصد میلگردهای طولی و مقدار خاموت‌های عرضی در تکیه‌گاه میانی سبب افزایش بازپخش لنگرها تا میزان پنجاه درصد، از طریق اصلاح سختی و تشکیل زانوی مومسانی (مفصل پلاستیک) در تیرهای سراسری شد. البته حسنور رحمان و همکاران [۱۹] بر این باورند که به دلیل کوچکی مقیاس نمونه‌های پژوهش یادشده، مقادیر باز توزیع بزرگی از آزمایش‌ها بدست آمده و از این‌رو برای دستیابی به میزان واقعی‌تری از بازپخش لنگرها تحت تاثیر فاصله و آرایش میلگردهای عرضی، دست به آزمایش تیرهای سراسری (دو دهانه) با اندازه‌های واقعی‌تر زدند. اگرچه رفتار تیرهای بتن مسلح با مقطع T شکل را متفاوت با مقطع مستطیلی دانسته‌اند، به دلیل ایجاد مقطع مستطیلی بر روی تکیه‌گاه میانی در اثر لنگرهای منفی، باز توزیع لنگر در اینگونه تیرها، دست‌کم در تکیه‌گاه میانی، به رفتار مقاطع مستطیلی مسلح شده به میلگردهای پلیمری شیشه‌ای همچنان بستگی دارد. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که کاهش فاصله‌ی میلگردهای عرضی در بال، سبب بهبود بازپخش لنگر از طریق افزایش سختی ناحیه‌ی وسط دهانه‌ها شده است. با توجه به برخی تفاوت‌های اعلام شده در نتایج کمی دو پژوهش یادشده به نظر می‌رسد که این تفاوت‌ها افزون بر اثر اندازه، مربوط است به عواملی دیگر از جمله یکسره بودن میلگردهای GFRP و در نتیجه حذف یا کاهش اثر لغزش آن درون بتن در ناحیه‌ی تکیه‌گاه میانی و وسط دهانه و همچنین تاثیر دو عامل مهم دورگیری میلگردهای عرضی و مقدار میلگردهای طولی. افزون بر این‌ها پژوهشگران عوامل دیگری را در رفتار اینگونه تیرها مورد بررسی قرار داده‌اند. رهدار و قلعه‌نوی [۲۶] با توجه به اهمیت رفتار پس از ترک خوردگی بتن، برای فاصله ترک‌های ایجاد شده در ناحیه‌ی کشش در نمونه‌های بتنی مسلح شده با میلگرد GFRP روابط مناسبی را ارائه نموده‌اند که برای استفاده در تحلیل عددی مطلوب می‌باشد. همچنین نادری و اسمعیلی‌زاده [۲۷] با مدل سازی عددی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP، تاثیر کرنش‌های حرارتی نسبت به کرنش‌های ناشی از بار مکانیکی خارجی را بررسی نموده و مشخص گردید که نقش عدم تناسب ضریب انبساط حرارتی، کمتر از نقش کاهش مشخصات مکانیکی در اثر حرارت می‌باشد.

¹ Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer

در پژوهش کنونی به بررسی آزمایشگاهی ظرفیت، سختی و شکل پذیری تیرهای ساده بتنی با مقطع مستطیلی، مسلح شده با میلگردهای پلیمری شیشه‌ای GFRP پرداخته شده تا از میان عوامل بیان شده، تنها تاثیر محصورکنندگی خاموت‌ها و مقدار میلگردهای طولی و تاثیر همزمانی آن دو، مورد ارزیابی قرار گیرد. نمونه‌ها با مقادیر متفاوت میلگردهای طولی، در دو حالت با و بدون اثر دورگیری میلگردهای دورگیرکننده‌ی عرضی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همچنین به کمک رابطه‌های تحلیلی موجود، ظرفیت نمونه‌های دورگیر نشده و دورگیر شده با میلگردهای عرضی، تخمین زده شده است.

۲- ویژگی های مصالح

در این بخش طرح اختلاط و میلگردگذاری نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش ارائه می‌شود.

۲-۱- طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن

در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۳ نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد (۳۰۰*۱۵۰) ۲۸ روزه انجام شده است. طرح اختلاط در جدول (۱) و عیار سیمان، روانی، وزن مخصوص و مقاومت فشاری در جدول (۲) آورده شده است. نوع سیمان مصرفی، تیپ دو بود و از مصالح سنگدانه‌ی شکسته با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۲۵ میلیمتر استفاده شده است.

جدول (۱): وزن اجزای تشکیل دهنده یک متر مکعب بتن برحسب کیلوگرم.

سیمان	سنگدانه درشت	سنگدانه ریز	آب
۳۵۰	۸۰۰	۱۰۵۰	۱۵۰

جدول (۲): نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن.

نمونه	عیار سیمان kg/m ³	روانی (اسلامپ) Cm	وزن مخصوص kg/m ³	مقاومت فشاری kg/cm ²
۱	۳۵۰	۵	۲۳۵۰	۲۹۲
۲	۳۵۰	۶	۲۳۵۰	۲۸۸
۳	۳۵۰	۵	۲۳۵۰	۲۹۴

۲-۲ مشخصات میلگردهای طولی GFRP

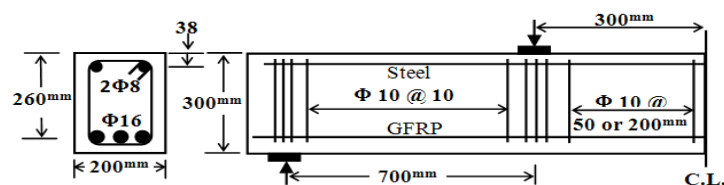
در این تحقیق از میلگردهای GFRP به قطر ۱۶ میلیمتر و طول ۲۳۰ سانتیمتر در ساخت تیرها استفاده شده است. جدول (۳) ویژگی‌های میلگردهای طولی GFRP را بر اساس اطلاعات شرکت سازنده در خود گنجانده است. در آزمایش کششی انجام شده بر روی سه نمونه از میلگرد یاد شده مقاومت متوسط حدود ۱۲۰۰ MPa بدست آمد. برای این منظور سه نمونه به طول ۵۰ سانتیمتر انتخاب شد. سپس، دو غلاف فولادی در دو طرف آرماتور به وسیله رزین مناسب متصل شده و آزمایش کششی طبق استاندارد ACI440. 1R-15 [۲۸] انجام شد.

جدول (۳): ویژگی های میلگرد GFRP ارائه شده توسط سازنده.

رنگ ظاهری	مدول الاستیسیته MPa	مقاومت کششی MPa
خاکستری	۶۰۰۰۰	بیشتر از ۱۰۰۰

۳- مشخصه‌های نمونه‌ها و شیوه‌ی آزمایش

نمونه‌های تیر ساخته شده دارای طول ۲۳۰ سانتیمتر، پهنا و ارتفاع مقطع عرضی (b و h)، به ترتیب ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر و عمق مؤثر آن‌ها (d) ۲۶ سانتیمتر بود. برای جلوگیری از شکست برشی نمونه‌ها، از میلگردهای فولادی به قطر ۱۰ سانتیمتر به صورت خاموت بسته و با فاصله‌ی ۱۰ سانتیمتر در ناحیه‌ی تحت نیروی برشی استفاده شده است.



شکل ۱: جزئیات هندسی و میلگردگذاری آن



(ب)



(الف)

شکل ۲: نمونه ای پیش و پس از بارگذاری.

نمونه‌ها دارای سه حالت میلگردگذاری طولی در ناحیه‌ی کششی، شامل ۲، ۳ و ۴ میلگرد GFRP با نسبت میلگرد ($\rho_f = A_f/bd$) ۰/۰۰۷۷، ۰/۰۱۱۶ و ۰/۰۱۵۵ بودند که در مورد نمونه‌های شاهد با عبارت B2، B3، B4 و برای نمونه‌های دورگیرشده BC2، BC3 و BC4 نام‌گذاری شده‌اند. همچنین فاصله‌ی خاموت‌ها در ناحیه‌ی لنگر ثابت برای نمونه‌های محصور نشده و محصور شده به ترتیب ۲۰ و ۵ سانتیمتر بوده و نام‌های S200 و S50 بر آن‌ها نهاده شده است. براین پایه، نمونه‌ی BC2S50 دارای دو میلگرد GFRP در ناحیه‌ی کششی بوده و توسط خاموت‌هایی به فاصله‌ی ۵۰ میلیمتر دورگیر شده است. در بالای مقطع، میلگردهای فولادی به قطر ۸ میلیمتر با مقاومت کششی میانگین ۴۰۰MPa بکار رفته است. مشخصات هندسی و میلگردگذاری نمونه‌ها در شکل (۱) گنجانده شده است. نمونه‌ها پس از ساخت و عمل‌آوری به وسیله جک هیدرولیکی (در آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد) و زیر بار برون دو نقطه‌ای به فاصله ۶۰ سانتیمتر از یکدیگر به صورت کنترل تغییرشکل با نصب LVDT در وسط تیر در میانه‌ی پهلو و زیر مقطع تیر، آزمایش شدند. داده‌های خروجی با سیستم جمع‌آوری هم‌زمان اطلاعات در گام‌های زمانی مشخص به وسیله‌ی دستگاه ثبت داده‌ها و رایانه ثبت شد. شکل (۲) دو نمونه را پیش و پس از شکست نشان می‌دهد.

۴- رابطه‌های تحلیلی برآورد ظرفیت تیرها

ظرفیت خمشی تیرها زیر بارگذاری دو نقطه‌ای متقارن، M_{II} ، بر اساس رابطه‌های تحلیلی مقاطع بتن مسلح و بار نهایی تیر، P_{II} ، به کمک رابطه‌های ایستایی (برای تیر ساده) از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود.

$$M_u = A_f E_f \varepsilon_{cu} \left(\frac{d}{x} - 1\right) + A'_s E_s \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{d'}{x}\right) \left(\frac{\beta_1 x}{2} - d'\right) \quad (1)$$

$$P_u = \frac{2M_u}{a}$$

در رابطه‌های بالا، ε_{cu} کرنش نهایی بتن و x عمق محور خنثی مقطع از دورترین تار فشاری، b و d به ترتیب پهنا و عمق مؤثر مقطع، E_f ، E_s به ترتیب ضریب کشسانی و تنش میلگردهای GFRP است. همچنین A'_s ، A_s به ترتیب مساحت و ضریب کشسانی میلگردهای فشاری و a فاصله‌ی هر تکیه‌گاه تا بار متمرکز نزدیک به آن می‌باشد. وجود میلگردهای عرضی در مقاطع بتن مسلح می‌تواند باعث محصورشدگی هسته‌ی بتن و ایجاد تنش‌های محوری جانبی به آن و در نتیجه بهبود رفتار بتن فشاری مقطع شود. این ویژگی در ستون‌های بتن مسلح که همه‌ی سطح مقطع و یا عمده‌ی آن تحت نیروی محوری فشاری است سبب افزایش شکل‌پذیری و در بیشتر موارد، افزایش ظرفیت آن‌ها می‌شود [۱۳، ۱۴، ۲۹]. آزمایش‌ها نشان داده است که آرایش و مقدار مناسبی از میلگردهای عرضی فولادی تاثیر قابل توجهی بر شکل‌پذیری و حتی ظرفیت تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای طولی فولادی داشته است [۳۰]. در ادامه رابطه‌های تحلیلی مورد نیاز برای در نظر گرفتن اثر دورگیری میلگردهای عرضی بر ظرفیت تیرهای یادشده با توجه به شکل‌های (۴ و ۳) ارائه می‌شود [۱۳]. رابطه‌ی تجربی زیر مقاومت نهایی بتن محصور شده، f_{cc} ، را نشان می‌دهد.

$$f_{cc} = f_{c0} + k_1 f_{le} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

که در آن

$$f_1 = \frac{\sum A_{sv} f_y \sin \alpha}{S b_c}, \quad f_{le} = k_2 f_1 \quad (3)$$

$$k_1 = 6.7 f_1^{-0.17}, \quad k_2 = \sqrt{\left(\frac{b_c}{S}\right) \left(\frac{b_c}{S_1}\right)} \leq 1.0$$

برای مقاطعی که در دو جهت عمود بر هم، دارای مشخصات هندسی-مکانیکی دورگیری یکسانی نیستند رابطه‌های زیر بکار می‌رود

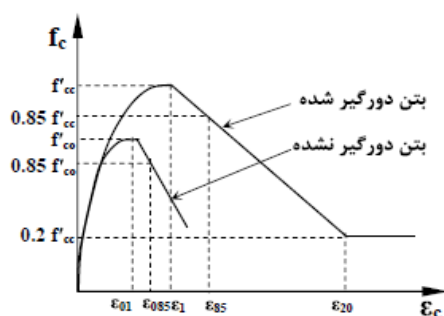
$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{cx} + f_{ley} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (4)$$

در رابطه‌های بالا، f_{c0} مقاومت فشاری بتن دورگیر نشده و f_1 و f_{le} به ترتیب تنش جانبی و تنش جانبی هم ارز وارده از سوی میلگردهای جانبی و میلگردهای طولی به بتن هسته، k_1 و k_2 به ترتیب ضرایب تبدیل فشار جانبی به افزایش ظرفیت محوری مقطع و فشار یکنواخت جانبی است. عبارت b_c نیز بعد درونی هسته‌ی مقطع می‌باشد. همچنین رابطه‌های مربوط به کرنش‌های بتن دورگیر شده با توجه به شکل (۴) به صورت زیر است.

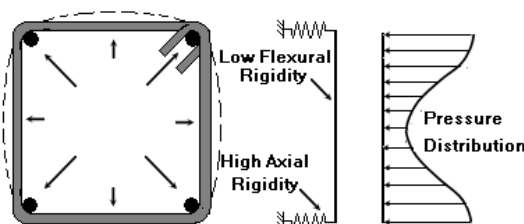
$$\varepsilon_{85} = 260 \rho_{sv} \varepsilon_1 + \varepsilon_{085}, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{01} (1 + 5K_s) \quad (5)$$

$$\rho_{sv} = \frac{\sum A_{sv}}{S(b_{cx} + b_{cy})}, \quad K_s = \frac{k_1 f_{le}}{f_{c0}}$$

در رابطه‌های بالا، کرنش‌ها به سادگی با توجه به شکل (۴) و براساس تنش نظیرشان، تعریف می‌شود. دو رابطه‌ی کسری در رابطه‌ی (۵)، عبارت‌های بدون بعدی بوده و برپایه‌ی پارامترهای تعریف شده‌ی پیشین برآورد می‌شوند. رابطه‌های بالا همگی برای حالتی است که مقطع زیر فشار یکنواخت قرار داشته باشد.

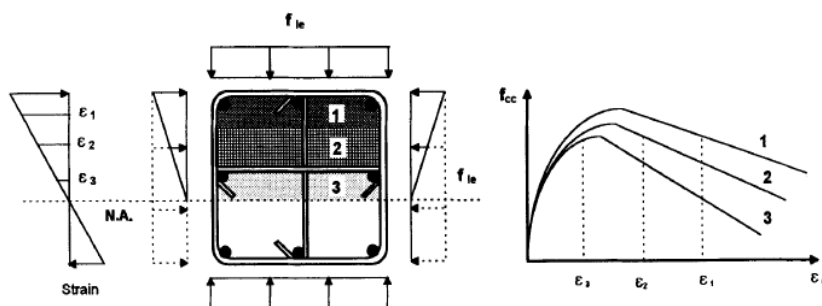


شکل ۴: الگویی برای نمودار تنش-کرنش بتن مقاطع دورگیر نشده و دورگیر شده [۳۱].



شکل ۳: عملکرد میلگردهای عرضی در ایجاد تنش‌های جانبی به هسته ی مقطع [۳۱]

برای مقطع تیر-ستون یا تیر که کرنش محوری در ارتفاع مقطع متغیر است، راهکاری توسط ساچگلو و همکاران [۱۳] ارائه شده است که در آن بخش فشاری مقطع به لایه‌هایی تقسیم بندی شده و برای هر لایه نمودار تنش-کرنش جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵ را ببینید). این شیوه‌ی تحلیل لایه‌ای منجر به پاسخ‌های مطلوبی برای تخمین ظرفیت نهایی تیرها و ستون‌ها شده است [۳۲]. در این پژوهش نیز این روش برای یافتن ظرفیت تیرهای بتن مسلح GFRP که با میلگردهای عرضی فولادی در ناحیه‌ی لنگر خمشی بیشینه دورگیر شده اند بکار رفته است.



شکل ۵: الگویی لایه‌ای برای تحلیل مقاطع دورگیر شده در حالت ترکیب لنگر خمشی و نیروی محوری [۱۳].

۵- برآورد ظرفیت نمونه‌ها و بررسی نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- برآورد ظرفیت نمونه‌ها

در این بخش در آغاز، رابطه‌های تحلیلی ارائه شده برای برآورد ظرفیت تیرهای دورگیر نشده بکار می‌رود. برای این منظور، پارامترهای درگیر، لنگر نهایی و سپس برپایه‌ی رابطه‌ی ایستایی، ظرفیت تیرها محاسبه شده و به همراه پارامترهای هندسی و مکانیکی در جدول (۴) گنجانده شده که در آن f_f تنش بیشینه‌ی میلگردهای طولی (در حالت نهایی مقطع) بر اساس کرنش نهایی در دورترین تار فشاری بتن (با فرض $\epsilon_{85} = \epsilon_{cu}$ و $\epsilon_{cu} = 0.0035$) و نمودار تغییرات کرنش در ارتفاع مقطع، محاسبه شده است. در ادامه، رابطه‌های (۲) تا (۵) برای تخمین ظرفیت مقاطع دورگیر شده بکار رفته و آن‌گاه بار نهایی آن‌ها $P_{u(con)}$ از رابطه‌ی ایستایی در دسترس قرار می‌گیرد. چون مقطع به موازات محور خمش، دارای تقارن نیست، تنش جانبی هم‌ارز محاسبه شده و سپس تنش‌ها و کرنش‌های مورد نیاز برای تعریف نمودارهای تنش-کرنش و همچنین تخمین ظرفیت خمشی مقاطع به کمک رابطه‌های بخش ۴ محاسبه و در جدول (۵) (با توجه به واحدهای عبارت‌ها در رابطه‌های دورگیری)، گنجانده شده است. گفتنی است، با توجه به کوچک بودن عمق بتن فشاری، در بکارگیری روش لایه‌ای، تنها یک لایه در نظر گرفته شده است. بر همین اساس، تنش نهایی میلگردهای محصور کننده 0.8 برابر تنش جاری شدن آن پنداشته شده است.

مقادیر جدول (۵) به همراه رابطه‌های (۱) برای محاسبه‌ی ظرفیت خمشی مقاطع دورگیر شده و سپس یافتن بار نهایی تیرها به کار رفته است که نتایج آن در جدول (۶) به همراه پارامترهای اصلی آن به چشم می‌خورد. مقاطع با مقدار زیاد فولاد عرضی دارای دو بخش محصور میان خاموت‌ها و یک بخش دورگیر نشده در بیرون این ناحیه (بتن پوشش) است. بنابراین به دلیل ایجاد محیط دو فازی توسط میلگردهای عرضی از بتن دورگیر نشده‌ی ناحیه‌ی فشاری (بیرون ناحیه‌ی دورگیر شده) در محاسبه‌ی ظرفیت مقطع چشم‌پوشی شده است (ستون‌های دوم و سوم جدول ۶ را ببینید). از جمله نکات مهم در مقادیر بدست آمده از محاسبات، تاثیر عامل دورگیری بر افزایش قابل توجه تنش میلگردهای GFRP در پایان ظرفیت نمونه‌ها است که به معنی استفاده بیشتر از ظرفیت مصالح خواهد بود. شکل (۶) مقایسه‌ی تنش محاسباتی در میلگردهای طولی برای نمونه‌های دورگیر نشده و دورگیر شده را به صورت نسبت آن‌ها به تنش نهایی متوسط میلگرد طولی نشان می‌دهد. مقادیر نمودار یادشده از ستون‌های ۷ جدول‌های (۴) و (۶) بدست آمده است. در ادامه به برآورد نسبت میلگرد طولی (ρ) و مقدار متوازن آن (ρ_b) پرداخته می‌شود. برای این منظور از رابطه‌ی زیر که از تحلیل مقطع (بکارگیری رابطه‌ی ایستایی نیروهای درون آن و همچنین نمودار تغییرات کرنش) بدست آمده استفاده می‌شود.

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \left(\frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}} \right) + \frac{A'_s}{bd} \left(\frac{f'_{sb}}{f_{fu}} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه، A'_s و f'_{sb} به ترتیب مساحت میلگردهای فولادی فشاری و تنش آن‌ها در حالت متوازن است. گفتنی است تنش این میلگردها برابر تنش تسلیم فرض شده است ($f_y=400$ MPa). باتوجه به مقادیر پارامترهای رابطه‌ی (۶)، برای سه حالت میلگردگذاری، نسبت ρ/ρ_b به ترتیب ۱/۷، ۲/۶ و ۳/۵ بدست می‌آید.

جدول (۴): ظرفیت مقاطع و تیرهای دورگیر نشده و پارامترهای اصلی آن.

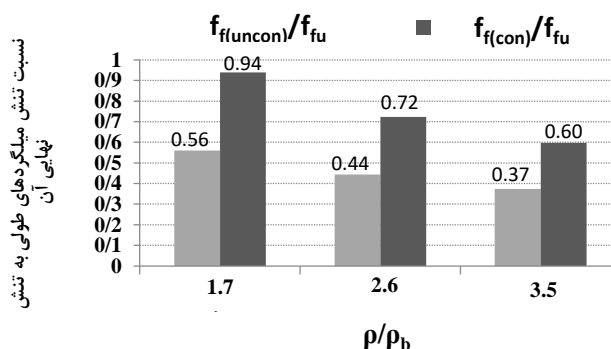
نمونه	b cm	d cm	$\epsilon_{cu}(\text{uncon})$	$f_{co}(\text{uncon})$ kg/cm ²	A_f cm ²	$f_f(\text{uncon})$ kg/cm ²	$M_u(\text{uncon})$ ton.m	$P_u(\text{uncon})$ Ton
B2S200	۲۰	۲۶	۰/۰۰۳۵	۲۹۱/۴	۴/۰۲	۶۵۸۳	۶/۴۲	۱۸/۴
B3S200	۲۰	۲۶	۰/۰۰۳۵	۲۹۱/۴	۶/۰۳	۵۲۱۹	۷/۴۷	۲۱/۴
B4S200	۲۰	۲۶	۰/۰۰۳۵	۲۹۱/۴	۸/۰۴	۴۴۰۵	۸/۲۷	۲۳/۶

جدول (۵): تنش‌های جانبی هم‌ارز و پارامترهای مرتبط با آن.

f_{ie} MPa	k_1	f_{ec} MPa	ρ_s	$\epsilon_{0.85} = (\epsilon_{cu}) \text{ uncon}$	K	ϵ_0	ϵ_1	$\epsilon_{0.85} = (\epsilon_{cu}) \text{ con}$
۱/۳۰	۶/۴۱	۳۶/۸	۰/۰۰۷۱۳۶	۰/۰۰۳۵	۰/۲۸۷۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴۸۷۳	۰/۰۱۲۵۴

جدول (۶): ظرفیت خمشی مقاطع و تیرهای دورگیر شده و پارامترهای مرتبط با آن.

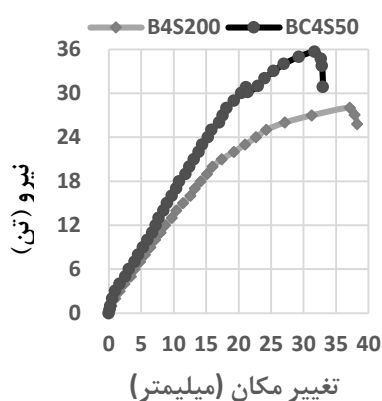
نمونه	b_c cm	d_c cm	$(\epsilon_{cu}) \text{ con}$	f_{cc} kg/cm ²	A_f cm ²	$(f_f) \text{ con}$ kg/cm ²	$(M_u) \text{ con}$ ton.m	$(P_u) \text{ con}$ ton
BC2S50	۱۷	۲۵	۰/۰۱۳۶۳	۳۶۱	۴/۰۲	۱۱۰۴۶	۹/۱۹	۲۶/۳
BC3S50	۱۷	۲۵	۰/۰۱۳۶۳	۳۶۱	۶/۰۳	۸۵۱۵	۱۰/۲۸	۲۹/۴
BC4S50	۱۷	۲۵	۰/۰۱۳۶۳	۳۶۱	۸/۰۴	۷۰۲۴	۱۱/۰۳	۳۱/۵



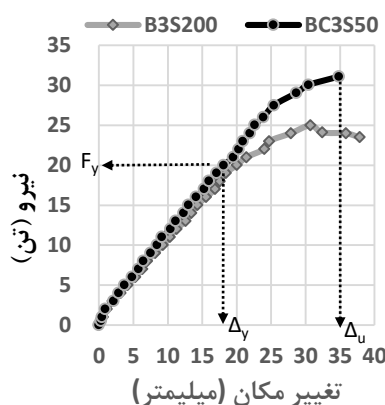
شکل ۶: نتایج تحلیلی تاثیر دورگیری بر تنش میلگردهای GFRP.

۵-۲- بررسی نتایج آزمایش

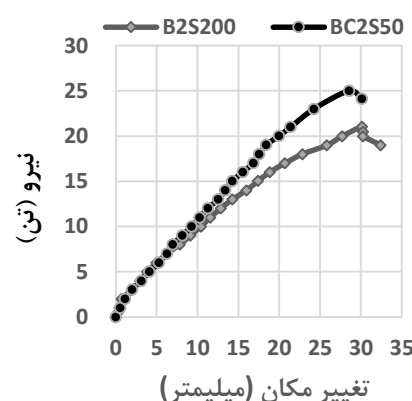
اکنون نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌ها ارائه می‌شود. شکل‌های (۷) تا (۹) نمودارهای نیروی کل به جابجایی وسط تیرهای دورگیر نشده و دورگیر شده که از آزمایش بدست آمده را نشان می‌دهد. جدول (۷) مقادیر پارامترهای رفتاری نمونه‌ها شامل نیروی تسلیم نخستین (F_y)، نیروی نهایی (P_u)، سختی بخش کشسانی-مومسانی (شیب بخش تقریباً خطی بین ترک خوردگی تا نیروی تسلیم نخستین، K) و اندیس شکل‌پذیری (μ) را در خود گنجانده است. گفتنی است سختی یادشده برای ارزیابی رفتار تیرها تحت بارهای بهره برداری اهمیت دارد. اندیس شکل‌پذیری از نسبت تغییرمکان نهایی (Δ_u) به تغییرمکان نیروی تسلیم نخستین (Δ_y) بدست آمده است [۳۳] که نمونه‌ای از آن در شکل (۸) نمایش داده شده است. باید افزود در مراحل نخستین بارگذاری تفاوت چندانی در رفتار نمونه‌های دورگیر شده و نشده دیده نمی‌شود [۳۰]. دلیل مکانیکی این امر را چنین می‌توان بیان کرد که در مراحل نخستین بارگذاری، ضریب پواسون بتن کوچک بوده و اثر اینرو میلگردهای عرضی تاثیر چندانی در ایجاد تنش‌های محصور کننده برای بتن هسته‌ای فشاری ندارد.



شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با ρ_b ۳/۵



شکل ۸: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با ρ_b ۲/۶



شکل ۷: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با ρ_b ۱/۷

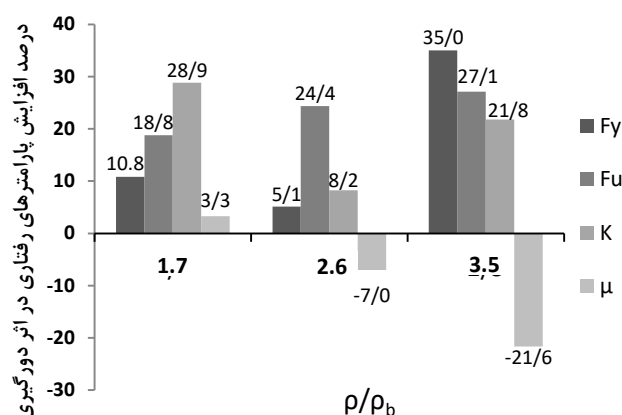
جدول ۷: مقادیر پارامترهای رفتاری نمونه‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌ها

	Δ_y mm	F_y ton	Δ_u Mm	P_u (Exp) ton	K ton/m	μ
B2S200	۱۸/۸	۱۵/۷	۳۲/۴	۲۱/۱	۷۱۷/۶	۱/۷۳
BC2S50	۱۶/۸	۱۶/۷	۲۸/۶	۲۵/۰	۹۲۴/۷	۱/۷۰
B3S200	۱۸/۴	۱۹/۰	۳۷/۸	۲۵/۰	۹۸۱/۶	۲/۰۵
BC3S50	۱۸/۱	۲۰/۰	۳۴/۸	۳۱/۱	۱۰۶۲/۴	۱/۹۲
B4S200	۱۶/۰	۲۰/۰	۳۷/۱	۲۸/۱	۱۱۸۹/۱	۲/۳۲
BC4S50	۱۷/۶	۲۷/۰	۳۱/۶	۳۵/۷	۱۴۴۷/۹	۱/۸۰

نمودارهای شکل (۱۰) به کمک مقادیر جدول (۷) بدست آمده و تاثیر عامل دورگیری بر پارامترهای رفتاری برای سه حالت میلگردگذاری را به صورت درصد افزایش پارامترهای نمونه‌های دورگیر شده نسبت به مقادیر نمونه‌های شاهد بیان می‌کند. بر این اساس، دورگیری، سبب افزایش همه‌ی پارامترهای رفتاری به جز اندیس شکل‌پذیری شده است. در این میان بیشترین تاثیر مربوط است به نیروی تسلیم نخستین و بیانگر گسترش بخش خطی دوم نمودار تیرهای دورگیر شده می‌باشد. از سویی، اگرچه دورگیری سبب افزایش مقاومت نهایی شده، برخلاف نتایج پژوهش‌های پیشین در مورد میلگردهای فولادی [۳۰] محصورکردن بخش لنگر خمشی بیشینه با میلگردهای بسته‌ی عرضی، سبب کاهش شکل‌پذیری شده است. از سویی، در مورد تیرهای سراسری T شکل مسلح شده با میلگردهای GFRP [۱۹ و ۱۵]، دورگیری سبب افزایش بازتوزیع نیروها و در نتیجه، شکل‌پذیری بیشتر در آن‌ها شده است که دلیل آن را می‌توان یکسره بودن

میلگردهای GFRP و در نتیجه حذف یا کاهش اثر لغزش آن درون بتن در ناحیه‌ی تکیه‌گاه میانی دانست. در ادامه به همراه تفسیر نمودارهای رفتاری بیشتر به این پدیده پرداخته می‌شود.

در مورد همه‌ی نمونه‌ها، در ناحیه‌ی نخست رفتاری، به دلیل ترک‌خوردگی بتن، مقطع‌های تیر بتن مسلح براساس ارتفاع کامل آن‌ها بارها (لنگر خمشی) را تحمل می‌کنند. از این‌رو تیرها در این محدوده، بیشترین سختی را از خود نشان می‌دهند. از سویی تنش‌های جانبی (محصورکننده) میلگردهای عرضی به سبب کوچکی ضریب پواسون بتن (حدود ۰/۲ تا ۰/۲۵) در تنش‌های کوچک فشاری، ناچیز است. بنابراین در مراحل آغازین بارگذاری، تفاوت چندانی در رفتار تیرهای محصور شده و محصور نشده دیده نمی‌شود. خاطر نشان می‌سازد، دورگیرکنندگی خاموت‌ها با افزایش تنش‌های فشاری در اثر افزایش ضریب پواسون بتن (در مراحل نهایی، نزدیک به ۰/۵) سبب بهبود رفتار تارهای دورتر فشاری بتن شامل افزایش شکل‌پذیری و مقاومت آن‌ها نسبت به حالت دورگیر نشده می‌شود.



شکل ۱۰: تاثیر دورگیری بر پارامترهای رفتاری نمونه‌ها با تغییر نسبت میلگردهای طولی.

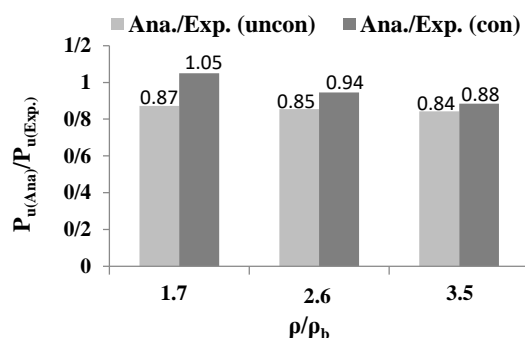
با افزایش بار، مقاطع میانی تیر دچار ترک‌خوردگی شده و محور خنثی به سرعت به سوی ناحیه‌ی فشاری جابجا می‌شود. این امر سبب بروز تغییر شکل‌های بزرگ‌تر می‌شود که برای جبران از دست رفتن تنش‌های کششی بتن ترک‌خورده توسط میلگردهای GFRP از یک سو و ایجاد نیروهای لازم در بخش کششی به دلیل کوچک بودن ضریب کشسانی میلگردهای GFRP ضروری است. در اثر این نفوذ محور خنثی به بالا، ارتفاع بتن ناحیه‌ی فشاری نیز کاهش می‌یابد. پس از عبور از مرحله‌ی ترک‌خوردگی، رفتار نمونه‌ها (سختی یا شیب نمودارها) تا حدودی به ثبات می‌رسد. این، مرحله‌ی دوم رفتاری نمونه‌ها است. در همین مرحله عمل قوسی میلگردهای کششی و بتن فشاری آغاز می‌شود. با افزایش بار در این مرحله، تنش در تارهای فشاری دور بتن از یک سو و تنش در میلگردهای کششی از سوی دیگر رو به فزونی می‌نهد. در مراحل پایانی این ناحیه‌ی رفتاری (دوم)، با افزایش بار و تنش‌های ایجاد شده در مصالح، تاثیر دو عامل دورگیری و تمایل میلگردها به لغزش، با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. با رسیدن بتن تارهای دور فشاری به ظرفیت خود و کرنش‌هایی فراتر از آن، ضریب پواسون و در نتیجه کرنش‌های جانبی افزایش می‌یابد. در این هنگام، میلگردهای عرضی، مانعی خواهند بود برای افزایش این کرنش‌ها. این رویداد سبب جلوگیری از افت قابل توجه تنش تارهایی از بتن که از حد ظرفیت نهایی خود فراتر رفته‌اند، می‌شود. این پدیده، حتی ممکن است با افزایش مقاومت فشاری آن‌ها همراه باشد. چنین رفتاری بر ضریب کشسانی بتن نیز تاثیر گذاشته و از کاهش سریع آن در اثر ادامه بارگذاری (در شاخه‌ی کاهشی نمودار تنش-کرنش بتن) جلوگیری می‌کند که در نمودارهای رفتاری تیرها به صورت عدم کاهش شیب نمودار (سختی تیر) دیده می‌شود. این درحالی است که تارهای دور بتن دورگیر نشده با رسیدن به ظرفیت خود، دچار از دست دادن تنش‌های فشاری شده (بخش نرم شوندگی نمودار تنش-کرنش بتن) که این ناحیه دارای ضریب کشسانی (تانژانتی یا مماسی) منفی است و به تدریج با ادامه بارگذاری باعث کاهش سختی تیر می‌گردد. این تفاوت رفتار بتن‌های دورگیر شده و نشده سبب فاصله گرفتن نمودارهای نمونه‌های آن‌ها می‌شود که در شکل‌های (۷) تا (۹) بخوبی دیده می‌شود.

موارد تحلیلی بیان شده تاکنون، بیشتر مربوط به تفاوت رفتار نمونه‌های دورگیر شده و نشده در محدوده دوم رفتار و همچنین ظرفیت آن‌هاست. نکته مهم دیگر، کاهش اندیس شکل‌پذیری در اثر عمل دورگیری و عامل لغزش میلگردهای طولی است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. با توجه به نمودارهای رفتاری، دورگیری، سبب ایجاد تاخیر در افتادن لایه‌های فشاری بالای مقطع در شاخه‌ی نزولی نمودار تنش-کرنش و در نتیجه باعث گسترش بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی (بخش دوم) بدون افزایش قابل توجه بخش مومسانی شده است. این در حالی است که براساس محاسبات (ستون ۴ در جدول ۶)، کرنش نهایی بزرگ برای بتن دورگیر شده بایستی نوید دهنده‌ی رفتاری شکل‌پذیر برای تارهای دور بتن فشاری و در نتیجه خیزهای مومسانی بزرگ برای تیر مورد نظر باشد. همچنین اگر لغزشی میان میلگردها و بتن در مراحل پایانی بارگذاری، روی ندهد همانند آنچه از آزمایش‌ها در مورد تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی [۳۰] و تیرهای سراسری [۱۵ و ۱۹] گزارش شده است، بایستی تیرهای دورگیر شده پس از رسیدن به ظرفیت خود، با کاهش بسیار ناچیز در نیروی مقاوم (حتی در مواردی با افزایش آن)، خیزهای مومسانی بزرگی را تجربه می‌کردند. این در حالی است که در مورد همه‌ی نمونه‌های دورگیر شده، علی‌رغم افزایش ظرفیت آن‌ها نسبت به نمونه‌های دورگیر نشده، به دلیل بروز تنش‌های بزرگ‌تر میان میلگردهای طولی و بتن، لغزش میان بتن و میلگردها روی داده و تیرهای دورگیر شده در خیزهای کوچک‌تری از نمونه‌های دورگیر نشده دچار شکست شدند.

نکته‌ی پایانی آنکه، علی‌رغم شکست نمونه‌های دورگیر شده در تغییرمکان‌های کوچک‌تر از نمونه‌های شاهد خود، عمل دورگیری توانسته است پیش از عمل لغزش، اثر خود را به صورت افزایش در سختی، در نیروی تسلیم نخستین (افزایش بخش خطی رفتار) و در ظرفیت آن بر تیر تحمیل کند. از آن سو لغزش میلگردها مانع از ایجاد تغییرشکل‌های مومسانی بزرگ در نمونه‌های دورگیر شده است.

۳-۵- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

علی‌رغم گستردگی پارامترها و تجربی بودن رابطه‌های تحلیلی ارائه شده، به ویژه در مورد نمونه‌های دورگیر شده، براساس شکل (۱۱) مقادیر ظرفیت نهایی برآورد شده به کمک رابطه‌های تحلیلی از دقت نسبی خوبی برخوردار است. درصد اختلاف مقاومت با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های دورگیر شده و نشده به ترتیب بین ۵ تا ۱۲ و بین ۱۳ تا ۱۶ درصد است.



شکل (۱۱): نمودارهای نسبت ظرفیت نهایی محاسباتی به آزمایش.

دقت ظرفیت برآورد شده برای حالت دورگیر شده از مقادیر نظیر برای نمونه‌های دورگیر نشده بیشتر است. در مورد نمونه‌های دورگیر نشده همه‌ی مقادیر برآورد شده از نتایج آزمایش‌ها کمتر است. این امر را می‌توان ناشی از بروز عمل قوسی بین میلگردهای کششی و بتن ناحیه‌ی فشاری تیر دانست که در رابطه‌های تحلیلی جایی ندارد. از آن سو علی‌رغم در نظر نگرفتن عمل قوسی برای نمونه‌های دورگیر شده، نزدیک بودن مقادیر محاسباتی به نتایج آزمایش‌ها می‌تواند بیانگر تخمین دست بالای رابطه‌های تحلیلی در صورت وارد کردن اثر عمل قوسی آن باشد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر دورگیری فولادهای عرضی بر رفتار تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP با مقدار ۱/۷، ۲/۶ و ۳/۵ برابر حالت متوازن پرداخته شد. در بررسی رفتار نمونه‌ها، پارامترهای بار تسلیم نخستین، سختی بخش کشسانی-مومسانی، نیروی نهایی و اندیس شکل‌پذیری بکار رفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که عامل دورگیری، سبب افزایش نیروی تسلیم نخستین بین حدود ۵ تا ۳۵ درصد، افزایش ظرفیت بین حدود ۱۸ تا ۲۷ درصد، افزایش سختی بخش خطی دوم (کشسان-مومسان) بین حدود ۶ تا ۲۲ درصد و تغییرات اندیس شکل‌پذیری بین حدود ۲۲- تا ۶ درصد نمونه‌های دورگیر نشده‌ی نظیر گردید. اگرچه عامل دورگیری توانست در افزایش ظرفیت تیرهای دورگیر شده بر اثر لغزش میلگردها پیشی گیرد، این لغزش میلگردها بود که مانع از رسیدن تیرهای دورگیر شده به تغییرمکان نظیر نمونه‌های شاهد شد. از این‌رو نمونه‌های دورگیر شده علی‌رغم بخش خطی وسیع‌تر، سختی بزرگ‌تر و استفاده بیشتر از ظرفیت کششی میلگردهای طولی و در نتیجه ظرفیت بیشتر، تغییرشکل مومسانی قابل توجهی نداشتند. بنابراین، اگر تنها عامل دورگیری مورد نظر باشد چنین می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف تیرهای بتنی محصور شده‌ای که با میلگردهای طولی فولادی مسلح شده‌اند، وجود میلگردهای محصور کننده عرضی می‌تواند سبب کاهش شکل‌پذیری تیرهای GFRP شود.

همچنین در این پژوهش، ظرفیت تیرهای محصور شده و نشده به کمک رابطه‌های تحلیلی نیز برآورد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که میانگین اختلاف آن‌ها برای نمونه‌های دورگیر نشده ۱۵ و برای دورگیر شده ۴ درصد است. بنابراین با توجه به این نتایج و همچنین نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پیشنهاد دهنده‌ی روابط تحلیلی، این رابطه‌ها علی‌رغم در نظر نگرفتن همه پارامترهای رفتاری از جمله لغزش میلگردهای طولی و عمل قوسی در تیرها، از نظر کاربرد مهندسی می‌تواند تخمین مناسبی از ظرفیت تیرهای مورد نظر را ارائه دهد.

مراجع

- [1] Abdalla, J.A., Abu-Obeidah, A.S., Hawileh, R.A. and Rasheed, H.A. (2016). Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally-bonded aluminum alloy plates: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 128, 24-37.
- [2] Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R. and Tourneur, C. (2009). Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. *Composite Structures*, 91(2), 138-147.
- [3] Attari, N., Amziane, S. and Chemrouk, M. (2012). Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 37, 746-757.
- [4] Auman, H., Stratford, C. and Palermo, A. (2020). An Overview of Research and Applications of FRP in New Zealand Reinforced Concrete Structures. *Structural Engineering International*, 30(2), 201-208.
- [5] Choi, J. (2014). Comparative study of effective stresses of concrete beams strengthened using carbon-fibre-reinforced polymer and external prestressing tendons. *Structure and infrastructure engineering*, 10(6), 753-766.
- [6] Dayhim, N., Nicknam, A., Barkhordari, M., Hosseini, A. and Mehdizad, S. (2013). Experimental investigation of square RC column strengthened with near surface mounted GFRP bars subjected to axial and cyclic lateral loads. *scientiairanica*, 20(5), 1361-1371.
- [7] Gazovicova, N., Bilcik, J., Holly, I. and Halvonik, J. (2018). Bond Behaviour between GFRP Reinforcement and Concrete Using a Pull-Out Test. In *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publ, 232-237.
- [8] Golafshani, E.M., Rahai, A. and Sebt, M.H. (2014). Bond behavior of steel and GFRP bars in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 61, 230-240.
- [9] Mahmoud, K. and El-Salakawy, E. (2015). Shear strength of glass fiber reinforced polymer-reinforced concrete continuous beams without transverse reinforcement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(12), 1073-1082.
- [10] Noor, A.A.H., Rendy, T., Azmi, I. and Hamid, H.A. (2014). Strain distribution on reinforcement of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars: Trans Tech Publ.
- [11] Önal, M.M. (2014). Strengthening reinforced concrete beams with CFRP and GFRP. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.

- [12] Peng, J., Tang, H. and Zhang, J. (2017). Structural behavior of corroded reinforced concrete beams strengthened with steel plate. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4), 04017013.
- [13] Saatcioglu, M., Salamat, A.H. and Razvi, S.R. (1995). Confined columns under eccentric loading. *Journal of Structural Engineering*, 121(11), 1547-1556.
- [14] Sallal, A.K. and Rajan, A. (2016). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthening with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) at Different Sides. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5.
- [15] Santos, P., Laranja, G., França, P.M. and Correia, J.R. (2013). Ductility and moment redistribution capacity of multi-span T-section concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 49, 949-961.
- [16] Si-Larbi, A., Agbossou, A., Ferrier, E. and Michel, L. (2012). Strengthening RC beams with composite fiber cement plate reinforced by prestressed FRP rods: Experimental and numerical analysis. *Composite Structures*, 94(3), 830-838.
- [17] Tanarlan, H. (2017). Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates. *Engineering Structures*, 151, 337-348.
- [18] Zhang, W. and Kanakubo, T. (2016). Flexural strengthening of RC beams with externally bonded CFRP plate: experimental study on shear-peeling debonding. *Magazine of Concrete Research*, 68(14), 724-738.
- [19] Rahman, S.H., Mahmoud, K. and El-Salakawy, E. (2017). Behavior of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete continuous T-beams. *Journal of Composites for Construction*, 21(2), 04016085.
- [20] Tasnima, A.A. and Salimi, M. (2007). The effect of concrete confinement on the behavior factor of concrete structures *Journal of school of engineering*, 19(1), 1-19.
- [21] Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H. and Tao, S. (1997). Bond behavior of deformed GFRP rebars. *Journal of composite materials*, 31(14), 1413-1430.
- [22] Ju, M. and Oh, H. (2015). Experimental assessment on the flexural bonding performance of concrete beam with GFRP reinforcing bar under repeated loading. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- [23] Veljkovic, A., Carvelli, V., Haffke, M.M. and Pahn, M. (2017). Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading. *Composites Part B: Engineering*, 124, 40-53.
- [24] Yan, F., Lin, Z. and Yang, M. (2016). Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*, 98, 56-69.
- [25] Ashrafi, H., Bazli, M. and Oskouei, A.V. (2017). Enhancement of bond characteristics of ribbed-surface GFRP bars with concrete by using carbon fiber mat anchorage. *Construction and Building Materials*, 134, 507-519.
- [26] Rahdar, H.A. and GHalehnovi, M. (2019). Post-Cracking Behavior of the Tensile Specimens Made from Ultra High Performance Concrete, Reinforced by GFRP Rebar. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 6(1), 176-201.
- [27] Naderi, M. and Esmealizadeh, S. (2019). Numerical modelling of the Concrete Beams Strengthened with externally bonded CFRP Fabrics at High Temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 6(3), 71-88.
- [28] ACI Committee 440 1R-15 (2015). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [29] Razvi, S. and Saatcioglu, M. (1999). Confinement model for high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 125(3), 281-289.
- [30] Ziara, M.M., Haldane, D. and Kuttub, A.S. (1995). Flexural behavior of beams with confinement. *Structural Journal*, 92(1), 103-114.
- [31] Razvi, S.R. and Saatcioglu, M. (1994). Strength and deformability of confined high-strength concrete columns. *Structural Journal*, 91(6), 678-687.
- [32] Esfahani, M.R. and Hoseini-Tabatabaei, M-R. (2011). Numerical analysis of reinforced concrete beams based on nonlinear geometric behaviors and materials. *Journal of Iranian Society of Civil Engineering*, 27, 36-48.
- [33] You, Z., Chen, X. and Dong, S. (2011). Ductility and strength of hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete beam with low reinforcement ratios. *Systems Engineering Procedia*, 1, 28-34.