

بررسی پارامتری بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری بتنی T شکل مسلح شده با میلگردهای GFRP به روش اجزای محدود

علی مدبرسعید^۱، محمد علی لطف الهی یقین^{۲*}، احمد ملکی^۳

۱. دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۸/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۲

چکیده

به دلیل عملکرد بهتر در شرایط جوی شدید و خیلی شدید و خواص مناسب دیگری مانند: خنثی بودن در برابر میدان‌های مغناطیسی، وزن کم و مقاومت بالا به نسبت فولاد، استفاده از آرماتورهای GFRP به عنوان یک جایگزین قابل قبول برای آرماتورهای فولادی معمولی در سازه‌های بتنی مسلح، رشدی روز افزون دارد. در سالهای اخیر مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار خمشی و برشی تیرهای بتنی مسلح شده با آرماتورهای GFRP انجام شده است. رفتار الاستیک خطی مصالح FRP تا لحظه شکست، مانع لحاظ کردن بازپخش لنگر در تیرهای یاد شده توسط آئین نامه‌های مختلف می‌شود. تاکنون پژوهشگران متعددی وجود بازپخش لنگر در تیرهای سراسری مسلح شده با آرماتور FRP با مقطع مستطیلی را مورد بررسی قرار داده‌اند، ولی تحقیقات زیادی روی تیرهای سراسری با مقطع T شکل انجام نشده است. این مطالعه یک تحقیق عددی است که با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. ابتدا درستی مدل‌سازی انجام شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده است، سپس با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند: درصد آرماتور طولی، تعداد آرماتور طولی با درصد ثابت، نسبت خاموت، فاصله خاموت با درصد ثابت و فاصله خاموت با قطر ثابت، وجود بازپخش لنگر و تاثیر این متغیرها روی درصد آن در تیرهای سراسری بتنی مسلح شده با آرماتور GFRP، با مقطع T شکل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در تیرهای یاد شده، با لحاظ کردن چند نکته می‌توان بازپخش لنگر را در تحلیل و طراحی لحاظ کرد.

واژه‌های کلیدی: بتن مسلح، تیرهای سراسری، آرماتور GFRP، مقطع T شکل، بازپخش لنگر، روش المان محدود

مقدمه

شرایط جوی شدید و بسیار شدید، ضعیف و آسیب پذیرند. آرماتورهای FRP در برابر خوردگی مقاومند و در برابر میدان‌های مغناطیسی کاملاً خنثی هستند بنابراین سازه‌های بتن آرمه مسلح شده با این آرماتورها در برابر شرایط جوی مهاجم عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند (1). بنا به دلایل فوق،

با توجه به هزینه‌های بالای مرمت و بازسازی سازه‌ها، دوام و مقاومت در برابر شرایط جوی یکی از پارامترهای مهم طراحی است. آرماتورهای استاندارد فولادی در برابر خوردگی مقاومت چندانی ندارند پس سازه‌های بتن آرمه معمولی موجود در برابر

استفاده از آرماتورهای FRP، بخصوص GFRP- به دلیل قیمت پایین تر- به عنوان مصالح مسلح کننده در بتن در حال افزایش است. در اعضای سازه‌ای در معرض هوا، تیرهای سراسری بتنی با مقطع T شکل بسیار رایج بوده و وجود شکل پذیری و قابلیت بازپخش لنگر دو مزیت مهم برای آنها محسوب می‌شوند که باعث افزایش عملکرد و بکارگیری تمام ظرفیت مقطع در طول دهانه، قبل از شکست سازه خواهند بود. رابطه تنش- کرنش مصالح FRP برخلاف فولاد معمولی یک منحنی الاستیک خطی کامل تا لحظه شکست است پس وجود شکل پذیری و بازپخش لنگر در این سازه‌ها نیازمند بررسی است.

علاوه بر هزینه اولیه بالا، آرماتورهای GFRP مدول الاستیسیته کمتری نسبت به فولاد دارند بنابراین در طراحی حالت حدی بهره برداری، تغییر شکل‌ها و عرض ترکهای اعضای مسلح شده با آرماتورهای GFRP بالاتر است. در ضمن در طراحی حالت حدی نهائی بدلیل رفتار خطی الاستیک، آرماتورهای GFRP نه قابلیت شرکت در شکل پذیری و نه در بازپخش نیروهای داخلی را دارند. در نتیجه بیشتر آیین نامه‌ها و راهنماهای طراحی (مانند ACI 440.1 R-15) پیشنهاد می‌کنند که طراحی حالت حدی نهائی براساس اطمینان از شکست بتن به جای گسیختگی کششی آرماتورهای GFRP انجام گیرد (2). رفتار سازه‌ای تیرهای بتن مسلح شده با مصالح GFRP قبلاً در چندین مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال اطلاعاتی که در مورد پاسخ اعضای سراسری به ویژه در مورد بازپخش لنگر آنها وجود دارد بسیار محدود است. چندین مطالعه برای بررسی بازپخش لنگر در تیرهای سراسری مستطیلی انجام شده است. El-Mogy و همکاران گزارش کرده‌اند که تقریباً ۲۳٪ بازپخش لنگر بدون هیچ اثری در عملکرد تیرها مشاهده شده است (3, 4). همچنین نشان داده شده که خاموت گذاری با فاصله کم با نسبت آرماتور عرضی یکسان میزان بازپخش لنگر را افزایش می‌دهد. El-Salakavy و Mahmood در تحقیقات خود بازپخش لنگر را در تیرهای بتنی مستطیلی مسلح شده با GFRP که در حالت بحرانی برش قرار دارند با مقاومت‌های مختلف بتن، نسبت‌های مختلف آرماتور طولی و آرماتور عرضی مشاهده کرده‌اند (5, 6).

نویسندگان همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش قطر آرماتور با وجود ثابت بودن فاصله آنها تاثیر اندکی در بازپخش لنگر دارد. علاوه بر این Kara و Ashour یک روش عددی ارائه کرده و منحنی لنگر و بازپخش لنگر را در تیرهای سراسری مسلح شده با FRP با مقطع مستطیلی بررسی کرده‌اند (7). این نویسندگان نتیجه گرفته‌اند که هیچ بازپخش لنگری در تیرهای تحت مسلح FRP-RC وجود ندارد و مقاطع بحرانی در این تیرها قابلیت بازپخش لنگر در ظرفیت نهائی خود را ندارند.

با این حال علاوه بر واقعیت خطی بودن منحنی تنش- کرنش در آرماتورهای FRP، مقاطع T شکل در تیرهای سراسری بدلیل عمل متقابل مقطع وسط دهانه با سختی بیشتر و مقطع تکیه‌گاه میانی با سختی نسبی کمتر در حالت پس از ترک، نیاز به تحقیق بیشتری دارند.

Rahman و El-Salakawy، احتمال و مقدار بازپخش لنگر در تیرهای سراسری بتنی با مقطع T شکل در اندازه واقعی را در یک برنامه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تمام تیرها قابلیت بازپخش لنگر منفی به مثبت را از خود نشان می‌دهند (8, 9).

Basa و همکاران، با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی روی ۶ تیر بتنی سراسری مسلح شده با GFRP با مقطع مستطیلی، وجود بازپخش لنگر در این تیرها را مورد بررسی قرار دادند. به دلایل مختلف بازپخش لنگر در این تیرها وجود دارد (10, 11). مطالعه حاضر یک تحقیق عددی بروش المان محدود در مورد رفتار تیرهای بتنی مسلح شده دو دهانه با آرماتورهای GFRP با مقطع T شکل است. درستی‌آزمایی نتایج تیرهای مدل سازی شده با تیرهای واقعی آزمایشگاهی انجام شده است. در مدل‌های جدید اثر نسبت و تعداد آرماتورهای طولی و قطر و فاصله خاموت‌ها، با و بدون نسبت ثابت آرماتور عرضی روی ظرفیت بازپخش لنگر تیرها مورد بررسی قرار گرفته و اثر عدم پیوستگی مابین بتن و آرماتورها در نظر گرفته نشده است.

مدلسازی المان محدود

این مطالعه یک تحقیق عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS (12) است. مدل‌های المان محدود بر

مشخصات مصالح و مدل سازی نرم افزاری

در این پژوهش، بتن، با استفاده از مدل Concrete Damage Plasticity (CDP) و با استفاده از المان‌های آجری خطی ۸ نقطه‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) مدل سازی شده است. برای محاسبه منحنی تنش-کرنش ایزوتروپیک چند خطی بتن تحت فشار از رابطه هاگنستاد استفاده شده است. هنگامی که تنش کشش در المان بتنی سه بعدی از مدول گسیختگی محاسبه فراتر می‌رود، به عنوان یک المان ترک خورده در نظر گرفته شده و از ماتریس سختی مدل حذف می‌شود و تنش‌ها براساس ماتریس سختی جدید روی المان‌های ترک نخورده مجاور توزیع می‌شوند. این روند، کاهش ممان اینرسی به دلیل اثر ترک خوردگی بتن را لحاظ می‌کند. بار متمرکز به صورت کنترل تغییر مکان اعمال شده و نوع تحلیل نیز بدلیل ماهیت استاتیکی بار، استاتیکی غیرخطی است.

مصالح مسلح کننده در این پژوهش به صورت المان‌های خرابایی دو نقطه‌ای خطی سه بعدی (T3D2) مدل سازی شده که قابلیت مدل سازی تغییر شکل‌های غیرخطی و پلاستیک را دارند. ابعاد مشخص بندی برای کلیه پارت‌ها ۵۰ در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته این مصالح دقیقاً براساس نمونه‌های آزمایشگاهی طبق جدول (۲) در نظر گرفته شده است.

اساس صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از مطالعه El-Mogy و همکاران (13) و Rahman و El-Salakawy (8) ساخته شده‌اند. شکل (۱) مشخصات ۳ تیر آزمایشگاهی مدل سازی شده در نرم‌افزار برای انجام درستی آزمایشی را نشان می‌دهد.

مشخصات مدل‌ها

طول مدل‌ها ۶۰۰۰ میلی‌متر با دو دهانه برابر به طول ۲۸۰۰ میلی‌متر است. نمونه‌ها تحت بارگذاری متمرکز در وسط هر یک از دهانه‌ها مطابق شکل (۱) قرار دارند. مشخصات مدل‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی برای درستی آزمایشی در جدول (۱) آورده شده است. شکل

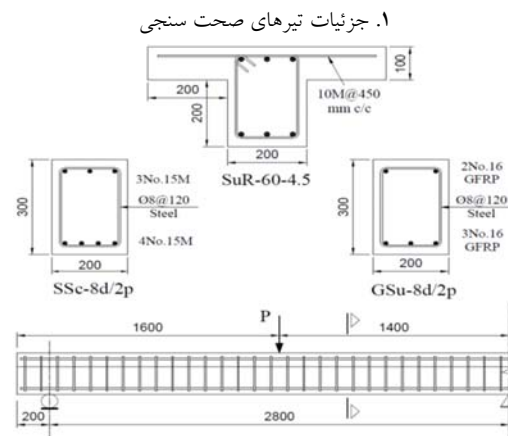


Fig. 1. Details of verification beams

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح تیرها

Beam	Bar material	Flexural bars		Transverse stirrups ($\rho_v = A_v/b_s$)	Concrete characteristics (MPa)	
		Top	Bottom		f'_c	f_t
SSc-8d/2p	Steel	3No.15M	4No.15M	8-mm@120 (Steel) $\rho_v = 0.4\%$	28 ± 3.5	2.7 ± 0.4
GSu-8d/2p	GFRP	2No.16	3No.16		28 ± 3.5	2.7 ± 0.4
SuR-60-4.5	Steel	2-M15+1-M20		8-mm@150 (Steel) $\rho_v = 0.3\%$	43	2.62

Table 1. mechanical properties of beams

جدول ۲. مشخصات مکانیکی آرماتورهای مسلح کننده

Bar Type	Bar Diameter (mm)	Bar Area (mm ²)	Modulus of Elasticity (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Ultimate Strain
Steel No10	11.3	100	200	410	0.0021
Steel No15 (Main Bar)	15.9	200	200	485	0.0024
Steel No20 (Main Bar)	19.9	300	200	430	0.0022
Steel stirrup	8	49.4	190	300	0.0016
GFRP No. 16 (Main Bar)	15.9	198	46 ± 1	731 ± 9	0.016 ± 0.0005
GFRP No. 10	9.5	71.3	65	1770	0.027
GFRP No. 13 (Bent)	12.7	126.7	53	565	0.025

Table 2. Mechanical properties of reinforcing bars

جدول ۳. نتایج تحلیل آزمایشگاهی

	Cracking Load (kN)		Failure Load (kN)		M.R. (%)		Failure Mode
	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	
SSc8d2p	28	27	163	161	19.4	17.5	Rupture of bars
GSu8d2p	24	21	121	121	23	17.6	Concrete crushing
SuR-60-4.5	52	72	207	207	10.1	6.2	Rupture of bars

Table 3. Results in experimental analysis

با قطر ثابت) بوده و مدل‌ها براساس مشخصات مصالح و فرضیه‌های مشابه با تیر آزمایشگاهی GSu-8d/2p، مدل‌سازی شده‌اند با این تفاوت که مقطع به صورت T شکل با ابعاد و مشخصات نمونه SuR-60-4.5 درآمده است. مصالح مسلح کننده در تمام نمونه‌ها از نوع GFRP است. برای بررسی متغیرها، ۳۴ تیر طبق آئین‌نامه (CSA/S806-12(2017) (14) به گونه‌ای طراحی شده‌اند که شکست در اثر خرابی بتن اتفاق بیفتد نه گسیختگی آرماتور. به این ترتیب ۵ دسته تیر مدل‌سازی شده که یک تیر در هر پنج گروه عیناً تکرار شده است.

شکل ۲. رابطه تنش- کرنش مصالح مسلح کننده، (الف) فولاد، (ب) FRP

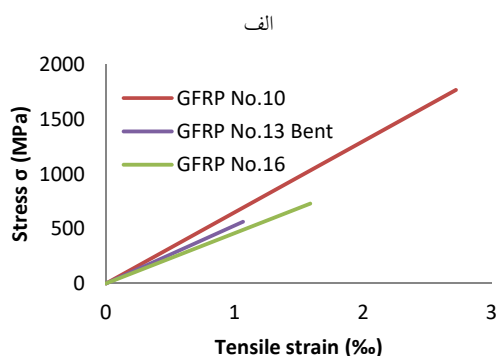
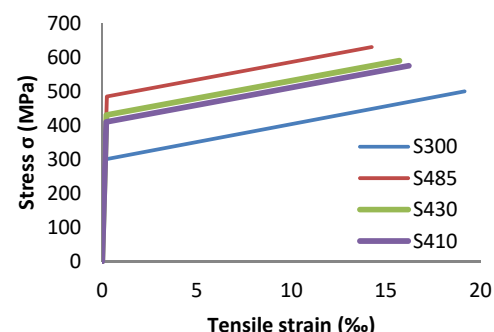


Fig. 2. Stress-strain relationship of reinforcement materials, (a) Steel, (b) FRP

در شکل‌های (۲ و ۳) منحنی تنش- کرنش مصالح مسلح کننده و بتن و در شکل (۴) وضعیت مدل‌های نرم‌افزاری و هندسه آنها قابل مشاهده است.

درستی آزمایشی مدل سازی

مسئله حالت نامعین دارد. مفهوم بازپخش لنگر در رابطه (۱) آمده. به چگونگی استفاده از آن برای یافتن مقدار بازپخش لنگر در ادامه اشاره خواهد شد. رابطه (۲) که حاصل از رابطه (۱) است، اساس نمودارهایی مانند شکل (۹) است. در جدول (۳) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی ۳ تیر آورده شده است.

$$\text{Moment Redistribution (\%)} = \frac{M \text{ after redistribution} - M \text{ before redistribution}}{M \text{ before redistribution}} \times 100 \quad (1)$$

$$R \% = \frac{\left(\frac{P_L}{2} - R_{AL}\right) - \frac{3PL}{16}}{\frac{3PL}{16}} \times 100 \quad (2)$$

$$\rightarrow R \% = \frac{5P - 16R_A}{3P} \times 100$$

مدل، بازپخش لنگر قابل ملاحظه‌ای درست پس از ترک خوردگی از خود نشان می‌دهد. این درصد بازپخش با افزایش مقدار بار تا لحظه شکست، افزایش می‌یابد. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان تیرهای آزمایشگاهی و مدل‌های نرم‌افزاری بر اساس بار متمرکز هر دهانه بر حسب تغییر مکان وسط آن دهانه در شکل (۶) نشان داده شده است. مدل‌سازی، قابلیت پیش‌بینی رفتار خمشی تیر را در حد قابل قبولی داراست. این شکل نشان می‌دهد می‌توان از مدل‌سازی انجام شده در ادامه روند تحقیق استفاده کرد. با این حال مدل‌ها توانایی نشان دادن رفتار پس از شکست بتن را به دلیل مشکلاتی که نرم افزار در همگرایی هنگام آغاز شکست با آن مواجه می‌شود را ندارند.

مطالعه عددی

متغیرهای تحقیق شامل نسبت و تعداد آرماتورهای طولی، نسبت آرماتورهای عرضی و فاصله آنها (یکبار با نسبت ثابت و یکبار

شکل ۵. لنگر خمشی حقیقی و الاستیک در لحظه شکست

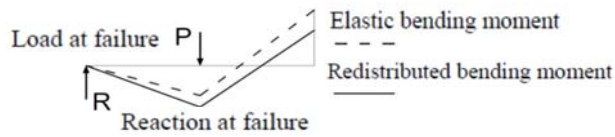


Fig. 5. Actual versus elastic bending moment at failure.

شکل ۶. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی

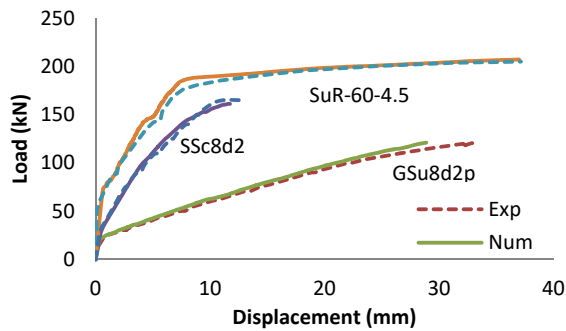


Fig. 6. Load-deflection behavior of verified FEM.

این بدین معنی است که مقطع در تکیه‌گاه میانی که بصورت مستطیلی عمل می‌کند برای لنگر الاستیک PL ۰/۱۸۸ و در وسط دهانه که به دلیل متغیر بودن مقدار تنش در آرماتورها، عملاً عملکرد مستطیلی با عرض b_e دارد، برای لنگر PL ۰/۱۵۶ طراحی می‌شود.

شکل ۷. جزئیات تیر جدید با مقطع T

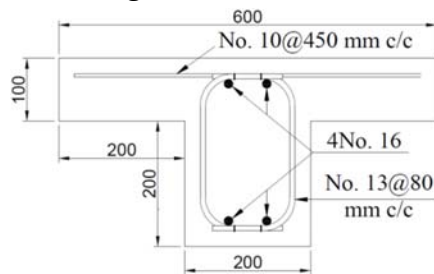
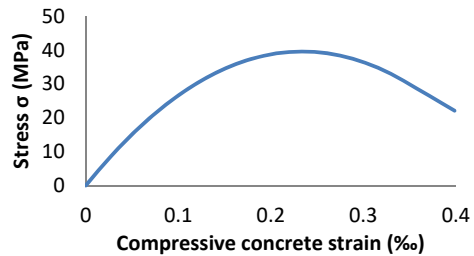


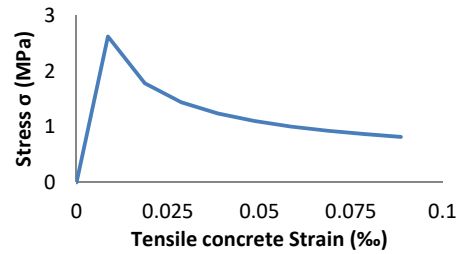
Fig. 7. Details of new T-section beam

وجود اختلاف سختی زیاد بین این دو مقطع موجب می‌شود تا علی‌رغم رفتار مستطیلی تیر در تمام مقاطع، عملکرد آن با تیرهای با مقطع مستطیلی بسیار متفاوت باشد. بازپخش لنگری برابر با ۱۵٪ از تکیه‌گاه میانی به وسط دهانه برای تمام مدل‌ها

شکل ۳. رابطه تنش - کرنش بتن در (الف) فشار، (ب) کشش



الف



ب

Fig. 3. Stress-strain relationship of concrete in (a) compressive and (b) Tension

شکل (۷) مشخصات تیر یاد شده را نشان می‌دهد و در جدول (۴) جزئیات نمونه‌ها آورده شده است. پاسخ‌های حاصل براساس منحنی‌های بار- تغییر مکان و بار- بازپخش لنگر با هم مقایسه شده‌اند. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان تحت شرایط خاصی اجازه بازپخش لنگر در تیرهای سراسری مسلح شده با آرماتورهای فولادی را می‌دهد با این حال، در مورد تیرهای با آرماتور FRP مسکوت است. در سایر آئین‌نامه‌های طراحی حاضر، اجازه در نظر گرفتن بازپخش لنگر در تیرهای سراسری مسلح شده با آرماتورهای FRP داده نشده است.

شکل ۴. هندسه مدل نرم افزاری و وضعیت آرماتورگذاری

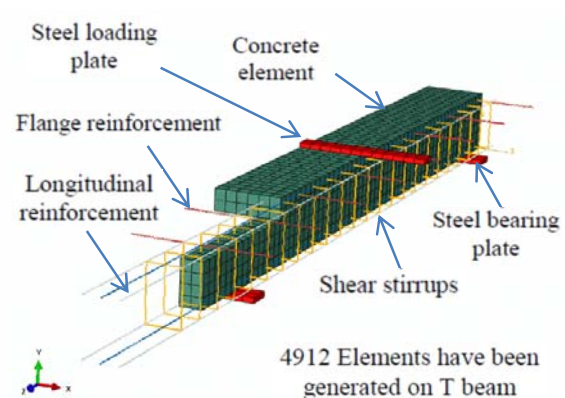


Fig. 4. ABAQUS model geometry and reinforcement configuration.

در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) نمونه‌ای از اشکال و خروجی‌های نرم افزار برای تیر شکل (۷) آورده شده است. مقدار عکس‌العمل تکیه گاهی در تیر را به دو صورت حاصل از تحلیل الاستیک و حاصل از اندازه گیری مستقیم (از نرم افزار) می‌توان یافت. در اثر وجود بازپخش لنگر مقدار حاصل در

تکیه‌گاه کناری متفاوت خواهد بود. در شکل (۹) این اختلاف برای ۴ تیر TRRo ۱ تا ۲,۵ به عنوان نمونه آورده شده است. بسته به اینکه مبنای محاسبه کدام مقدار عکس‌العمل کناری باشد، عدد لنگر در تکیه گاه میانی و وسط دهانه نیز یکسان نیست.

جدول ۴. مشخصات مدل های عددی جدید

Beam	Main Bar ratio (Bot&Top) (%)	Bar spacing (mm)	Transverse Bar ratio (Av/s)	Transverse Bar Spacing (mm)	Parametric Study
TR1Ro	$1\rho_b$				Reinforcement Ratio
TR1.5Ro	$1.5\rho_b$				
TR2Ro	$2\rho_b$				
TR2.5Ro	$2.5\rho_b$	50	3.1675	80	
TR3Ro	$3\rho_b$				
TR3.5Ro	$3.5\rho_b$				
TR4Ro	$4\rho_b$				
TBN2		50			Bar Number
TBN3	$1.5\rho_b$	35	3.1675	80	
TBN4		30			
T1Avm			0.8353		Transverse Reinforcement ratio
T2Avm			1.6706		
T3Avm			2.5059		
T4Avm	$1.5\rho_b$	50	3.3412	80	
T5Avm			4.1765		
T6Avm			5.0118		
T7Avm			5.8471		
T8Avm			6.6824		
TCAvS60				60	Transverse Bar Spacing
TCAvS80				80	
TCAvS100	$1.5\rho_b$	50	3.1675	100	
TCAvS120				120	
TCAvS140				140	
TCAvS160				160	
TCdvS60			4.2233	60	Transverse Bar Size
TCdvS80			3.1675	80	
TCdvS100			2.534	100	
TCdvS120			2.1117	120	
TCdvS140	$1.5\rho_b$	50	1.81	140	
TCdvS160			1.58375	160	
TCdvS180			1.4078	180	
TCdvS200			1.267	200	
TCdvS220			1.1518	220	
TCdvS240			1.05583	240	

Table 4. Characteristics of new numerical models

شکل ۸. تنش در (الف) بتن (ب) آرماتور، تغییر مکان (ج) در امتداد قائم برای تیر TRRo1.5Ro حاصل از نرم افزار

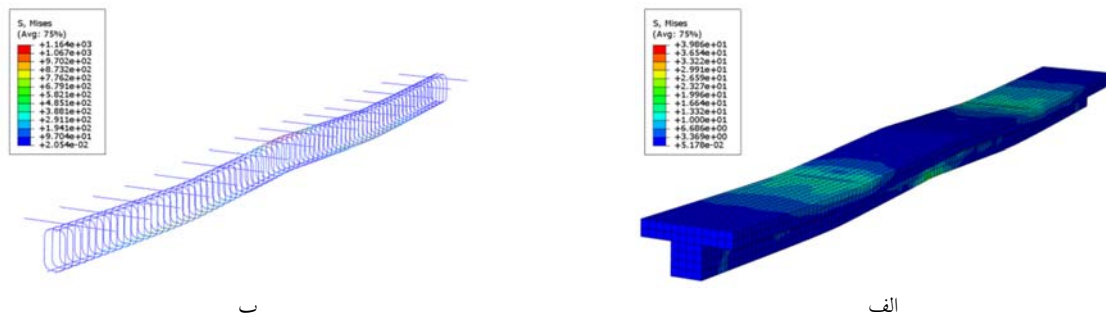


Fig. 10. Numerical and elastic bending moment at failure in 4 beams

با جایگذاری مقادیر لنگر تکیه گاه میانی موجود در شکل، در رابطه (۱ یا ۲)، درصد بازپخش لنگر ارائه شده در شکل (۱۳-ب) برای هر تیر بدست می آید.

نسبت آرماتور طولی

توصیه آئین نامه های طراحی حاضر برای سازه های بتنی مسلح شده با آرماتور FRP (FRP-RC) بر این مبنا استوار است که معیار شکست در نهایت براساس بتن فشاری به جای آرماتور کششی باشد. دکتر مستوفی نژاد یک نسبت آرماتور مابین $2\rho_b$ و $3\rho_b$ که طبق یافته های ایشان، بهترین شکل پذیری را برای تیرهای سراسری (FRP-RC) ایجاد می کند، توصیه کرده است (۱۵). در مطالعه حاضر نسبت های مختلف آرماتور از ρ_b تا $4\rho_b$ مورد بررسی قرار گرفته است. درصد آرماتور در مقاطع مختلف مدل های مورد بررسی در جدول (۵) مشخص شده است. شکل (۱۱) تغییرات رابطه بار- تغییر مکان با نسبت های مختلف ρ/ρ_b را نشان می دهد. در شکل (۱۲) نیز تغییرات رابطه بار- بازپخش لنگر با نسبت های مختلف ρ/ρ_b نشان داده شده است.

جدول ۵. درصد آرماتور در مدل های بررسی آرماتور طولی

Beam	Longitudinal Reinforcement ratio (ρ/ρ_b)	
	Top bars over middle-support	Bottom bars at mid-span
TR1Ro	1	3
TR1.5Ro	1.5	4.5
TR2Ro	2	6
TR2.5Ro	2.5	7.5
TR3Ro	3	9
TR3.5Ro	3.5	10.5
TR4Ro	4	12

Table 5. Reinforcement ratio in TRRo models

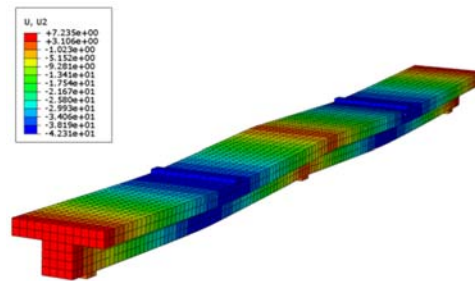


Fig. 8. Stress in (a) Concrete (b) bars, displacement (c) of TR1.5Ro from software

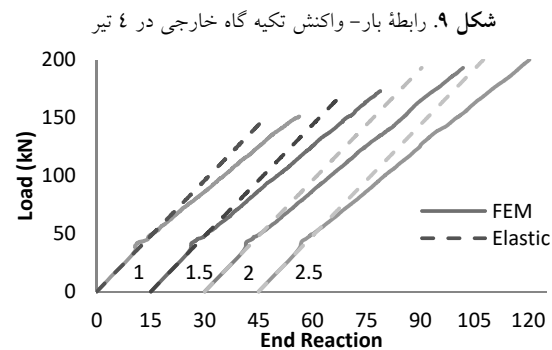
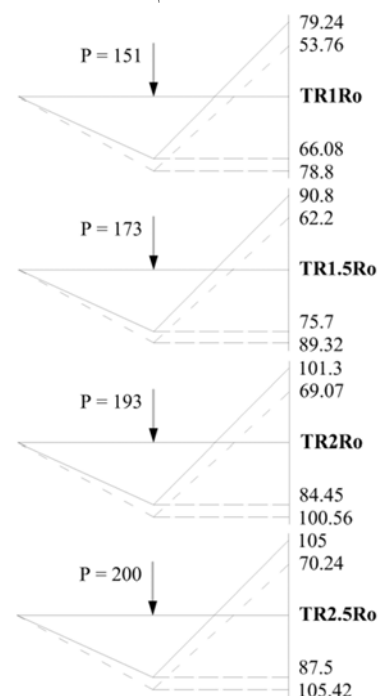


Fig. 9. Load-external reaction relationship of the 4 beams

در شکل (۱۰) نمودار لنگر قبل و بعد از بازپخش، حاصل از نرم افزار، برای چهار تیر یاد شده نشان داده شده است.

شکل ۱۰. لنگر خمشی حاصل از نرم افزار و الاستیک در ۴ تیر



شکل ۱۳. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با نسبت آرماتور طولی

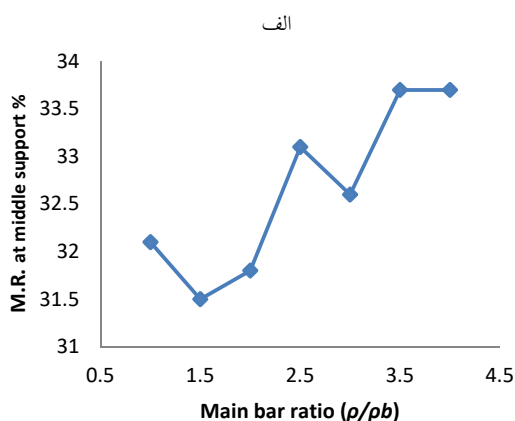
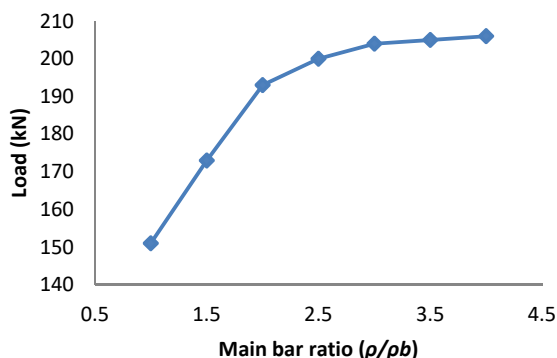


Fig. 13. Variation in (a) load and (b) M.R. with main bar ratio (ρ/ρ_b)

تعداد آرماتور طولی

در شکل (۱۴) رابطه بین بار و تغییر شکل در مدل‌ها زمانی که تعداد آرماتورهای اصلی فوقانی و تحتانی تغییر می‌کند مشاهده می‌شود (مدل‌های TBN). در این مطالعه، با ثابت نگه داشتن درصد آرماتور در بالا و پایین تیر ($1/5\rho_b$) با تغییر تعداد آرماتورها تأثیر این پارامتر در رفتار خمشی و بازپخش لنگر تیر بررسی شده است. در شکل (۱۵ الف و ب) به ترتیب تغییرات ظرفیت بار و بازپخش لنگر با تعداد آرماتورهای اصلی در بالا و پائین تیر مشاهده می‌شود. براساس چینه‌بندی آرماتورها و مقدار پوشش بتن روی آنها، سطح مقطع بتنی درگیر در لغزش آرماتور در حالت ۲ آرماتور بزرگتر از حالت ۳ آرماتور و آن هم بزرگتر از حالت ۴ آرماتور است، بنابراین علی‌رغم وجود سطح مقطع یکسان آرماتور در هر سه مدل، ظرفیت باربری حالت دو آرماتور بالاترین مقدار و حالت ۴ آرماتور کمترین مقدار است.

شکل ۱۱. نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات نسبت آرماتور طولی

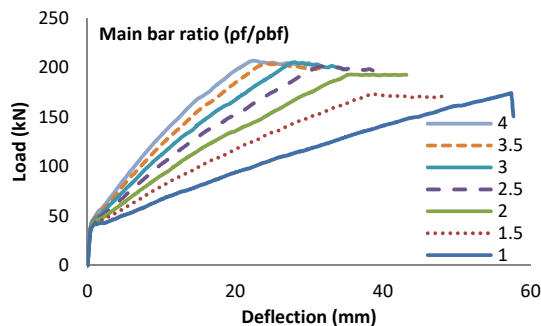


Fig. 11. Variation in load-deflection with main bar ratio (ρ/ρ_b)

شکل ۱۲. نمودار بار- بازپخش لنگر با تغییرات نسبت آرماتور طولی

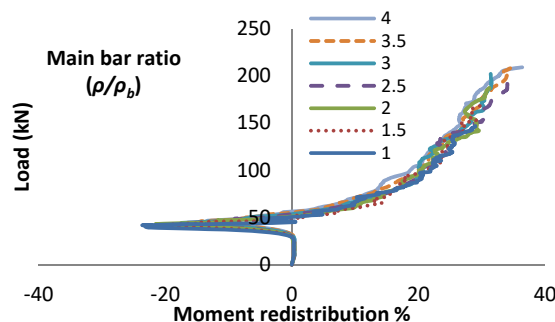


Fig. 12. Variation in load-M.R. with main bar ratio (ρ/ρ_b)

در آغاز بارگذاری، مقطع وسط دهانه قبل از تکیه گاه میانی ترک می‌خورد پس در ابتدا یک بازتوزیع لنگر منفی در شکل مشاهده می‌شود. واضح است که مدل با نسبت آرماتور ρ_b کمترین سختی و ظرفیت بارنهائی را دارد. همانطور که نسبت آرماتور افزایش می‌یابد بهبود قابل ملاحظه‌ای در سختی خمشی و ظرفیت بار نهائی مشاهده می‌شود. افزایش نسبت آرماتور از ρ_b تا $4\rho_b$ مقدار افت الاستیک در وسط دهانه در همان سطح بار را حدود ۷۰٪ کاهش می‌دهد. با این حال نرخ کاهش افت الاستیک برای نسبتهای آرماتور بزرگتر از $2/5\rho_b$ پایین‌تر است. شکل (۱۳) الف و ب به ترتیب رابطه بین نسبت آرماتور طولی با بار و ظرفیت بازپخش لنگر در تکیه‌گاه میانی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه افزایش نسبت آرماتور در محل لنگر مثبت و منفی یکسان در نظر گرفته شده، طبیعی است که میزان بازپخش لنگر تغییر چندانی نکند.

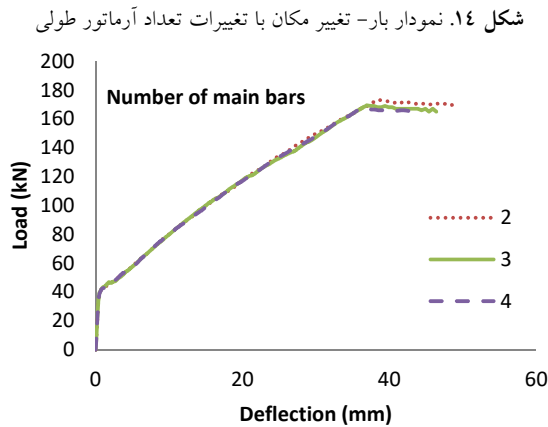


Fig. 14. Variation in load-deflection with number of main bar

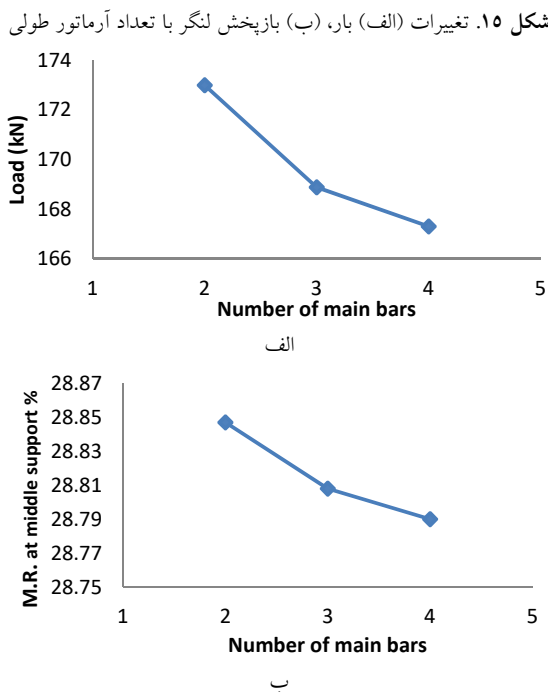


Fig. 15. Variation in (a) load , (b) moment redistribution with main bar number

فاصله آرماتورهای عرضی

در این مطالعه دو فاصله گذاری برای خاموت ها مدنظر قرار گرفته است. نوع اول، فواصل مختلف خاموت با نسبت آرماتور عرضی متغیر و قطر آرماتور ثابت (مدل های TCdVS)، نوع دوم، فواصل مختلف خاموت با نسبت آرماتور عرضی ثابت و قطر متغیر (مدل های TCAVS).

اگرچه روابط لغزش آرماتور درون بتن در این مقاله مد نظر قرار گرفته نشده، همانطور که در شکل مشاهده می شود تفاوت ظرفیت باربری ذکر شده مشهود است. سطح مقطع ناحیه لغزش اطراف آرماتور در حالت های دو و سه آرماتوره بسیار به هم نزدیکند، بنابراین ظرفیت بازپخش لنگر و باربری آنها تقریباً یکسان است. گفتنی است با تغییر تعداد آرماتورها نتیجه قابل ذکری مشاهده نمی شود پس تمام قوانین و اصول مربوط به تعداد آرماتورهای تیرهای S-RC برای تیرهای FRP-RC نیز صادقند. لازم به ذکر است که استفاده از ۴ آرماتور در تیرهای این تحقیق به دلیل محدودیت ابعاد چندان منطقی به نظر نمی رسد.

نسبت آرماتور عرضی

مقدار و وضعیت قرارگیری آرماتورهای عرضی معمولاً تعیین کننده نوع شکست هستند که آیا خمشی است یا برشی. تیرهایی که آرماتورهای عرضی کافی دارند این اجازه را به مقاطع بحرانی خود می دهند تا به بیشترین ظرفیت خمشی خود برسند. در این مطالعه کمترین آرماتور برشی براساس CSA/S806-12(2017) به عنوان مقدار اولیه برای خاموت در نظر گرفته شده است. رفتار خمشی مدل ها با افزایش مقدار آرماتورهای عرضی بررسی شده است (مدل های TAvM). شکل (۱۶) رابطه بار- تغییر مکان با نسبت های مختلف آرماتور عرضی را نشان می دهد. این نسبت از $(\min)A_v$ تا $8(\min)A_v$ تغییر می کند. نتایج نشان می دهند که حتی در $(\min)A_v$ ، شکست تیر توسط برش کنترل می شود و برای رهایی از این نوع شکست نسبت آرماتور عرضی حداقل باید $2(\min)A_v$ باشد. شکل (۱۷) الف و ب) نشان می دهند که نسبت های بزرگتر آرماتورهای عرضی تاثیر قابل ملاحظه ای روی ظرفیت بار و تا حدودی روی بازپخش لنگر تیرها ندارند.

شکل ۱۸. نمودار بار- تغییر مکان با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

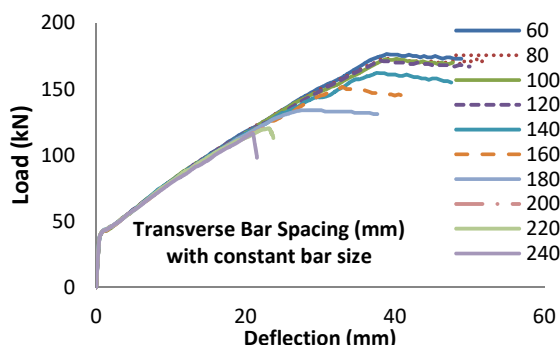


Fig. 18. load-deflection relationship with transverse bar spacing with constant bar size

شکل (۱۸) تغییرات بار- تغییر شکل با فواصل مختلف آرماتور عرضی و قطر ثابت (و در نتیجه نسبت‌های مختلف خاموت) را نشان می‌دهد. استفاده از فواصل بیش از ۱۴۰ میلی‌متر منجر به پائین‌ترین میزان سختی و بارنهائی شکست می‌شود. واضح است که کاهش فاصله خاموت‌ها عرض ترک‌های برشی را کاهش داده و سختی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر با افزایش فاصله خاموت‌ها بیش از مقدار حداکثر مجاز آیین‌نامه (۱۶۰ میلی‌متر)، مقدار بار نهایی شدت کاهش می‌یابد. این امر به دلیل تشکیل ترک‌های برشی قطری مابین فواصل خاموت‌ها است که مشارکت آنها را در مقاومت برشی تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه مدل به دلیل شکست برشی بیش از موعد در المان‌های بتنی مجاور تکیه‌گاه میانی بطور ناگهانی گسیخته می‌شود. تغییرات ظرفیت بار و بازپخش لنگر این مدل‌ها نیز در شکل (۱۹ الف و ب) نمایش داده شده است. مقدار سختی و بار شکست تا فاصله ۱۶۰ میلی‌متر کاهشی است بنابراین، افزایش فواصل خاموت‌ها بدون تغییر نسبت آرماتور عرضی، ظرفیت بار و بازپخش لنگر موجود را کاهش می‌دهد. این امر می‌تواند بدلیل ارتقاء محصورشدگی المان‌های بتن باشد که به نوبه خود باعث بهبود اثر غیرخطی و مقاومت دو محوره آنها می‌شود. با کاهش فواصل از ۱۶۰ میلی‌متر به ۸۰ میلی‌متر درصد بازپخش لنگر ۳۰٪ افزایش می‌یابد، با این حال باید توجه کرد که نرخ افزایش در بازپخش لنگر برای فواصل کوچکتر از ۱۰۰ میلی‌متر بسیار جزئی است. شکل (۱۹) نشان می‌دهد که کاهش فواصل

شکل ۱۶. نمودار بار- تغییر مکان با نسبت‌های مختلف آرماتور عرضی

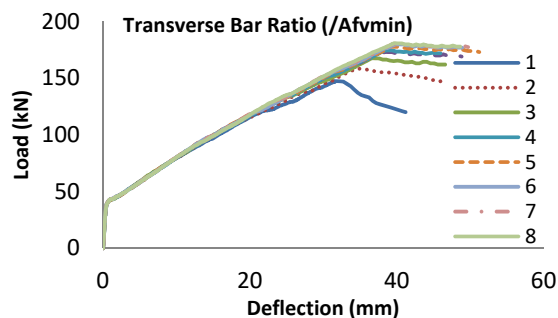


Fig. 16. load-deflection relationship with transverse reinforcement ratio ($A_{v(min)}$)

در گروه اول، حداقل فاصله ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بر طبق آیین‌نامه کانادا (CSA/S806-12(2017) بیشترین فاصله تعریف شده مابین خاموت‌ها برای ابعاد مدل‌های حاضر ۱۶۰ میلی‌متر است. ولی برای بررسی بیشتر حداکثر فاصله بین خاموت‌ها در بیشترین حالت ۲۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در گروه دوم، کمترین فاصله ۶۰ میلی‌متر و بیشترین آن ۱۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۷. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر نسبت آرماتور عرضی

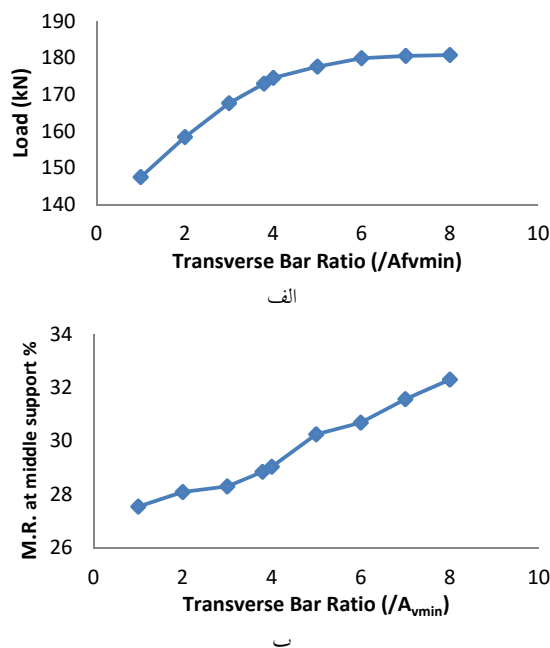


Fig. 17. Variation in (a) load and (b) moment redistribution with transverse reinforcement ratio

کرد که نرخ افزایش در بازپخش لنگر برای فواصل کوچکتر از ۱۰۰ میلی متر بسیار جزئی است.

شکل ۲۰. نمودار بار- تغییر مکان با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

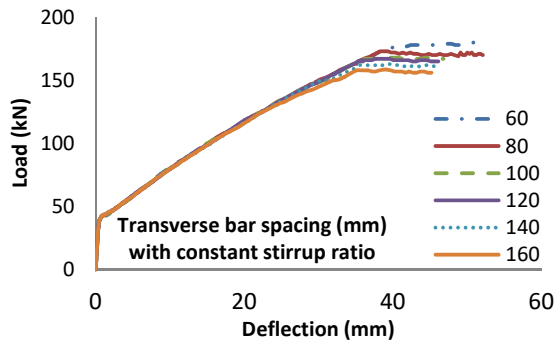


Fig. 20. load-deflection relationship with transverse bar spacing with constant stirrup ratio

شکل ۲۱. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

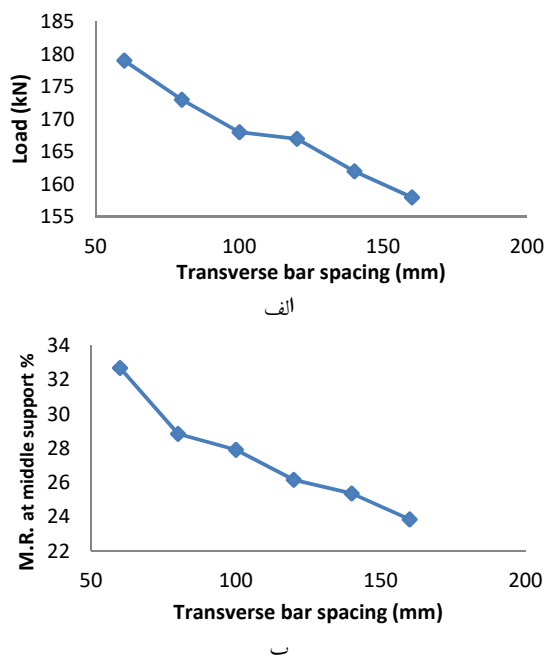


Fig. 21. load and moment redistribution relationship with transverse bar spacing with constant stirrup ratio

نتایج

تحقیق حاضر، یک مدل سازی المان محدود (با استفاده از نرم افزار ABAQUS) برای بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی سراسری T شکل با آرماتورهای GFRP است که قابلیت

خاموت ها کمتر از ۱۶۰ میلی متر تاثیر مثبت قابل ملاحظه ای روی ظرفیت بازپخش لنگر موجود دارد. این تاثیر در فواصل بیش ۱۶۰ میلیمتر قابل چشم پوشی است. شکل (۲۰) بیانگر رابطه بار- تغییر مکان مدل ها با فاصله خاموت های متفاوت و نسبت آرماتور عرضی ثابت (قطر خاموت متفاوت) است. با افزایش فاصله خاموت ها تغییر شکل تیر برای بارگذاری ثابت افزایش می یابد. تغییرات ظرفیت بار و بازپخش لنگر این مدل ها نیز در شکل (۲۱ الف و ب) نمایش داده شده است.

شکل ۱۹. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

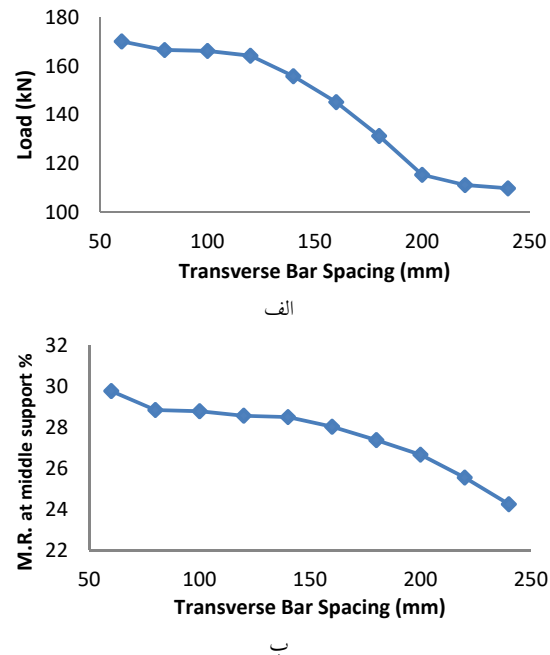


Fig. 19. (a) load and (b) moment redistribution relationship with transverse bar spacing with constant bar size

مقدار سختی و بار شکست تا فاصله ۱۶۰ میلی متر کاهش می دهد. بنابراین، افزایش فواصل خاموت ها بدون تغییر نسبت آرماتور عرضی، ظرفیت بار و بازپخش لنگر موجود را کاهش می دهد. این امر می تواند بدلیل ارتقاء محصورشدگی المان های بتن باشد که به نوبه خود باعث بهبود اثر غیرخطی و مقاومت دو محوره آنها می شود. با کاهش فواصل از ۱۶۰ میلی متر به ۸۰ میلی متر درصد بازپخش لنگر ۳۰٪ افزایش می یابد، با این حال باید توجه

- [2] ACI Committee 440. 2006. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-06. American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [3] El-Mogy, M., El-Ragaby, A., and El-Salakawy, E. 2010. Flexural Behavior of Continuous FRP-Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, pp. 669-680.
- [4] El-Mogy, M., El-Ragaby, A. and El-Salakawy, E. (2011), Effect of Transverse Reinforcement on the Flexural Behavior of Continuous Concrete Beams Reinforced with FRP, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 5, pp. 672-681.
- [5] Mahmoud, K. and El-Salakawy, E. 2014. Shear Strength of GFRP-Reinforced Concrete Continuous Beams with Minimum Transverse Reinforcement. *Journal of Composite for Construction*, 18 (1), 04013018.
- [6] Mahmoud, K. and El-Salakawy, E. 2016. Effect of Transverse Reinforcement Ratio on the Shear Strength of GFRP-RC Continuous Beams. *Journal of Composite for Construction*, 20 (1): 04015023.
- [7] Kara, I. F. and Ashour, A. F. 2013. Moment Redistribution in Continuous FRP Reinforced Concrete Beams. *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 939-948.
- [8] Rahman, H., El-Salakawy, E. 2016. Serviceability and moment redistribution of GFRP-RC continuous beams with T-section. 7th International conference on advanced composite materials in bridges and structures. (2016).
- [9] Rahman, H., El-Salakawy, E. 2016. Moment Redistribution of GFRP-RC Continuous T-beams. RESILIENT INFRASTRUCTURE, London, 1-4, June 2016.
- [10] Basa, N., Ulicevic, M., and Zejak. R., 2018. Experimental Research of Continuous Concrete Beams with GFRP Reinforcement. *Advanced in Civil Engineering*, Vol. 5, pp. 1-16.
- [11] Basa, N., Vukovic, N. K., Ulicevic, M., and Uhadinovic. M., 2020. Effects of Internal Force Redistribution on the Limit State of Continuous Beams with GFRP Reinforcement. *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 3973.
- [12] Abaqus/CAE 2017. Abaqus analysis user's manual. Dassault Systemes, 2016.
- [13] El-Mogy, M., El-Ragaby, A., El-Salakawy, E. 2013. Experimental testing and finite element modeling on continuous concrete beams reinforced with fibre reinforced polymer bars

پیش‌بینی بار نهایی و ظرفیت بازپخش لنگر را با دقت قابل قبولی دارد. به دلیل مشکل همگرایی، مدل توانایی پیش‌بینی پاسخ، پس از شکست بتن را ندارد. در این مطالعه رفتار لغزشی بتن و آرماتور در نظر گرفته نشده است. نتایج زیر قابل ارائه هستند:

(۱) با افزایش نسبت آرماتور طولی در بالا و پائین مدل‌ها، افزایش چشم‌گیری در رفتار خمشی مشاهده می‌شود. نسبت آرماتور مابین $2/5\rho_b$ تا $3/5\rho_b$ دارای بیشترین شکل پذیری و ظرفیت بار است، ولی به دلیل ثابت بودن نسبت آرماتور مثبت به منفی، با افزایش درصد آرماتور، تغییر چندانی در ظرفیت بازپخش لنگر مشاهده نمی‌شود.

(۲) با افزایش تعداد آرماتور در حالی که نسبت آرماتور طولی ثابت است، به دلیل بحث پیوستگی، ظرفیت باربری و بازپخش لنگر کاهش می‌یابد. پس عملکرد تیرها با آرماتور GFRP از این نظر، مشابه تیرهای معمولی است و قوانین آرماتورگذاری فولادی در این تیرها بهتر است رعایت شود.

(۳) به نظر می‌رسد مقدار آرماتور عرضی حداقل مورد نظر آیین‌نامه (CSA/S806-12(2017) برای جلوگیری از شکست برشی تیرهای FRP-RC با مقطع T شکل تحت لنگر خمشی، کافی نباشد. مطالعات جدیدی در این مورد می‌تواند صورت گیرد.

(۴) افزایش فاصله آرماتورهای عرضی بدون تغییری در نسبت این آرماتورها، تاثیر منفی روی ظرفیت باربری و بازپخش لنگر تیرهای بتنی FRP-RC با مقطع T شکل دارد. با این حال در فواصل کم ($d/2$) این تاثیر قابل ملاحظه نیست از سوی دیگر در فواصل بزرگتر از $2d/3$ حضور آرماتور عرضی قابل چشم پوشی است و تیر مانند یک مقطع بدون خاموت عمل می‌کند. عملکرد برشی تیرهای T شکل بتنی سراسری دارای آرماتور GFRP می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Pawlowski, D., Szumigala, M. 2015. Flexural behavior of full-scale basalt FRP RC beams experimental and numerical studies. *Journal of Procedia Engineering* 108(2015) 518-525.

and stirrups. *Can. J. Civ. Eng.* 40: 1091-1102 (2013).

- [14] CSA. 2012. Design and construction of building components with fibre reinforced polymers, CSA Standard S806-12(2017), Canadian Standards Association, Rexdale (Toronto), Ontario, Canada.
- [15] Mostofinejad, D. 1997. Ductility and moment redistribution in continuous FRP reinforced concrete beams. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario.

شکل ۱. جزئیات تیرهای صحت سنجی

شکل ۲. رابطه تنش - کرنش مصالح مسلح کننده، (الف) فولاد، (ب) FRP

شکل ۳. رابطه تنش - کرنش بتن در (الف) فشار، (ب) کشش

شکل ۴. هندسه مدل نرم افزاری و وضعیت آرماتورگذاری

شکل ۵. لنگر خمشی حقیقی و الاستیک در لحظه شکست

شکل ۶. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی

شکل ۷. جزئیات تیر جدید با مقطع T شکل

شکل ۸. تنش در (الف) بتن (ب) آرماتور، تغییر مکان (ج) در امتداد قائم برای تیر $TRo1.5Ro$ حاصل از نرم افزار

شکل ۹. رابطه بار- واکنش تکیه گاه خارجی در ۴ تیر

شکل ۱۰. لنگر خمشی حاصل از نرم افزار و الاستیک در ۴ تیر

شکل ۱۱. نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات نسبت آرماتور طولی

شکل ۱۲. نمودار بار- بازپخش لنگر با تغییرات نسبت آرماتور طولی

شکل ۱۳. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با نسبت آرماتور طولی

شکل ۱۴. نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات تعداد آرماتور طولی

شکل ۱۵. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تعداد آرماتور طولی

شکل ۱۶. نمودار بار- تغییر مکان با نسبتهای مختلف آرماتور عرضی

شکل ۱۷. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر نسبت آرماتور عرضی

شکل ۱۸. نمودار بار- تغییر مکان با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

شکل ۱۹. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

شکل ۲۰. نمودار بار- تغییر مکان با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

شکل ۲۱. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

Moment Redistribution in Continuous Concrete T-section Beams reinforced with GFRP Bars with FEM

Ali Modabber Saeed¹, Mohammadali Lotfollahi Yaghin^{2*}, Ahmad Maleki³

1. Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh,

2. Ph.D. Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3. Ph.D. Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh,

Abstract

Reinforced concrete structures with standard steel rebar are vulnerable to corrosion and harsh environmental conditions, hence RC structures reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) rebar were commonly used these days. Due to FRP rebar's better performance such as high strength, low self-weight, electromagnetic transparency and, as mentioned, non-corrodibility nature, using them as reinforcing bar is very widespread now. Because of financial matters, between different kinds of FRPs, GFRP is a better choice. Considering GFRP's high strength and elastic behavior until failure, Although a large amount of reinforcement ratio is needed in composite beam components, the flexural stiffness of GFRP rebar reinforced beams is relatively lower compared to steel-RC, and more deflection and cracking are allowed in the serviceability design of these beams. Recently, shear and flexural behavior of continuous concrete beams reinforced with GFRP bars has been well investigated. Because of linear elastic behavior of GFRP materials until failure, considering moment redistribution in analysis and design of these beams is not allowed in almost all of codes and guidelines. Although many experimental and numerical researches investigated the moment redistribution in FRP-RC continuous beams with rectangular section, the behavior of these beams with T-section is almost unknown. This paper is a numerical investigation of existence and variety of moment redistribution in concrete continuous T-section beams reinforced with GFRP bars using finite element method with ABAQUS software. The verification of numerical models was done with some experimental beams, so the simulation can be used for further researches. The considering variables included the longitudinal reinforcement percentage, the number of main bars with constant bar ratio, transverse reinforcement ratio, stirrup space with constant ratio and constant bar size. For investigating mentioned parameters, 35 beams were modeled in software according to Canadian design and construction of building structures with FRP code, so 5 groups of beams were made which one beam is constant in each group. T-section beams were modeled assuming which failure happens because of concrete crushing not rebar failure. Deflection and serviceability were not interested, so bond-slippage behavior of GFRP rebar with concrete is not considered in modeling. Problem is indeterminate, so the percentage of moment redistribution was determined by comparing the reactions resulted from numerical and elastic analysis. Load-deflection and load-moment redistribution curves were used to discuss. The results show, as there is in steel-RC structures, moment redistribution exist in GFRP-RC continuous beams with T-section; however the amount of it is lower. Amount of bars between 2.5 times of balance reinforcement ratio and 3.5 times of it, in top and bottom of beam, shows the highest flexibility load and moment redistribution capacity. Increasing the number of main bars with constant reinforcement ratio and increasing the stirrup space with constant transverse reinforcement ratio reduce the moment redistribution capacity. It seems that the minimum amount of transverse reinforcement considered in Canadian code is not enough for preventing shear failure in these beams. So, with considering some points, the moment redistribution can be taken to account in analysis and design of GFRP-RC continuous beams with T-section.

Keywords: reinforced concrete, continuous beams, GFRP bar, T-section, moment redistribution, finite element method,