****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست دوم، شماره 1، سال14001

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

**علی مدبرسعید 1، محمد علی لطف الهی یقین**\* **2، احمد ملکی 3**

1. دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه
2. استاد، دانشکدۀ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
3. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه

[**lotfollahi@tabrizu.ac.ir**](mailto:lotfollahi@tabrizu.ac.ir)

**تاریخ دریافت: 02/02/99 تاریخ پذیرش 27/08/99**

**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، فاصلۀ خاموت با درصد ثابت و فاصلۀ 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.

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

**مقدمه**

با توجه به هزینه‌های بالای مرمت و بازسازی سازه‌ها، دوام و مقاومت در برابر شرائط جوی یکی از پارامترهای مهم طراحی است. آرماتورهای استاندارد فولادی در برابر خوردگی مقاومت چندانی ندارند پس سازه­های بتن آرمه معمولی موجود در برابر شرائط جوی شدید و بسیار شدید، ضعیف و آسیب پذیرند. آرماتورهای FRP در برابر خوردگی مقاومند و در برابر میدانهای مغناطیسی کاملا 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، 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 (مانندACI 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 قبلا 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 تقریبا 23% 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 Mahmoodدر 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 فاصلۀ 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 اندازۀ 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 6 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 اساس صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از مطالعۀ El-Mogy و همکاران (13) و Rahman و El-Salakawy (8) ساخته شده­اند. شکل (1) مشخصات 3 تیر آزمایشگاهی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار برای انجام درستی‌آزمایی را نشان می­دهد.

**مشخصات مدلها**

طول مدل‌ها 6000 میلی‌متر با دو دهانه برابر به طول 2800 میلی‌متر است. نمونه­ها تحت بارگذاری متمرکز در وسط هر یک از دهانه­ها مطابق شکل (1) قرار دارند. مشخصات مدل‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی برای درستی‌آزمایی در جدول (1) آورده شده است. **شکل**

**1.** جزئیات تیرهای صحت سنجی



**Fig. 1.** Details of verification beams

**مشخصات مصالح و مدل سازی نرم افزاری**

در این پژوهش، بتن، با استفاده از مدلConcrete Damage Plasticity (CDP) و با استفاده از المان‌های آجری خطی 8 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 خرپایی دو نقطه­ای خطی سه بعدی (T3D2) مدل‌سازی شده که قابلیت مدل‌سازی تغییر شکل­های غیرخطی و پلاستیک را دارند. ابعاد مش‌بندی برای کلیه پارت‌ها 50 در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته این مصالح دقیقا براساس نمونه­های آزمایشگاهی طبق جدول (2) در نظر گرفته شده است.

**جدول 1.** مشخصات مکانیکی مصالح تیرها

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Beam | Bar material | Flexural bars | | Transverse stirrups  ( = /bs) | Concrete characteristics (MPa) | |
| Top | Bottom |  |  |
| SSc-8d/2p | Steel | 3No.15M | 4No.15M | 8-mm@120 (Steel) = 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) = 0.3% | 43 | 2.62 |

**Table 1.** mechanical properties of beams

**جدول 2.** مشخصات مکانیکی آرماتورهای مسلح کننده

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bar Type | Bar Diameter (mm) | Bar Area (mm2) | 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 3.** نتایج تحلیل آزمایشگاهی

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Cracking Load (kN) | | Failure Load (kN) | | M.R. (%) | | Failure Mode |
| Exp. | Num. | 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

در شکل‌های (2 و 3) منحنی تنش- کرنش مصالح مسلح کننده و بتن و در شکل (4) وضعیت مدل‌های نرم‌افزاری و هندسه آنها قابل مشاهده است.

**درستی‌آزمایی مدل سازی**

مسئله حالت نامعین دارد. مفهوم بازپخش لنگر در رابطه (1) آمده. به چگونگی استفاده از آن برای یافتن مقدار بازپخش لنگر در ادامه اشاره خواهد شد. رابطه (2) که حاصل از رابطه (1) است، اساس نمودارهایی مانند شکل (9) است. در جدول (3) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی 3 تیر آورده شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| Moment Redistribution (%) =  × 100 | (1) |
| R % = × 100  → R % = × 100 | (2) |

مدل، بازپخش لنگر قابل ملاحظه­ای درست پس از ترک خوردگی از خود نشان می­دهد. این درصد بازپخش با افزایش مقدار بار تا لحظۀ شکست، افزایش می­یابد. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان تیرهای آزمایشگاهی و مدل­های نرم افزاری بر اساس بار متمرکز هر دهانه بر حسب تغییر مکان وسط آن دهانه در شکل (6) 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 توانائی نشان دادن رفتار پس از شکست بتن را به دلیل مشکلاتی که نرم افزار در همگرائی 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 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، 34 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 5 دسته تیر مدلسازی شده که یک تیر در هر پنج گروه عینا تکرار شده است.

**شکل 2.** رابطۀ تنش- کرنش مصالح مسلح کننده، (الف) فولاد، (ب) FRP

الف

ب

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

**شکل 3.** رابطۀ تنش- کرنش بتن در (الف) فشار، (ب) کشش

الف

ب

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

شکل (7) مشخصات تیر یاد شده را نشان می­دهد و در جدول (4) 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 4.** هندسه مدل نرم افزاری و وضعیت آرماتورگذاری



**Fig. 4.** ABAQUS model geometry and reinforcement configuration.

**شکل 5.** لنگر خمشی حقیقی و الاستیک در لحظۀ شکست





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

**شکل 6.** 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 188/0 و در وسط دهانه که به دلیل متغیر بودن مقدار تنش در آرماتورها، عملا عملکرد مستطیلی با عرض be دارد، برای لنگر PL 156/0 طراحی می­شود.

**شکل 7.** جزئیات تیر جدید با مقطع T شکل



**Fig. 7.** Details of new T-section beam

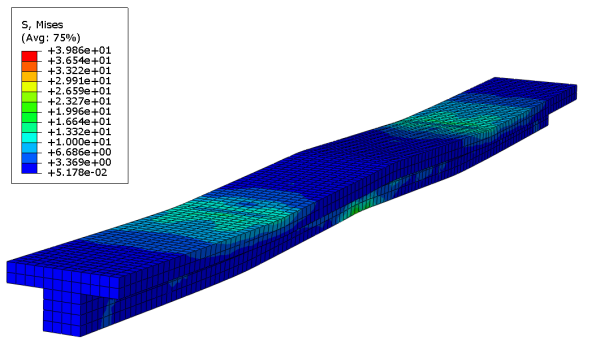
وجود اختلاف سختی زیاد بین این دو مقطع موجب می­شود تا علی‌رغم رفتار مستطیلی تیر در تمام مقاطع، عملکرد آن با تیرهای با مقطع مستطیلی بسیار متفاوت باشد. بازپخش لنگری برابر با 15% از تکیه­گاه میانی به وسط دهانه برای تمام مدل ها در نظر گرفته شده است. در شکل (8) نمونه­ای از اشکال و خروجی‌های نرم افزار برای تیر شکل (7) 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 (9) این اختلاف برای 4 تیر TRRo 1 تا 2.5 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 4.** مشخصات مدل های عددی جدید

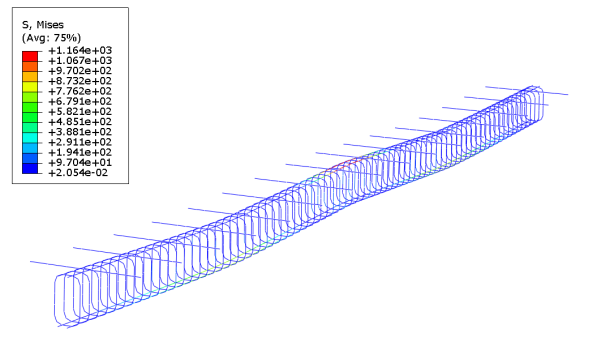
|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Parametric Study | Transverse Bar Spacing (mm) | Transverse Bar ratio (Av/s) | Bar spacing (mm) | Main Bar ratio (Bot&Top) (*%*) | Beam |
| Reinforcement Ratio | 80 | 3.1675 | 50 | 1 | TR1Ro |
| 1.5 | TR1.5Ro |
| 2 | TR2Ro |
| 2.5 | TR2.5Ro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

**Table 4.** Characteristics of new numerical models

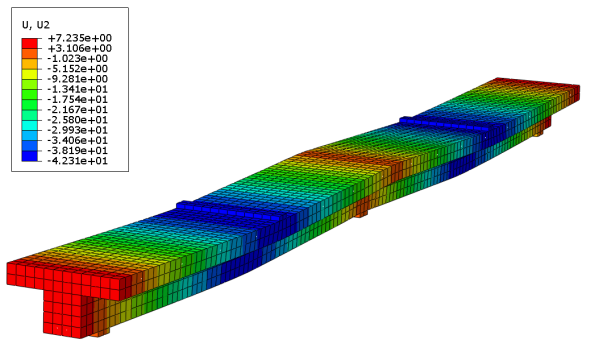
**شکل 8.** تنش در (الف) بتن (ب) آرماتور، تغییر مکان (ج) در امتداد قائم برای تیر TRo1.5Ro حاصل از نرم افزار

****

الف

****

ب



ج

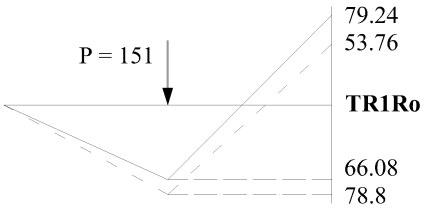
**Fig. 8.** Stress in (a) Concrete (b) bars, displacement (c) of TR1.5Ro from software

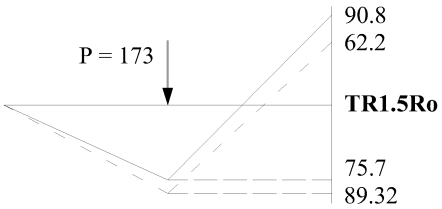
**شکل 9.** رابطۀ بار- واکنش تکیه گاه خارجی در 4 تیر

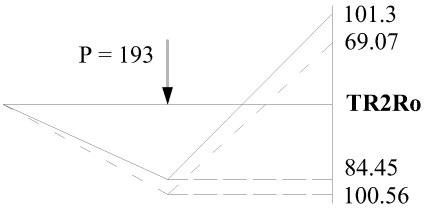
**Fig. 9.** Load-exterior reaction relationship of the 4 beams

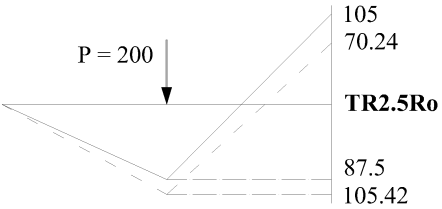
در شکل (10) نمودار لنگر قبل و بعد از بازپخش، حاصل از نرم‌افزار، برای چهار تیر یاد شده نشان داده شده است.

**شکل 10.** لنگر خمشی حاصل از نرم افزار و الاستیک در 4 تیر

****

****

****

****

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

با جایگذاری مقادیر لنگر تکیه گاه میانی موجود در شکل، در رابطه (1 یا 2)، درصد بازپخش لنگر ارائه شده در شکل (13- ب) برای هر تیر بدست می­آید.

**نسبت آرماتور طولی**

توصیه آئین نامه­های طراحی حاضر برای سازه­های 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 و 3 که طبق یافته­های ایشان، بهترین شکل پذیری را برای تیرهای سراسری (FRP-RC) ایجاد می­کند، توصیه کرده است (15). در مطالعه حاضر نسبت­های مختلف آرماتور از 1 تا 4 مورد بررسی قرار گرفته است. درصد آرماتور در مقاطع مختلف مدل­های مورد بررسی در جدول (5) مشخص شده است. شکل (11) تغییرات رابطۀ بار- تغییر مکان با نسبت‌های مختلف را نشان می­دهد. در شکل (12) نیز تغییرات رابطه بار- بازپخش لنگر با نسبت‌های مختلف نشان داده شده است.

**جدول 5.** درصد آرماتور در مدل‌های بررسی آرماتور طولی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Beam | Longitudinal Reinforcement ratio (*ρ*/) | |
| 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

**شکل 11.** نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات نسبت آرماتور طولی

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

**شکل 12.** نمودار بار- بازپخش لنگر با تغییرات نسبت آرماتور طولی

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

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 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 1 تا 4 مقدار افت الاستیک در وسط دهانه در همان سطح بار را حدود 70% کاهش می­دهد. با این حال نرخ کاهش افت الاستیک برای نسبتهای آرماتور بزرگتر از 5/2 پایین­تر است. شکل (13) 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.

**شکل 13.** تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با نسبت آرماتور طولی

الف

ب

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

**تعداد آرماتور طولی**

در شکل (14) رابطه بین بار و تغییر شکل در مدل­ها زمانی که تعداد آرماتورهای اصلی فوقانی و تحتانی تغییر می­کند مشاهده می­شود (مدل های TBN). در این مطالعه، با ثابت نگه داشتن درصد آرماتور در بالا و پایین تیر (5/1) با تغییر تعداد آرماتورها تاثیر این پارامتر در رفتار خمشی و بازپخش لنگر تیر بررسی شده است. در شکل (15 الف و ب) به ترتیب تغییرات ظرفیت بار و بازپخش لنگر با تعداد آرماتورهای اصلی در بالا و پائین تیر مشاهده می­شود. براساس چینش آرماتورها و مقدار پوشش بتن روی آنها، سطح مقطع بتنی درگیر در لغزش آرماتور در حالت 2 آرماتور بزرگتر از حالت 3 آرماتور و آن هم بزرگتر از حالت 4 آرماتور است، بنابراین علی رغم وجود سطح مقطع یکسان آرماتور در هر سه مدل، ظرفیت باربری حالت دو آرماتور بالاترین مقدار و حالت 4 آرماتور کمترین مقدار است.

اگرچه روابط لغزش آرماتور درون بتن در این مقاله مد نظر قرار گرفته نشده، همانطور که در شکل مشاهده می­شود تفاوت طرفیت باربری ذکر شده مشهود است. سطح مقطع ناحیه لغزش اطراف آرماتور در حالتهای دو و سه آرماتوره بسیار به هم نزدیکند، بنابراین ظریفت بازپخش لنگر و باربری آنها تقریبا یکسان است. گفتنی است با تغییر تعداد آرماتورها نتیجه قابل ذکری مشاهده نمی­شود 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 4 آرماتور در تیرهای این تحقیق به دلیل محدودیت ابعاد چندان منطقی به نظر نمی‌رسد.

**نسبت آرماتور عرضی**

مقدار و وضعیت قرارگیری آرماتورهای عرضی معمولا تعیین کننده نوع شکست هستند که آیا خمشی است یا برشی. تیرهایی که آرماتورهای عرضی کافی دارند این اجازه را به مقاطع بحرانی خود می­دهند 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 (مدل‌های TAvm). شکل (16) رابطه بار- تغییر مکان با نسبت‌های مختلف آرماتور عرضی را نشان می­دهد. این نسبت از (min) تا (min)8 تغییر می­کند. نتایج نشان می­دهند که حتی در (min)، شکست تیر توسط برش کنترل می­شود و برای رهائی از این نوع شکست نسبت آرماتور عرضی حداقل باید (min)2 باشد. شکل (17 الف و ب) نشان می­دهند که نسبت‌های بزرگتر آرماتورهای عرضی تاثیر قابل ملاحظه­ای روی ظرفیت بار و تا حدودی روی بازپخش لنگر تیرها ندارند.

**شکل 14.** نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات تعداد آرماتور طولی

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

**شکل 15.** تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تعداد آرماتور طولی

الف

ب

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

**فاصله آرماتورهای عرضی**

در این مطالعه دو فاصله­گذاری برای خاموت­ها 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 (مدل‌های TCAvS).

**شکل 16.** نمودار بار- تغییر مکان با نسبت‌های مختلف آرماتور عرضی

**Fig. 16.** load-deflection relationship with transverse reinforcement ratio(/)

در گروه اول، حداقل فاصله 60 میلی متر در نظر گرفته شده است. بر طبق آیین‌نامه کانادا CSA/S806-12(2017) بیشترین فاصله تعریف شده مابین خاموت­ها برای ابعاد مدل­های حاضر 160 میلی متر است. ولی برای بررسی بیشتر حداکثر فاصله بین خاموت­ها در بیشترین حالت 240 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در گروه دوم، کمترین فاصله 60 میلی‌متر و بیشترین آن 160 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

**شکل 17**. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر نسبت آرماتور عرضی

الف ب

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

**شکل 18.** نمودار بار- تغییرمکان با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

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

شکل (18) 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 140 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 فاصلۀ خاموت­ها بیش از مقدار حداکثر مجاز آئین­نامه (160 میلی‌متر)، مقدار بار نهایی بشدت 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 (19 الف و ب) نمایش داده شده است. مقدار سختی و بار شکست تا فاصله 160 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 160 میلی‌متر به 80 میلی‌متر درصد بازپخش لنگر 30% افزایش می­یابد، با این حال باید توجه کرد که نرخ افزایش در بازپخش لنگر برای فواصل کوچکتر از 100 میلی‌متر بسیار جزئی است. شکل (19) نشان می­دهد که کاهش فواصل خاموت­ها کمتر از 160 میلی‌متر تاثیر مثبت قابل ملاحظه­ای روی ظرفیت بازپخش لنگر موجود دارد. این تاثیر در فواصل بیش 160 میلیمتر قابل چشم پوشی است. شکل (20) بیانگر رابطه بار- تغییر مکان مدل­ها با فاصله خاموت­های متفاوت و نسبت آرماتور عرضی ثابت (قطر خاموت متفاوت) است. با افزایش فاصله خاموت­ها تغییر شکل تیر برای بارگذاری ثابت افزایش می­یابد. تغییرات ظرفیت بار و بازپخش لنگر این مدل­ها نیز در شکل (21 الف و ب) نمایش داده شده است.

**شکل 19.** تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

الفب

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

مقدار سختی و بار شکست تا فاصله 160 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 160 میلی‌متر به 80 میلی‌متر درصد بازپخش لنگر 30% افزایش می­یابد، با این حال باید توجه کرد که نرخ افزایش در بازپخش لنگر برای فواصل کوچکتر از 100 میلی‌متر بسیار جزئی است.

**شکل 20.** نمودار بار- تغییرمکان با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است

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

**شکل 21.** تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

**ا**لف ب

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

**نتایج**

تحقیق حاضر، یک مدل‌سازی المان محدود (با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS) برای بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی سراسری T شکل با آرماتورهای GFRP است که قابلیت پیش‌بینی بار نهایی و ظرفیت بازپخش لنگر را با دقت قابل قبولی دارد. به دلیل مشکل همگرائی، مدل توانائی 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:

1) با افزایش نسبت آرماتور طولی در بالا و پائین مدل‌ها، افزایش چشم‌گیری در رفتار خمشی مشاهده می‌شود. نسبت آرماتور مابین 5/2 تا 5/3 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.

2) 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.

3) به نظر می­رسد مقدار آرماتور عرضی حداقل مورد نظر آئین‌نامه 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.

4) 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.
  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 and stirrups. *Can. J. Civ. Eng.* 40: 1091-1102 (2013).
  14. CSA. 2012. Design and construction of building components with fibrereinforced 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 1. جزئیات تیرهای صحت سنجی

شکل 2. رابطۀ تنش- کرنش مصالح مسلح کننده، (الف) فولاد، (ب) FRP

شکل 3. رابطۀ تنش- کرنش بتن در (الف) فشار، (ب) کشش

شکل 4. هندسه مدل نرم افزاری و وضعیت آرماتورگذاری

شکل 5. لنگر خمشی حقیقی و الاستیک در لحظۀ شکست

شکل 6. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان مدل­های عددی و نمونه­های آزمایشگاهی

شکل 7. جزئیات تیر جدید با مقطع T شکل

شکل 8. تنش در (الف) بتن (ب) آرماتور، تغییر مکان (ج) در امتداد قائم برای تیر TRo1.5Ro حاصل از نرم افزار

شکل 9. رابطۀ بار- واکنش تکیه گاه خارجی در 4 تیر

شکل 10. لنگر خمشی حاصل از نرم افزار و الاستیک در 4 تیر

شکل 11. نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات نسبت آرماتور طولی

شکل 12. نمودار بار- بازپخش لنگر با تغییرات نسبت آرماتور طولی

شکل 13. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با نسبت آرماتور طولی

شکل 14. نمودار بار- تغییر مکان با تغییرات تعداد آرماتور طولی

شکل 15. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تعداد آرماتور طولی

شکل 16. نمودار بار- تغییر مکان با نسبتهای مختلف آرماتور عرضی

شکل 17. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر نسبت آرماتور عرضی

شکل 18. نمودار بار- تغییرمکان با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

شکل 19. تغییرات (الف) بار، (ب) بازپخش لنگر با تغییر فاصله خاموت (سطح مقطع خاموت ثابت است)

شکل 20. نمودار بار- تغییرمکان با تغییر فاصله خاموت (نسبت خاموت ثابت است)

شکل 21. 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 Yaghin2\*, 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. Du 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 cods 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 crashing 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,