

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران 18و۱۶ مهرماه ۱۳۹۶ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



# بررسی لنگر خمشی ترک خوردگی در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای کامپوزیت GFRP

فهيمه مالكي'، على خيرالدين'

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان ۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

kheyroddin@semnan.ac.ir

### چکیدہ

در این مقاله تاثیر استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP بر ترک خوردگی تیر بتن آرمه مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل خوردگی میلگردهای فولادی در شرایط خاص، استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به منظور بررسی رفتار ترک خوردگی، پانزده تیر بتن آرمه با میلگردهای فولادی و میلگردهای کامپوزیت شیشه (GFRP) با درصدهای مختلف آرماتور در نرم افزار ABAQUS مورد تحلیل قرار گرفت. برای صحت سنجی از مدل آزمایشگاهی آل سونا و همکاران که تیری با ابعاد ۲۵۰×۱۵۰ میلیمتر مربع به طول ۲۵۵۰ میلیمتر میباشد، استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان داد که استفاده از میلگردهای GFRP به دلیل رفتار الاستیک خطی آن باعث کاهش لنگر خمشی ترک خوردگی میگردند و در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP با افزایش پوشش بتن، میزان لنگر خمشی ترک خوردگی به میزان ۲ تا ۵ درصد کاهش مییابد. همچنین در تیرهای بتن آرمه با میلگرد مای میلگرد آلاستیک تعای میلگرد GFRP با ثابت بودن درصد میلگرد، سبب کاهش میابد. همچنین در افزایش مقاومت بتن موجب افزایش ۱۵ تا ۲۵ درصدی لنگر خمشی ترک خوردگی میگود، سبب کاهش ۱ تا ۵ درصدی و

کلمات کلیدی: تیر بتن آرمه، میلگرد کامپوزیت FRP، ترک خوردگی، روش اجزا محدود

#### ۱. مقدمه

قابلیت بهرهبرداری سازه ها، تغییر شکل و ترک خوردگی اعضای بتن آرمه میباشد. عرض ترک بیش از حد، موجب آسیب و بر قابلیت بهرهبرداری سازه ها، تغییر شکل و ترک خوردگی اعضای بتن آرمه میباشد. عرض ترک بیش از حد، موجب آسیب و خرابی بتن سازه ای می گردد و تاثیر نامطلوبی بر زیبایی ظاهری سازه دارد. تغییر شکل ها نیز باید در حدود قابل قبول برای استفاده از سازه باشد [۱]. ورق های پیش تنیده FRP [۲] و میلگردهای FRP در سال های اخیر برای تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه استفاده می گردند. به طور کلی، ممکن است طراحی مقاطع خمشی تقویت شده با میلگردهای کامپوزیت FRP، معیار قابلیت بهره برداری برای کنترل ترک و تغییر شکل را برآورده نکند [۳]. مقررات قابلیت بهره برداری بیان شده در BCI318 برای کنترل ترک و تغییر شکل برای اعضای تقویت شده با میلگردهای کامپوزیت FRP معیار برای کنترل ترک و تغییر شکل برای اعضای تقویت شده با میلگردهای کامپوزیت FRP معیار برای کنترل ترک و تغییر شکل برای اعضای تقویت شده با میلگردهای کامپوزیت FRP که سختی دارند، نیاز به اصلاح دارد. به عنوان مثال جایگزینی میلگردهای کامپوزیت FRP به میلگردهای کامپوزیت FRP که سختی مرازد، بیاز به اصلاح تغییر شکل های بیشتر و عرض ترک های بزرگتری خواهند شد [۱]. میلگردهای کامپوزیت FRP، مقاوم در برابر خوردگی میباشند؛ بنابراین، زمانی که خوردگی میلگرد دلیل اصلی برای کنترل ترک در اعضای بتن آرمه است، از عرض ترک های بزرگتر

<sup>&#</sup>x27;Fiber Reinforced Polymer





اعضای بتن آرمه با میلگرد FRP می توان چشم پوشی نمود. دو روش طراحی برای تعیین نسبت میلگرد به منظور کنترل ترک خوردگی خمشی وجود دارد: ۱) روش مستقیم که در آن عرض ترکها محاسبه می شود؛ و ۲) روش غیر مستقیم که در آن حداكثر فاصله میلگرد مشخص شده است. كنترل مستقیم ترك، به محاسبه عرض ترك احتمالي و مقایسه آن با عرض ترك قابل قبول اشاره دارد. این رویکرد توسط انجمن مهندسین عمران ژاپن دنبال می شود، که تنها زیبایی شناسی در تعیین حداكثر عرض ترك قابل قبول 6/0 ميليمتر لحاظ شده است[۴]. در آيين نامه CAN/CSA S6-06، تعيين نسبت ميلگرد FRP را با فرض عدم تجاوز عرض ترک از ۵/۵ میلیمتر برای اعضای در معرض محیطهای مهاجم، و ۰/۷ میلیمتر برای سایر اعضا، مجاز می داند. در ACI 318، مقررات کنترل عرض ترک برای میلگردهای FRP عنوان نشده است و کنترل ترک برای میلگرد فولادی مطابق با حداکثر عرض ترک که تقریبا بین ۰/۴۶ و ۰/۵۶ میلیمتر میباشد، تغییر میکند. به دلیل نگرانی در مورد کفایت تجارب تطابق یافته، مدلی توسط گرگلی ( و لوتز [۵] برای پیش بینی عرض ترکها در اعضای خمشی با کاور بزرگ میلگرد پیشنهاد شد. ACI 318-99 روش z- factor قدیمی برای کنترل ترک را با یک روش غیر مستقیم که عرض ترکهای خمشی از طریق حداکثر فاصله میلگرد تقویتی کنترل می شود، جایگزین نمود. همچنین وابستگی به شرایط محیطی نیز حذف شد. به جای تعیین حداکثر عرض ترک مجاز، در حال حاضر هدف تعیین حداکثر فاصله لازم میلگرد برای دستیابی به حالت حدی بهرهبرداری مورد نیاز ترک خوردگی بر اساس خواص میلگرد FRP و مطابق با تنش (یا کرنش) میلگرد FRP در سطوح بار سرویس میباشد. روش فعلی همچنین اثرات موثر پوشش خالص بر ترک خوردگی خمشی را تصدیق مینماید. حداکثر فاصله میلگرد آیین نامه ACI 318 از فرمولهای توسعه یافته عرض ترک توسط فروسچ<sup>۳</sup>[۶] گرفته شده که بر اساس مدل فیزیکی، بدست آمده است.برای سازگاری با ACI318، کنترل ترک خمشی در دالهای یک طرفه و تیرهای بتنی تقویت شده با FRP را می توان با تعیین ماکزیمم فاصله میلگرد FRP مطابق رابطه زیر انجام داد:

10 و16 مهرماه 1396

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

$$s_{max} = 1.15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2.5 c_c \le 0.92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \tag{1}$$

Smax ماکزیمم فاصله مجاز مرکز به مرکز میلگردها برای کنترل ترک خمشی (میلیمتر)، E<sub>f</sub> مدول الاستیسیته FRP (مگا پاسکال)، w حداکثر عرض مجاز ترک (میلیمتر)، f<sub>fs</sub> تنش ناشی از بار سرویس در FRP (مگا پاسکال)، d<sub>b</sub> ضریب پیوستگی و C<sub>c</sub> پوشش خالص بتن (میلیمتر) می باشند. به روش کنترل ترک خمشی پیشنهاد شده در معادله (۱)، به دلیل تعیین حداکثر فاصله میلگردهای FRP غیر مستقیم گفته می شود. که به طور غیر مستقیم هدف حداکثر عرض ترک مجاز را بر آورده می نماید. برای انتخاب سطح تنش FRP و عرض ترک هدف، ارزیابی ماکزیمم فاصله میلگرد در معادله (۱) باید بر اساس مقدار d<sub>c</sub> بدست آمده از معادله (۲) باشد. اگر مقدار b بزرگتری با توجه به شرایط پایایی خاص یا هر دلیل دیگری نیاز باشد و حد عرض ترک ماکزیمم را نتوان کاهش داد، بنا براین لازم است که سطح تنش در میلگرد FRP کاهش یابد. که برای مثال، می توان با افزایش مقدار میلگرد خمشی آن را بر آورده نمود.

$$d_c \le \frac{E_f w}{2f_{fs}\beta k_b} \tag{(7)}$$

<sup>&#</sup>x27;Gergely

<sup>&#</sup>x27; Lutz

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> Frosch







ضخامت یوشش بتن اندازه گیری شده از دورترین تار کششی تا مرکز نزدیکترین میلگرد به آن (میلی متر) وeta نسبت  $d_c$ فاصله تار خنثی تا دورترین تار کششی نسبت به فاصله از تار خنثی تا مرکز میلگرد کششی میباشد. انتخاب محدودیت عرض ترک برای استفاده در معادله (۱) و (۲) به استفاده مورد نظر از سازه وابسته است. این روش برای کنترل سطوح مختلف ترک خوردگی خمشی، محدودهای از ترکهای خیلی باریک (در سازههای در معرض محیطهای مهاجم یا مکانی که فشار آب مورد نیاز است) تا موقعیتهایی که ممکن است به جهت مقاومت خوردگی بالای میلگرد ترکهای بزرگتر FRP مجاز باشد، قابل قبول است. به طور کلی، عرض ترکها در اعضای تقویت شده با FRP بزرگتر از اعضای تقویت شده با فولاد خواهد بود. در مواقعی که عرض ترکها به دلایل زیبایی شناسی محدود می شود، عرض ترک در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷ میلی متر قابل قبول است. تنش سرويس f<sub>fs</sub> ،FRP را مي توان با انجام آناليز مقطع ترك خورده الاستيك ارزيابي كرد. پيشنهاد ارائه شده ACI 318 برای تنش میلگرد در بار سرویس ( $f_s = 0.67 \; f_y$ ) تنها برای بتن تقویت شده با فولاد در زمانی که مقاومت حاکم بر طراحی باشد و میلگرد فولادی در زمان شکست تسلیم شود، قابل استفاده است. برای بتن تقویت شده با FRP ، از آنجایی که غالبا حدود قابلیت بهره برداری که وابسته به کنترل عرض ترک و تغییر شکل یا اثرات گسیختگی خزشی و خستگی حاکم بر طراحی می باشد، این روش قابل استفاده نیست. عبارت kb ضریبی برای محاسبه چسبندگی بین میلگرد FRP و بتن اطراف است. در میلگردهای FRP که رفتار پیوستگی مشابه با میلگردهای فولادی بدون روکش دارند، ضریب پیوستگی kb برابر با یک فرض می شود. برای میلگردهای FRP که رفتار چسبندگی کمتر از فولاد دارند، kb بزرگتر از یک و برای میلگردهای FRP که رفتار چسبندگی بیشتر از فولاد دارند، kb کوچکتر از یک است. یک روش آزمون برای تعیین kb توسط انجمن استانداردهای کانادا در CAN/CSA S806-12 تصویب شده است. برای تحلیل دادههای عرض ترک که توسط باکیس<sup>۰</sup> و همکاران [۷] بر روى تنوعى از محصولات ميلكرد FRP و سطوح مقاطع بتن، انواع الياف، فرمولاسيون رزين و رفتار سطح انجام شد، متوسط مقادیر Kb در محدودهای از ۲/۰۶ تا ۱/۷۲ با میانگین ۱/۱ بود. دادهها برای رفتار سطح میلگرد FRP با پوشش ماسه زبر به مقادیر پایین این محدوده تمایل دارند. در مواردی که  $k_{
m b}$  از دادههای آزمایشگاهی مشخص نباشد، باید مقدار محافظه کارانه ۱/۴ فرض شود. به طور خاص میلگردهای صاف و شبکهها از این پیشنهاد مستثنی شدهاند و آنالیز بیشتری برای دستیابی به Kb برای چنین میلگردهایی نیاز است[۸].

## ۲. مروری بر پیشینه تحقیق

باکیس و بوتبی<sup>۲</sup> [۹] دریافتند که عرض ترکها در تیرهای بتنی تقویت شده با GFRP تحت بارهای ثابت تقریبا بیش از ۴۰ درصد مقادیر اولیه در یک محیط داخلی و تقریبا تا ۶۰ درصد در یک محیط بیرونی در طی یک دوره ۳ ساله افزایش یافته است. گریبنیاک<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] به ارتباط میان تعداد لایههای میلگرد با سختی خمشی پرداختند. همچنین عرض ترک و فاصله ترک تیرها با تعداد متفاوت لایههای میلگرد مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که فاصله ترک در تیرها با سه لایه میلگرد بیشتر و حداکثر میزان بازشدگی ترک کوچکتر از نمونههای متداول با همان نسبت میلگرد میباشد. ایمجی و همکاران [۱۱] یک روش نیمه عملی برای تعیین ترک برشی ناشی از تغییر مکان در تیرهای تقویت شده با GFRP<sup>۴</sup> بیان نمودند. در دستورالعملهای طراحی کنونی، از برش و ترک برشی ناشی از تغییر مکان در محاسبه خیز تیر بتن آرمه با GFRP شده است اما، به جهت سختی کمتر میلگرد GFRP در مقایسه با فولاد، برش ناشی از تغییر مکان میتواند تا بیش از ۳۰٪ کل

<sup>&#</sup>x27; Bakis

<sup>&#</sup>x27; Boothby

<sup>&</sup>quot; Gribniak

<sup>\*</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer





نهمین کنفرانس ملی بتن ایران 18و16 مهرماه ۱۳۹۶ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



خیز تیر باشد. با بررسی دوازده تست برشی بر روی شش تیر بتنی تقویت شده با میلگرد GFRP با انواع مختلف میلگرد و پارامترهای آزمایش مشخص شد که مدل پیشنهادی در مقایسه با دستورالعملهای طراحی کنونی، دقیق ترین مقدار تغییر مکان قائم تیرهای بتن آرمه با FRP را در هر دو حالت بار نهایی و سرویس پیشبینی مینماید. هونگ و همکاران [۱۲] آزمایشهای بارگذاری یکنواخت بر روی ۶ تیر بتنی با تکیه گاه ساده انجام دادند. میلگردهای تقویت کننده مورد بررسی در آزمایش تیرها به ترتیب، میلگردهای فولادی معمولی، میلگردهایBFRP<sup>۲</sup> و میلگردهای GFRP بودند. نتایج آزمایش نشان داد که با نسبت یکسان سطح مقطع تقویت کننده، سختی خمشی پس از ترک خوردگی تیرهای تقویت شده با FRP به دلیل مدول الاستیسیته کمتر، به طور قابل ملاحظهای کمتر از تیرهای تقویت شده با میلگردهای فولادی معمولی است. در مقایسه با تیرهای تقویت شده با میلگرد فولادی معمولی، فاصله و توزیع ترکها در تیرهای تقویت شده با FRP به ترتیب بزرگتر و یراکندهتر مشاهده شدند. که می توان دریافت سختی خمشی کوتاه مدت تیرهای تقویت شده با FRP توسط آیین نامههای موجود، اغلب زیاد برآورد میشود. صیادمنش و همکاران[۱۳] با بررسی رفتار تقویتی سیزده تیر بتن آرمه به دو روش نصب نزدیک سطح و تقویت خارجی دریافتند که روش NSM<sup>۳</sup> و EBR<sup>۴</sup> باعث افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی وافزایش سختی خمشی تیر بتنی می گردند. استفاده از میلگردهای GFRP به روش NSM سبب افزایش ۳۱/۳ درصدی ظرفیت خمشی می شوند. همچنین افزایش تعداد شیارها در روش NSM ظرفیت خمشی تیر را افزایش می دهند. مرادی و همکاران [۱۴] با بررسی مطالعات موجود در زمینه مقاومسازی برشی تیرهای بتنی با استفاده از چسباندن کامپوزیت FRP، اطلاعات مربوط به مشخصات ۲۵۶ تیر جمع آوری گردید. از میان این تیرها، مجموعا ۹۷ تیر دارای مود انهدام برشی بودند که برای ادامه کار مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدلی برای تخمین سهم برشی FRP ارائه و نتایج حاصل از مدل با مقادیر به دست آمده از روابط آیین نامهها مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که مدل شبکه مصنوعی به دست آمده نتایج دقیق تر و بهتری نسبت به روابط موجود به دست می دهد.

# **ABAQUS . تحلیل به روش اجزا محدود در نرم افزار**

به منظور ارزیابی صحت و دقت نتایج خروجی مدل ساخته شده در نرم افزار ABAQUS، مشخصات فنی و هندسی تیر مطابق با نمونه آزمایش آل سونا و همکاران [۱۵]، انتخاب گردید. بر این اساس بتن با مدول الاستیسیته ۲۹/۵ گیگا پاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. میلگرد مقاومت فشاری ۲۸ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. میلگرد مقاومت فشاری ۲۸ مول الاستیسیته ۲۹/۵ گیگا پاسکال و مقاومت کششی ۳/۶ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. میلگرد مقاومت فشاری ۲۸ مول الاستیسیته ۲۹/۵ گیگا پاسکال در مقاومت کششی ۳/۶ میل باسکال در نظر گرفته شد. میلگرد مقاومت فشاری ۲۶ میل با مدول الاستیسیته ۲۰ گیگا پاسکال و مقاومت کششی ۳/۶ میل با مدول الاستیسیته ۲۰ گیگا پاسکال و مقاومت کششی ۳/۶ مگا پاسکال و میلگرد فولادی با مدول الاستیسیته ۲۰ گیگا پاسکال و مقاوت نهایی ۲۰۰ مگا پاسکال استفاده شده است. ابعاد تیر و نحوه آرماتورگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان پوشش بتنی برابر ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. دهانه برشی (۶۲۷ میلی متر) با خاموتهای فولادی برای جلوگیری از شکست برشی تقویت شده است. از میلگردهای GFRP با قطر اسمی ۶ میلی متر) با خاموتهای فولادی برای جلوگیری از شکست برشی تقویت شده است. دهانه برشی (۶۹۷ میلی متر) با خاموتهای فولادی در اس می ای با ماون میلگرد فشاری در برای جلوگیری از شکست برشی تقویت شده است. از میلگردهای GFRP با قطر اسمی ۶ میلی متر) با خاموتهای فولادی برای جلوگیری از شکست برشی تقویت شده است. از میلگردهای GFRP با قطر اسمی ۶ میلی متر) با خاموتهای در زماری در ایرا موان میلگرد فشاری در برای برای میلوداری خاموتها استفاده شد. تیر تحت بارگذاری چهار نقطهای قرار گرفت. برای شبیه سازی بارگذاری آزمایشگاهی در نرم افزار ABAQUS، روش کنترل تغییر مکان به کار گرفته شد.

' Hong

<sup>&#</sup>x27; Basalt Fiber Reinforced Plastic

<sup>&</sup>quot;Near Surface Mounted

<sup>\*</sup> Externally Bounded Reinforcement





نهمین کنفرانس ملی بتن ایران 16و16 مهرماه ۱۳۹۶



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



شکل ۱- ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه آزمایشگاهی [۱۵]

برای مدلسازی بتن، از مدل پلاستیک آسیب دیده۱ (CDP) استفاده شده است. این مدل پیچیده ترین و پرکاربردترین مدل رفتاه مدل رفتاری است که در آن دو فرض اصلی مکانیزم شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در نظر گرفته می شود. در مدلسازی عددی زاویه اتساع (ψ) برابر ۲۰، خروج از مرکزیت (٤) برابر با ۰/۱، پارامتر fb0/fc0 که بیان کننده مشخصات تابع گسیختگی می باشد برابر با ۱/۱۶، پارامتر (ψ) برابر ۲۰۶ خروج از مرکزیت (α) مدل می می بازد و فرض اصلی مدانیزم شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در نظر گرفته می شود. در مدل سازی عددی زاویه اتساع (ψ) برابر ۲۰ خروج از مرکزیت (α) برابر با ۰/۱۰ پارامتر fb0/fc0 که بیان کننده مشخصات تابع گسیختگی می باشد برابر با ۱/۱۶، پارامتر (ψ) به ترتیب مقادیر ۱/۶۶۷ و ۰/۰۰۰ در نظر گرفته شده است. میلگرد FRP به صورت الاستیک مدل سازی گردید و برای مدل سازی فولاد نیز از مدل الاستوپلاستیک با سخت شوندگی (مدل دو خطی) استفاده شده است.

برای مدلسازی خاموت و میلگرد FRP، از المان سه بعدی تیر با تابع شکل درجه یک B31 و برای مدلسازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با تابع شکل درجه یک و انتگرال کاهش یافته C3D8R استفاده شده است.

مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی تیر بتن آرمه با میلگرد GFRP در شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی نمودار نشان میدهد که نمونه مدلسازی شده در نرم افزار ABAQUS رفتار نمونه آزمایشگاهی را به خوبی شبیهسازی نموده است.



برای مطالعه ترک خوردگی در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP، ۱۵ تیر بتنی تقویت شده با میلگردهای فولادی AIA و میلگردهای کامپوزیت GFRP با درصدهای متفاوت میلگرد در نرم افزار ABAQUS مدل شدهاند. خصوصیات تیرهای مختلف مدل شده با میلگردهای فولادی AII و میلگردهای کامپوزیت GFRP به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) ارائه شده است.

| مقاومت بتن<br>(مگا پاسکال) | پوشش بتن<br>(میلیمتر) | نوع گسیختگی  | چیدمان میلگردهای کششی                     | نسبت<br>آرماتور (ρ <sub>f</sub> ) | مساحت میلگرد<br>کششی (m <sup>2</sup> ) | نام تير |
|----------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|---------|
| 41/8                       | ٢۵                    | خرد شدگی بتن | ۴ میلگرد AII به قطر ۱۹ میلیمتر در دو ردیف | •/•٣٩                             | 1174                                   | BS1134  |

جدول ۱- خصوصیات تیرهای بتن آرمه با میلگرد فولادی مدل شده در ABAQUS

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Concrete Damage Plasticity







| 41/8 | ٢۵ | حالت بالانس    | ۲ میلگرد ۸ II به قطر ۱۳ میلیمتر در یک ردیف  | •/••٨ | 790 | BS265 |
|------|----|----------------|---------------------------------------------|-------|-----|-------|
| 41/8 | ۲۵ | گسیختگی میلگرد | ۲ میلگرد A II به قطر ۹/۵ میلیمتر در یک ردیف | •/••۴ | 141 | BS142 |

پارامترهای مورد بررسی در این مقاله شامل تاثیر نوع آرماتور، نسبت آرماتور با سه نوع گسیختگی متفاوت، میزان پوشش بتن، تعداد ردیفهای میلگرد GFRP و مقاومت بتن بر ایجاد اولین ترک و مقایسه لنگر خمشی ترک خوردگی میباشد. در نامگذاری نمونهها، B مخفف تیر (Beam) میباشد. G برای نشان دادن میلگرد کامپوزیت شیشه (GFRP) و S میلگرد فولادی II میباشد. اعداد نیز نشان دهنده مساحت میلگردهای کششی به (mm<sup>2</sup>) میباشد. همچنین تغییر پوشش بتن با C، تغییر تعداد لایهها با R به همراه تعداد لایه های مورد نظر میلگرد GFRP و تغییر مقاومت بتن با افزودن f به نامگذاری تیر نشان داده شده است.

|                            |                       | - ) 0          | , , <b>0</b> . <b>e</b> , .                |                                   |                                        |          |
|----------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------|
| مقاومت بتن<br>(مگا پاسکال) | پوشش بتن<br>(میلیمتر) | نوع گسیختگی    | چیدمان میلگردهای کششی                      | نسبت<br>آرماتور (ρ <sub>f</sub> ) | مساحت میلگرد<br>کششی (m <sup>2</sup> ) | نام تير  |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | خرد شدگی بتن   | ۴ میلگرد GFRP به قطر ۱۹ میلیمتر در دو ردیف | ۰/۰۳۹                             | 1174                                   | BG1134   |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | حالت بالانس    | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۳ میلیمتر در یک ردیف | •/••٨                             | 780                                    | BG265    |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | گسیختگی میلگرد | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر در یک ردیف | •/••۴                             | 147                                    | BG142    |
| ۴۱/۶                       | ۵۰                    | خرد شدگی بتن   | ۴ میلگرد GFRP به قطر ۱۹ میلیمتر در دو ردیف | ٠/٠٣٩                             | 1184                                   | BGC1134  |
| ۴۱/۶                       | ۵۰                    | حالت بالانس    | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۳ میلیمتر در یک ردیف | • / • • ٨                         | 790                                    | BGC265   |
| ۴۱/۶                       | ۵۰                    | گسیختگی میلگرد | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر در یک ردیف | •/••۴                             | 147                                    | BGC142   |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | خرد شدگی بتن   | ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۶ میلیمتر در سه ردیف | ٠/٠٣٩                             | 1184                                   | BG3R1134 |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | حالت بالانس    | ۴ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر در دو ردیف | • / • • ٨                         | 780                                    | BG2R265  |
| ۴۱/۶                       | ۲۵                    | گسیختگی میلگرد | ۴ میلگرد GFRP به قطر ۶ میلیمتر در دو ردیف  | •/••۴                             | 147                                    | BG2R142  |
| ۳۰/۴                       | ۲۵                    | خرد شدگی بتن   | ۴ میلگرد GFRP به قطر ۱۹ میلیمتر در دو ردیف | ٠/٠٣٩                             | 1184                                   | BGf1134  |
| ۳۰/۴                       | ۲۵                    | حالت بالانس    | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۳ میلیمتر در یک ردیف | •/••٨                             | 790                                    | BGf265   |
| ٣٠/۴                       | ۲۵                    | گسیختگی میلگرد | ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر در یک ردیف | •/••۴                             | 147                                    | BGf142   |

جدول ۲- خصوصیات تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP مدل شده در ABAQUS



شكل ٣- نمودار لنكر خمشي- تغيير مكان قائم تيرهاي بتن أرمه با ميلگردهاي فولادي A II و ميلگردهاي GFRP

0 0

10 15 20 25 30

تغيير مكان وسط دهانه (ميليمتر)

- - BG142

غه مکان ۽ سط دهانه (ميلي متر)

یکی از پارامترهای موثر بر ترک خوردگی، پوشش بتن میباشد. در این تحقیق افزایش پوشش بتن از ۲۵ میلیمتر به ۵۰ میلیمتر در تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP، سبب افزایش میزان تغییر مکان قائم و ترک خوردگی گردید. شکل (۴) نمودار لنگر خمشی – تغییر مکان قائم برای تیرهای با پوشش بتن ۵۰ میلیمتر را نشان میدهد. با افزایش پوشش بتن، لنگر خمشی ترک خوردگی در حدود GFRP – ۱/۶۵ درصد، با توجه به درصدهای متفاوت میلگرد GFRP کاهش یافت. در گام بعدی با افزایش تعداد لایههای میلگرد GFRP از یک به دو لایه میلگرد برای تیرهای BG265 و BG142 و همچنین افزایش تعداد لایههای میلگرد تیر BG1134 از دو به سه لایه میلگرد به بررسی تاثیر این افزایش تعداد لایه های میلگرد بر ترک خوردگی تیر بتن آرمه پرداخته شد. نتایج تحلیل عددی تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP، کاهش ۱/۰۸ – ۵/۵۳ درصدی لنگر خمشی ترک خوردگی را با افزایش تعداد لایههای میلگرد GFRP نشان میدهد. نمودار لنگر خمشی – تغییر مکان قائم تیرهای با تعداد لایههای افزایش یافته میلگرد GFRP بدون تغییر نسبت آرماتور در شکل (۵) نشان داده شده است. با کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب، از ۴۱/۶ مگا پاسکال و ۳/۶ مگا پاسکال به ۳۰/۴ مگا پاسکال و ۲/۸ مگا پاسکال با مدول الاستیسیته ۲۷/۱ گیگا پاسکال در تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP تاثیر کاهش مقاومت بتن بر ترک خوردگی تیر مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل عددی، کاهش لنگر خمشی ترک خوردگی در حدود ۱۵/۴۶ – ۲۵/۰۵ درصد را برای تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP با کاهش مقاومت بتن تخمین زده است. نمودار لنگر خمشی – تغییر مکان قائم تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP و مقاومت فشاری ۳۰/۴ مگا یاسکال بتن در شکل (۶) ارائه شده است.











شکل ۵- نمودار لنگر خمشی- تغییر مکان قائم با افزایش تعداد لایههای میلگرد GFRP



شکل ۶- نمودار لنگر خمشی- تغییر مکان قائم تیر با کاهش مقاومت بتن

میزان آسیب کششی و فشاری تیر بتن آرمه با میلگرد GFRP در تغییر مکان ۲۵ میلیمتری وسط دهانه با نسبت آرماتور ۰/۰۳۹ در شکل (۷) نشان داده شده است.



شكل ۷- كانتور آسيب فشارى (DAMAGEC) و كانتور آسيب كششى (DAMAGET) تير BG1134

# ۴. نتیجهگیری

استفاده از میلگردهای GFRP در تیر بتن آرمه سبب افزایش ترک خوردگی و تغییر مکان قائم میگردد. در این تحقیق به کمک نرم افزار ABAQUS رفتار ترک خوردگی پانزده تیر بتن آرمه با میلگردهای AII وGFRP با نسبتهای میلگرد ۰/۰۳۹، ۰/۰۳۹ و ۰/۰۰۴ مورد بررسی قرار گرفت. از بررسی عوامل موثر بر ترک خوردگی نتایج زیر به دست آمد:







۱- نزدیک بودن نتایج عددی و مشاهدات آزمایشگاهی نمونه مدل شده در نرم افزار، گویای این واقعیت است که مدلسازی عددی میتواند به عنوان یک ابزار عملی برای تحلیل و بررسی رفتار ترک خوردگی تیر بتن آرمه به کار گرفته شود.

۲- در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP ممان ترک خوردگی ۱۵ تا ۳۰ درصدکمتر و میزان ترک خوردگی و تغییر مکان قائم بیشتری در مقایسه با تیرهای بتن آرمه با میلگرد AII، مشاهده گردید.

۳- در تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP، با افزایش پوشش بتن، لنگر خمشی ترک خوردگی در حدود GFRP، تا ۵/۳۷ درصد کاهش یافت. در نتیجه با توجه به مقاومت میلگردهای GFRP در برابر خوردگی، میتوان پوشش بتن این تیرها را کاهش داد.

۴- در تیرهای بتنی تقویت شده با میلگردهای GFRP، با افزایش تعداد لایههای میلگرد GFRP، با ثابت ماندن نسبت آرماتور، لنگر خمشی ترک خوردگی ۱/۰۸ تا ۵/۵۳ درصد کاهش یافت.

۵- با کاهش مقاومت بتن در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP، لنگر خمشی ترک خوردگی ۱۵/۴۶ تا ۲۵/۰۵ درصد کاهش یافت. در نتیجه در تیرهای بتنی که از میلگردهای GFRP استفاده می گردد برای بهتر شدن عملکرد تیرها باید از بتنهای با مقاومت بالا استفاده نمود.

## ۵. مراجع

[1] Tighiouart, B., Benmokrane, B., & Gao, D. (1998). "Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars. Construction and building materials", Vol. 12(8), pp 453-462.

[۲] خیرالدین، ع.، شربتدار، م.ک. (۱۳۹۵). " مقاومسازی سازههای بتن آرمه به کمک ورق و پروفیل فولادی و کامپوزیتهای
 [۲] . چاپ اول، انتشارات دانشگاه سمنان.

- [3] Bischoff, P. H. (2005). "Reevaluation of deflection prediction concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars". Journal of Structural Engineering, Vol. 131(5), pp 752-767.
- [4] Japan Society of Civil Engineers. (1997). "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials". Concrete Engineering Series No. 23, 325 pp.
- [5] Gergely, P., and Lutz, L. A., (1968), "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members". Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete, SP-20, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 87-117.
- [6] Frosch, R. J. (1999). "Another look at cracking and crack control in reinforced concrete". Structural Journal, Vol. 96(3), pp 437-442.
- [7] Bakis, C. E., Ospina, C. E., Bradberry, T. E., Benmokrane, B., Gross, S. P., Newhook, J., Thiagarajan, G. (2006). "Evaluation of crack widths in concrete flexural members reinforced with FRP bars". Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, pp 307-310.
- [8] ACI Committee. (2015). "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars". 440.1 R. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- [9] Bakis, C. E., & Boothby, T. E. (2004). "Evaluation of crack width and bond strength in GFRP reinforced beams subjected to sustained loads". Proc. ACMBS-IV, Vol. 171.
- [10] Gribniak, V., Caldentey, A. P., Kaklauskas, G., Rimkus, A., & Sokolov, A. (2016). "Effect of arrangement of tensile reinforcement on flexural stiffness and cracking". Engineering Structures, Vol. 124, pp 418-428.







- [11] Imjai, T., Guadagnini, M., Garcia, R., & Pilakoutas, K. (2016). A practical method for determining shear crack induced deformation in FRP RC beams". Engineering Structures, Vol.126, pp 353-364.
- [12] Hong, Z., Zhiqiang, D., Gang, W., & Zhishen, W. (2015). "Experimental study and theoretical calculation on the flexural stiffness of concrete beams reinforced with FRP bars". China Civil Engineering Journal, Vol. 11, pp 7.
- [۱۳] صیادمنش، م.، خیرالدین، ع.، کریمی،م.س.، (۱۳۹۵). "تقویت تیرهای بتن آرمه به روش ترکیبی EBR و NSM". هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران، ۱۵ مهر
- [۱۴] مرادی، ۱.، ایلخانی، م.ح.، نادرپور، ح.، خیرالدین، ع.، (۱۳۹۵). "ارائه مدل شبکه عصبی برای تخمین ظرفیت برشی تیر بتنی مقاومسازی شده با FRP". اولین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، ۳۱ شهریور تا ۱ مهر.
- [15] Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2012). "Deflection behavior of FRP reinforced concrete beams and slabs: an experimental investigation". Composites Part B: Engineering, Vol. 43(5), pp. 2125-2134.