

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

فهیمه مالکی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مسئول مکاتبات: kheyroddin@semnan.ac.ir

چکیده

در این مقاله تاثیر استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP بر لنگر خمشی ترک خوردگی (Mcr)، تیرهای 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 استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که استفاده از میلگردهای GFRP به دلیل رفتار الاستیک خطی و مدول الاستیسیته پایین آن‌ها، باعث کاهش لنگر خمشی ترک خوردگی می‌گردند. در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP با افزایش پوشش بتن، میزان لنگر خمشی ترک خوردگی به میزان ۱ تا ۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش تعداد لایه‌های میلگرد GFRP با ثابت بودن درصد میلگرد، سبب کاهش ۱ تا ۵ درصدی و افزایش مقاومت فشاری بتن موجب افزایش ۱۵ تا ۲۵ درصدی لنگر خمشی ترک خوردگی می‌گردد. کلمات کلیدی: تیر بتن آرمه، میلگرد کامپوزیت FRP، لنگر خمشی ترک خوردگی، روش اجزا محدود

قابلیت بهره‌برداری، به عنوان عملکرد رضایت بخش سازه تحت شرایط بار سرویس تعریف می‌شود. از مهمترین عوامل موثر بر قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها، تغییر شکل و ترک خوردگی اعضای بتن آرمه می‌باشد. عرض ترک بیش از حد، موجب آسیب و خرابی بتن سازه‌ای می‌گردد و تاثیر نامطلوبی بر زیبایی ظاهری سازه دارد. تغییر شکل‌ها نیز باید در حدود قابل قبول برای استفاده از سازه باشد [۱]. ورق‌های پیش تنیده FRP<sup>۱</sup> [۲] و میلگردهای FRP در سال‌های اخیر برای تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه استفاده می‌گردند. به طور کلی، ممکن است طراحی مقاطع خمشی تقویت شده با میلگردهای کامپوزیت FRP، معیار قابلیت بهره‌برداری برای کنترل ترک و تغییر شکل را برآورده نکند [۳]. مقررات قابلیت بهره‌برداری بیان شده در ACI318 برای کنترل ترک و تغییر شکل، در اعضای مسلح شده با میلگردهای کامپوزیت FRP که سختی کمتری دارند، نیاز به اصلاح دارد. به‌عنوان مثال جایگزینی میلگردهای کامپوزیت FRP به جای میلگردهای فولادی با مساحت برابر، به‌طور معمول منجر به تغییر شکل‌های بیشتر و عرض ترک‌های 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 باشد، از عرض ترک‌های بزرگتر اعضای بتن آرمه با میلگرد FRP می‌توان چشم‌پوشی نمود. دو روش طراحی برای تعیین نسبت میلگرد، به‌منظور کنترل ترک خوردگی خمشی وجود دارد. روش مستقیم که در آن عرض ترک‌ها محاسبه می‌شود و روش غیر مستقیم که در آن حداکثر فاصله میلگرد مشخص می‌گردد. کنترل مستقیم ترک، به محاسبه عرض ترک احتمالی و مقایسه آن با عرض ترک قابل قبول اشاره دارد. این رویکرد توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن دنبال می‌شود، که تنها زیبایی شناسی در تعیین حداکثر عرض ترک قابل قبول ۰/۵ میلی‌متر لحاظ شده است [۴]. در آیین نامه CAN/CSA S6-06، تعیین نسبت میلگرد FRP را با فرض عدم تجاوز عرض ترک از ۰/۵ میلی‌متر برای اعضای در معرض محیط‌های مهاجم و ۰/۷ میلی‌متر برای سایر اعضا، مجاز می‌داند. 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 تقریباً بین ۰/۴۶ و ۰/۵۶ میلی‌متر می‌باشد، تغییر می‌کند. به دلیل نگرانی در مورد کفایت تجارب تطابق یافته، مدلی توسط گرگلی<sup>۲</sup> و لوتز<sup>۳</sup> [۵] برای پیش‌بینی عرض ترک‌ها در اعضای خمشی با کاور بزرگ میلگرد پیشنهاد گردید. 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 می‌شوند، جایگزین نمود و وابستگی به شرایط محیطی نیز حذف گردید. 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>۴</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 مسلح با FRP را می‌توان با تعیین ماکزیمم فاصله میلگرد FRP مطابق رابطه زیر انجام داد:

$$s_{max} = 1.15 \frac{E_{fw}}{f_{fs}k_b} - 2.5c_c \leq 0.92 \frac{E_{fw}}{f_{fs}k_b} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Fiber Reinforced Polymer

<sup>2</sup> Gergely

<sup>3</sup> Lutz

<sup>4</sup> Frosch

$S_{max}$  ماکزیمم فاصله مجاز مرکز به مرکز میلگردها برای کنترل ترک خمشی (میلی‌متر)،  $E_f$  مدول الاستیسیته FRP (مگا پاسکال)،  $w$  حداکثر عرض مجاز ترک (میلی‌متر)،  $f_{fs}$  تنش ناشی از بار سرویس در FRP (مگا پاسکال)،  $k_b$  ضریب پیوستگی و  $C_c$  پوشش خالص بتن (میلی‌متر) می‌باشند. به روش کنترل ترک خمشی پیشنهاد شده در معادله (۱)، به دلیل تعیین حداکثر فاصله میلگردهای FRP، روش غیر مستقیم گفته می‌شود، که به طور غیر مستقیم هدف حداکثر عرض ترک مجاز را برآورده می‌نماید. برای انتخاب سطح تنش FRP و عرض ترک هدف، ارزیابی ماکزیمم فاصله میلگرد در معادله (۱) باید بر اساس مقدار  $d_c$  بدست آمده از معادله (۲) باشد. اگر مقدار  $d_c$  بزرگتری با توجه به شرایط پایایی خاص یا هر دلیل دیگری نیاز باشد و حد عرض ترک ماکزیمم را نتوان کاهش داد، بنابراین لازم است که سطح تنش در میلگرد FRP کاهش یابد. که برای مثال، می‌توان با افزایش مقدار میلگرد خمشی آن را برآورده نمود.

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b} \quad (2)$$

$d_c$  ضخامت پوشش بتن اندازه‌گیری شده از دورترین تار کششی تا مرکز نزدیک‌ترین میلگرد به آن (میلی‌متر) و  $\beta$  نسبت 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 FRP ترک‌های بزرگتر مجاز باشد، قابل قبول است. به طور کلی، عرض ترک‌ها در اعضای مسلح شده با FRP بزرگتر از اعضای مسلح شده با فولاد خواهد بود. در مواقعی که عرض ترک‌ها به دلایل زیبایی شناسی محدود می‌شود، عرض ترک در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷ میلی‌متر قابل قبول است. تنش سرویس FRP،  $f_{fs}$  را می‌توان با انجام آنالیز مقطع ترک خورده الاستیک ارزیابی کرد. پیشنهاد ارائه شده ACI 318 برای تنش میلگرد در بار سرویس ( $f_s = 0.67 f_y$ ) تنها برای بتن مسلح با فولاد در زمانی که مقاومت حاکم بر طراحی باشد و میلگرد فولادی در زمان شکست تسلیم شود، قابل استفاده است. برای بتن مسلح شده با میلگرد FRP، که حدود قابلیت بهره برداری غالباً وابسته به کنترل عرض ترک و تغییر شکل یا اثرات گسیختگی خزشی و خستگی حاکم بر طراحی می‌باشد، این روش قابل استفاده نمی‌باشد. عبارت  $k_b$  ضریبی برای محاسبه چسبندگی بین میلگرد FRP و بتن اطراف است. میلگردهای FRP که رفتار پیوستگی مشابه با میلگردهای فولادی بدون روکش دارند، ضریب پیوستگی  $k_b$  برابر با یک فرض می‌شود. میلگردهای FRP که رفتار چسبندگی کمتر از فولاد دارند،  $k_b$  بزرگتر از یک و برای میلگردهای FRP که رفتار چسبندگی بیشتر از فولاد دارند،  $k_b$  کوچکتر از یک در نظر گرفته می‌شود. یک روش آزمون برای تعیین  $k_b$  توسط انجمن استانداردهای کانادا در CAN/CSA S806-12 تصویب شده است. برای تحلیل داده‌های عرض ترک که توسط باکیس<sup>۵</sup> و همکاران [۷] بر روی تنوعی از محصولات میلگرد FRP و سطوح مقاطع بتن، انواع الیاف، فرمولاسیون رزین و رفتار سطح انجام شد، متوسط مقادیر  $K_b$  در محدوده‌ای از ۰/۰۶ 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  $k_b$  از داده‌های آزمایشگاهی مشخص نباشد، باید مقدار محافظه‌کارانه ۱/۴ فرض شود. به‌طور خاص میلگردهای صاف و شبکه‌ها از این پیشنهاد مستثنی شده‌اند و آنالیز بیشتری برای دستیابی به  $K_b$  برای چنین میلگردهایی نیاز است [۸].

ممان ترک خوردگی ( $M_{cr}$ ) با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$M_{cr} = \frac{0.6 \lambda \sqrt{f_c} I_g}{y_t} \quad (3)$$

$M_{cr}$  لنگر خمشی ترک خوردگی (نیوتن - میلی متر)،  $I_g$  ممان اینرسی مقطع ترک نخورده بدون در نظر گرفتن اثر آرماتورها (میلی متر به توان چهار)،  $\lambda$  ضریبی برای محاسبه اضافه افتادگی دراز مدت،  $y_t$  فاصله محور خنثی در مقطع ترک نخورده، بدون در نظر گرفتن اثر آرماتورها از دورترین تار کششی (میلی متر) و  $f_c$  مقاومت فشاری مشخصه بتن (مگا پاسکال) می باشد.

### مروری بر پیشینه تحقیق

باکیس و بوتبی<sup>۶</sup> [۹] دریافته اند که عرض ترکها در تیرهای بتنی مسلح شده با GFRP تحت بارهای ثابت تقریباً بیش از ۴۰ درصد مقادیر اولیه در یک محیط داخلی و تقریباً تا ۶۰ درصد در یک محیط بیرونی در طی یک دوره ۳ ساله افزایش یافته است. گریبنياک<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰] به ارتباط میان تعداد لایه های میلگرد با سختی خمشی پرداختند و عرض ترک و فاصله ترک تیرها با تعداد متفاوت لایه های میلگرد را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته اند که فاصله ترک در تیرها با سه لایه میلگرد بیش تر و حداکثر میزان بازشدگی ترک کوچک تر از نمونه های متداول با همان نسبت میلگرد می باشد. ایمجی و همکاران [۱۱] یک روش نیمه عملی برای تعیین تغییر مکان ناشی از ترک برشی در تیرهای مسلح با میلگرد GFRP<sup>۸</sup> ارائه نمودند. در دستورالعمل های طراحی کنونی، از تغییر مکان ناشی از برش و ترک برشی در محاسبه خیز تیر بتن آرمه با میلگرد GFRP صرف نظر شده است. اما به جهت سختی کمتر میلگرد GFRP در مقایسه با فولاد، تغییر مکان ناشی از برش می تواند تا بیش از ۳۰ درصد کل خیز تیر باشد. با بررسی دوازده تست برشی بر روی شش تیر بتنی مسلح با میلگرد GFRP با انواع مختلف تقویت و پارامترهای آزمایش مشخص شد، که مدل پیشنهادی در مقایسه با دستورالعمل های طراحی کنونی، دقیق ترین مقدار تغییر مکان قائم تیرهای بتن آرمه با میلگرد FRP را در هر دو حالت بار نهایی و سرویس پیش بینی می نماید. هونگ<sup>۹</sup> و همکاران [۱۲] آزمایش های بارگذاری یکنواخت بر روی شش تیر بتنی با تکیه گاه ساده انجام دادند. میلگردهای مورد بررسی در آزمایش تیرها به ترتیب، میلگردهای فولادی معمولی، میلگردهای BFRP<sup>۱۰</sup> و میلگردهای GFRP بودند. نتایج آزمایش نشان داد که با نسبت یکسان سطح مقطع میلگرد، سختی خمشی پس از ترک خوردگی تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP به دلیل مدول الاستیسیته کمتر، به طور قابل ملاحظه ای کمتر از تیرهای مسلح شده با میلگردهای فولادی معمولی است. در مقایسه با تیرهای بتن آرمه با میلگرد فولادی معمولی، فاصله و توزیع ترکها در تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP به ترتیب بزرگتر و پراکنده تر مشاهده شدند. که می توان دریافت سختی خمشی کوتاه مدت تیرهای مسلح شده با میلگرد FRP توسط آیین نامه های موجود، اغلب زیاد برآورد می شود. صیادمنش و همکاران [۱۳] با بررسی رفتار تقویتی سیزده تیر بتن آرمه به دو روش نصب نزدیک سطح (NSM)<sup>۱۱</sup> و تقویت خارجی (EBR)<sup>۱۲</sup> دریافته اند که روش NSM و EBR باعث افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی و افزایش 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 مقاوم سازی برشی تیرهای بتنی با استفاده از چسباندن کامپوزیت FRP، اطلاعات مربوط به مشخصات ۲۵۶ تیر را جمع آوری نمودند. از میان این تیرها، مجموعاً ۹۷ تیر دارای مود انهدام برشی بودند که برای ادامه کار مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از

<sup>6</sup> Boothby

<sup>7</sup> Gribniak

<sup>8</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer

<sup>9</sup> Hong

<sup>10</sup> Basalt Fiber Reinforced Plastic

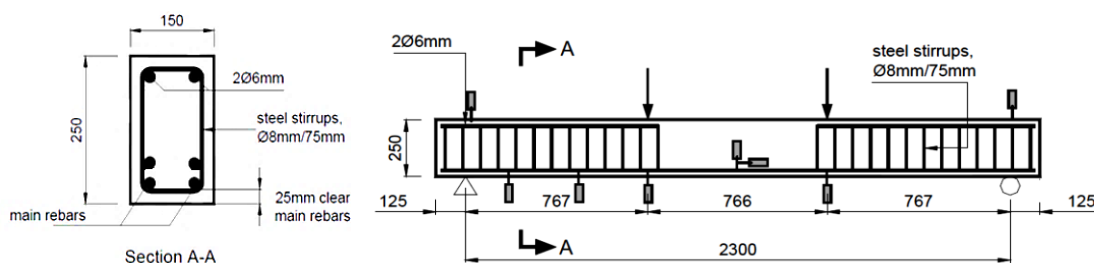
<sup>11</sup> Near Surface Mounted

<sup>12</sup> Externally Bounded Reinforcement

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 دقیق‌تر و بهتری نسبت به روابط موجود به دست می‌دهد.

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

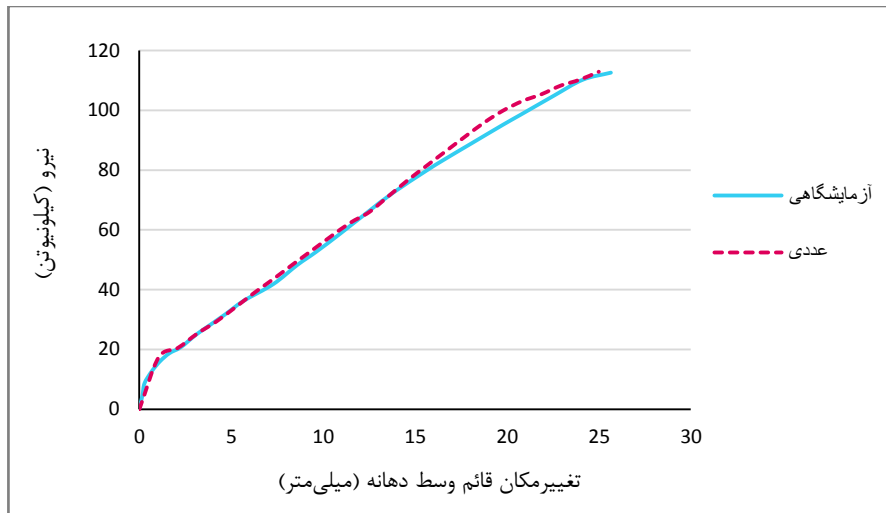
به منظور ارزیابی صحت و دقت نتایج خروجی مدل ساخته شده در نرم افزار ABAQUS، مشخصات فنی و هندسی تیر مطابق با نمونه آزمایش آل سونا و همکاران [۱۵]، انتخاب گردید. بر این اساس بتن با مدول الاستیسیته ۲۹/۵ گیگا پاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای بتنی ۴۱/۶ مگا پاسکال و مقاومت کششی ۳/۶ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. میلگرد GFRP با مدول الاستیسیته ۴۲ گیگا پاسکال و مقاومت کششی ۶۲۰ مگا پاسکال و میلگرد فولادی با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال و مقاومت نهایی ۵۰۰ مگا پاسکال استفاده شده است. ابعاد تیر و نحوه آرماتورگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان پوشش بتنی برابر ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دهانه برشی (۷۶۷ میلی‌متر) با خاموت‌های فولادی برای جلوگیری از شکست برشی تقویت شده است. از میلگردهای GFRP با قطر اسمی ۶ میلی‌متر به عنوان میلگرد فشاری در دهانه برشی برای نگهداری خاموت‌ها استفاده شد. تیر تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای قرار گرفت و برای شبیه‌سازی بارگذاری آزمایشگاهی در نرم افزار ABAQUS، روش کنترل تغییر مکان به کار گرفته شد.



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

برای مدل‌سازی بتن، از مدل پلاستیک آسیب دیده<sup>۱۳</sup> (CDP) استفاده شده است. این مدل پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری است که در آن دو فرض اصلی مکانیزم شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی عددی زاویه اتساع (ψ) برابر ۲۰، خروج از مرکزیت (ε) برابر با ۰/۱، پارامتر  $f_{60}/f_{c0}$  که بیان‌کننده مشخصات تابع گسیختگی می‌باشد، برابر با ۱/۱۶، پارامتر K و ویسکوزیته (μ) به ترتیب مقادیر ۰/۶۶۷ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. میلگرد FRP به صورت الاستیک مدل‌سازی گردید و برای مدل‌سازی فولاد نیز از مدل الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی (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 هشت‌گره‌ای 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.

<sup>13</sup> Concrete Damage Plasticity



شکل ۲- نمودار صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی

برای مطالعه ترک خوردگی در تیرهای بتن آرمه با میلگردهای GFRP، پانزده تیر بتن آرمه با میلگردهای فولادی A II و میلگردهای کامپوزیت GFRP با درصدی متفاوت میلگرد در نرم افزار ABAQUS مدل شده‌اند. خصوصیات تیرهای مختلف مدل شده با میلگردهای فولادی A II و میلگردهای کامپوزیت GFRP به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) ارائه شده است.

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

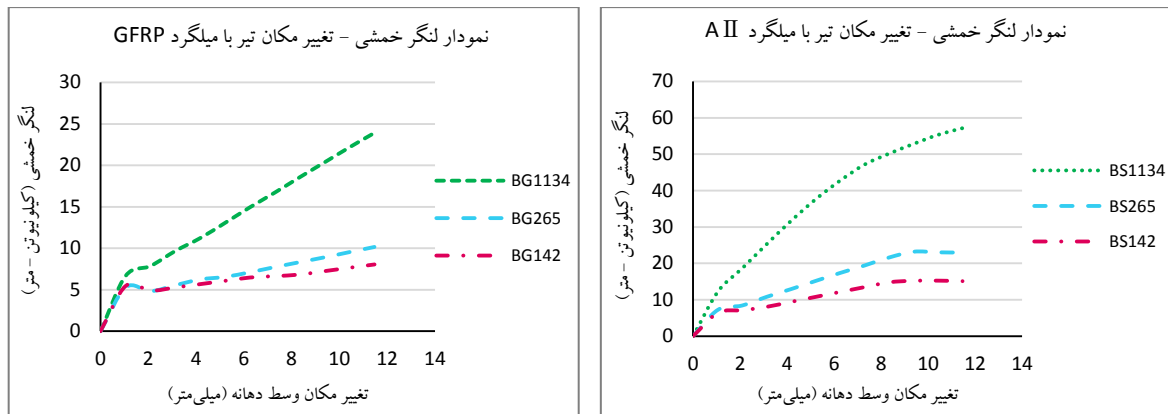
مقاومت بتن (MPa)	پوشش بتن (mm)	نوع گسیختگی	چیدمان میلگردهای کششی	نسبت آرماتور ( $\rho$ )	مساحت میلگرد کششی ( $m^2$ )	نام تیر
۴۱/۶	۲۵	خرد شدگی بتن	۴ میلگرد A II با قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۳۹	۱۱۳۴	BS1134
۴۱/۶	۲۵	حالت بالانس	۲ میلگرد A II با قطر ۱۳ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۸	۲۶۵	BS265
۴۱/۶	۲۵	گسیختگی میلگرد	۲ میلگرد A II با قطر ۱۰ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۴	۱۴۲	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 A II می‌باشد. اعداد نیز نشان دهنده مساحت میلگردهای کششی به میلی‌متر مربع می‌باشند. همچنین تغییر پوشش بتن با C، تغییر تعداد لایه‌ها با R به همراه تعداد لایه‌های مورد نظر میلگرد GFRP و تغییر مقاومت بتن با افزودن f به نامگذاری تیر نشان داده شده است.

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

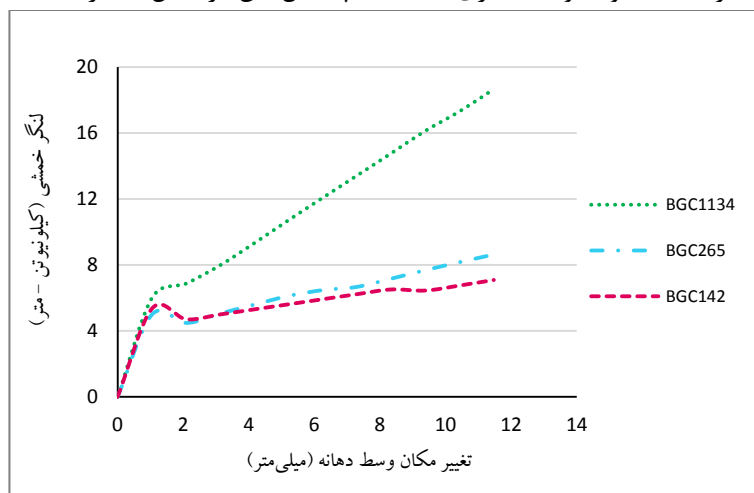
مقاومت بتن (MPa)	پوشش بتن (mm)	نوع گسیختگی	چیدمان میلگردهای کششی	نسبت آرماتور ( $\rho$ )	مساحت میلگرد کششی ( $m^2$ )	نام تیر
۴۱/۶	۲۵	خرد شدگی بتن	۴ میلگرد GFRP با قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۳۹	۱۱۳۴	BG1134
۴۱/۶	۲۵	حالت بالانس	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۳ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۸	۲۶۵	BG265
۴۱/۶	۲۵	گسیختگی میلگرد	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۴	۱۴۲	BG142
۴۱/۶	۵۰	خرد شدگی بتن	۴ میلگرد GFRP با قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۳۹	۱۱۳۴	BGC1134
۴۱/۶	۵۰	حالت بالانس	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۳ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۸	۲۶۵	BGC265
۴۱/۶	۵۰	گسیختگی میلگرد	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۴	۱۴۲	BGC142
۴۱/۶	۲۵	خرد شدگی بتن	۶ میلگرد GFRP با قطر ۱۶ میلی‌متر در سه ردیف	۰/۰۳۹	۱۱۳۴	BG3R1134
۴۱/۶	۲۵	حالت بالانس	۴ میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۰۸	۲۶۵	BG2R265
۴۱/۶	۲۵	گسیختگی میلگرد	۴ میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۰۴	۱۴۲	BG2R142
۳۰/۴	۲۵	خرد شدگی بتن	۴ میلگرد GFRP با قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	۰/۰۳۹	۱۱۳۴	BGf1134
۳۰/۴	۲۵	حالت بالانس	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۳ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۸	۲۶۵	BGf265
۳۰/۴	۲۵	گسیختگی میلگرد	۲ میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر در یک ردیف	۰/۰۰۴	۱۴۲	BGf142

شکل (۳) نمودار لنگر خمشی- تغییر مکان قائم وسط دهانه برای تیرهای بتن آرمه با فولاد A II و میلگرد کامپوزیت GFRP را نشان می‌دهد. استفاده از میلگردهای GFRP به دلیل مدول الاستیسیته پایین‌تر و رفتار الاستیک خطی تا لحظه گسیختگی، سبب افزایش ترک خوردگی و افزایش تغییر مکان قائم تیرها می‌گردد. تحلیل تیرهای مدل شده در آباکوس، کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی لنگر خمشی ترک خوردگی تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP نسبت به تیرهای بتن آرمه با میلگرد A II را نشان می‌دهد.



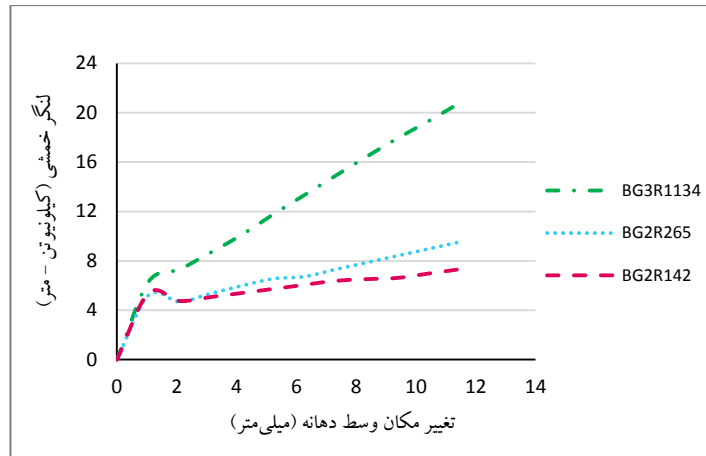
شکل ۳- نمودار لنگر خمشی- تغییر مکان قائم تیرهای بتن آرمه با میلگردهای فولادی A II و میلگردهای GFRP

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 شده است. 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 ۱/۶۵ تا ۵/۳۷ 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 BG142 و BG265 و همچنین افزایش تعداد لایه‌های میلگرد تیر BG1134 از دو به سه لایه میلگرد، به بررسی تاثیر این افزایش تعداد لایه‌های میلگرد بر ترک خوردگی تیر بتن آرمه پرداخته شد. نتایج تحلیل‌های عددی تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP، کاهش ۱/۰۸ تا 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 تا 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 پاسکال بتن در شکل (۶) ارائه شده است.

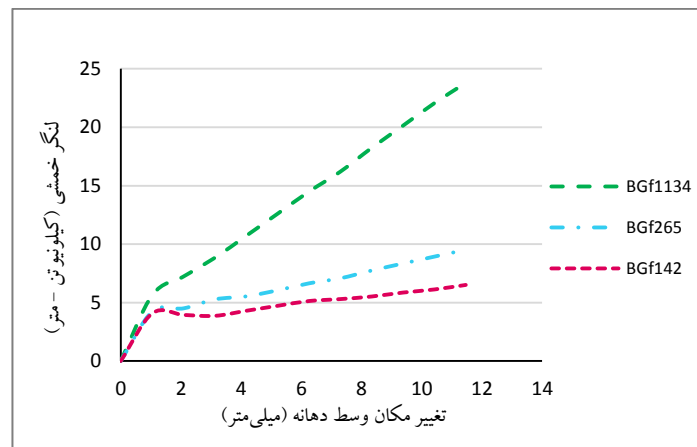


شکل ۴- نمودار لنگر خمشی- تغییر مکان قائم تیرها با پوشش بتن ۵۰ میلی‌متر



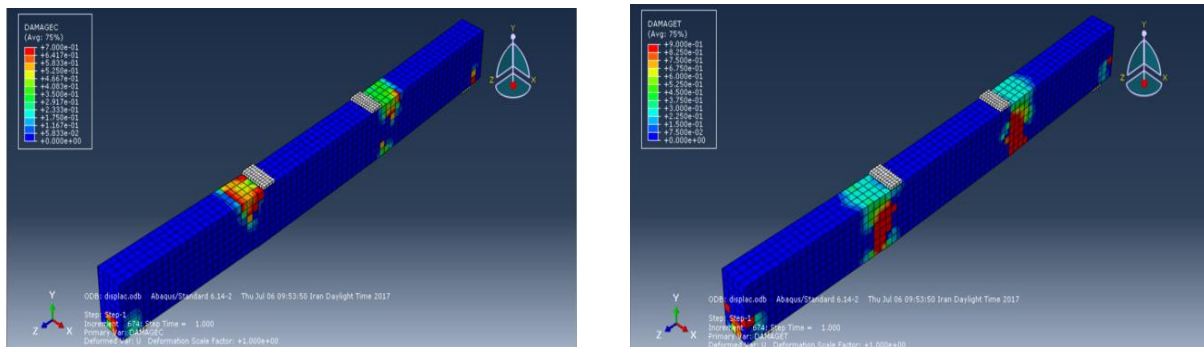


شکل ۵- نمودار لنگر خمشی - تغییر مکان قائم با افزایش تعداد لایه‌های میلگرد GFRP



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.



شکل ۷- کانتور آسیب فشاری (DAMAGET) و کانتور آسیب کششی (DAMAGEC) تیر BG1134

### 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 A II و GFRP با

نسبت‌های میلگرد ۰/۰۳۹، ۰/۰۰۸ 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 درصد کمتر و میزان ترک خوردگی و تغییر مکان قائم بیشتری در مقایسه با تیرهای بتن آرمه با میلگرد A II، مشاهده گردید.

۳- در تیرهای بتن آرمه با میلگرد GFRP، با افزایش پوشش بتن، لنگر خمشی ترک خوردگی در حدود ۱/۶۵ 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 مسلح 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 می‌گردد برای بهتر شدن عملکرد تیرها باید از بتن‌های با مقاومت بالا استفاده نمود.

#### 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 FRP". 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، ا.، 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.

# Investigation of Cracking Moment in RC Beams With GFRP Bars

Fahimeh Maleki

M.Sc. student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Ali Kheyroddin\*

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Corresponding author: [kheyroddin@semnan.ac.ir](mailto:kheyroddin@semnan.ac.ir)

## Abstract

*In this paper, the effect of using FRP bars on the cracking moment ( $M_{cr}$ ) of reinforced concrete (RC) beams has been studied. In recent years Due to the corrosion of steel bars in certain conditions, the use of FRP bars has been widely considered. In order to investigate the cracking behavior, fifteen RC beams with steel and glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars with different reinforcement ratio were analyzed in ABAQUS software. The experimental results of Al-Sunna et al. have been used for validation. The simulation results showed that the use of GFRP bars reduces cracking moment due to its linear elastic behavior and low value of modulus of elasticity. In concrete beams reinforced with GFRP bars, with increasing concrete cover, cracking moment decreases about 1% - 5%. Furthermore, increasing the number of bar layers with a constant reinforcement ratio reduces cracking moment about 1%- 5% and increasing compressive strength of concrete increases cracking moment about 15% to 25%.*

**Keywords:** Reinforced Concrete Beam, FRP Bar, Cracking Moment, Finite Element Method