

اثر مقاومت بتن، آرایش و نسبت میلگرد بر رفتار خمشی و ترک خوردگی تیرهای بتن آرمه مسلح شده با میلگردهای GFRP

امیرمحمد محتاج خراسانی^۱، محمدرضا اصفهانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) یک جایگزین مطمئن برای میلگردهای فولادی جهت مسلح کردن اعضای بتنی در محیط مرطوب است. دوام این میلگردها در برابر خوردگی، به خصوص در شرایط سخت آب و هوایی بسیار زیاد است. به دلیل مدول الاستیسیته کم این میلگردها در مقایسه با میلگردهای فولادی، خیز و عرض ترکها در تیرهای مسلح شده با این میلگردها بیشتر می‌باشند. بنابراین، طراحی اعضای بتنی مسلح شده با این میلگردها در حالت بهره‌برداری کنترل کننده است. در این پژوهش، رفتار خمشی و ترک خوردگی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، ۱۲ نمونه تیر آزمایشگاهی به ابعاد مقطع ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر و طول ۲۲۰۰ میلی‌متر ساخته شدند و به صورت دو سر ساده و تحت خمش چهار نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. ۸ نمونه از تیرها با نسبت آرماتور کم ساخته شدند که ۴ نمونه از آنها از بتن با مقاومت بالا و ۴ نمونه‌ی دیگر از بتن با مقاومت معمولی ساخته شدند. ۴ نمونه‌ی دیگر از تیرها با نسبت آرماتور زیاد و ساخته شده از بتن با مقاومت معمولی می‌باشند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، شامل مقاومت بتن، آرایش و نسبت میلگردهای کششی می‌باشند. نتایج پژوهش انجام شده نشان داد که تغییر در مقاومت بتن و همچنین تغییر در آرایش و نسبت میلگردهای کششی، باعث تغییر در رفتار خمشی تیرها می‌شود و بر ترک خوردگی نیز مؤثرند. به علاوه، نتایج آزمایشگاهی این پژوهش با آیین‌نامه طراحی ACI440.1R مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: تیر بتن آرمه، رفتار خمشی، ترک خوردگی، میلگردهای مسلح کننده GFRP، مقاومت بتن، آرایش میلگردها، نسبت میلگردهای کششی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.116344.1443	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.116344.1443	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۴/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۰۲
محمدرضا اصفهانی			*نویسنده مسئول:		
esfahani@um.ac.ir			پست الکترونیکی:		

Effect of Concrete Strength, Arrangement/Ratio of Reinforcement on Flexural Behavior and Cracking of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars

A. M. Mohtaj Khorasani¹, M. Reza Esfahani^{2*}

1- Ph.D. Student in Structure, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Fiber reinforced polymers (FRP) are the safe alternatives to steel bars in reinforced concrete members in a humid environment. They have a very high durability against corrosion, especially in the extreme weather conditions. As a result of the low modulus of elasticity of these bars compared to the steel bars, the deflection and crack width are high in the beams reinforced with these bars. In this paper, the flexural behavior and cracking of concrete beams reinforced with GFRP bars are investigated. Twelve reinforced concrete beams with the cross-section of 250×250 mm and length of 2200 mm were manufactured and tested in a four-point bending setup. Eight beams were made with low reinforcement ratio, 4 of which were made of high-strength concrete and 4 were made of normal-strength concrete. In addition, 4 other beams were made with high reinforcement ratio made of normal-strength concrete. The parameters studied in this research are concrete strength, tensile bars arrangement and reinforcement ratio. The results show that the change in the strength of concrete as well as the change in the arrangement of tensile bars and reinforcement ratio lead to a change in the flexural behavior of the beams and also affect the cracking. Moreover, the experimental results are compared with the values predicted by ACI440.1R code.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 January 2018

Revise Date: 22 June 2018

Accept Date: 07 August 2018

Keywords:

RC Beams

Flexural Behavior

Cracking

GFRP Reinforcing Bars

Concrete Strength

Bars Arrangement

Reinforcement Ratio

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.116344.1443

*Corresponding author: M. Reza Esfahani

Email address: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

خرابی زیرساخت‌های ناشی از خوردگی فولاد مسلح کننده، یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی است که صنعت ساختمان با آن روبرو است. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی پلیمر باعث ترقی و ظهور نسل جدیدی از پلیمرهای مسلح شده با الیاف به عنوان میلگردهای مسلح کننده شده است. میلگردهای پلیمری مسلح الیافی FRP به دلیل دوام بالا به عنوان مسلح کننده برای سازه‌های در معرض خوردگی استفاده می‌شوند، بنابراین به کار بردن این میلگردها یک راه مطمئن و مقرون به صرفه برای حفاظت از پل‌ها و زیرساخت‌های عمومی در برابر اثرات ویرانگر خوردگی است [۱]. با این وجود، هنوز اطلاعات کافی درباره خصوصیات این نوع آرماتورها و رفتار آنها در بتن موجود نیست. تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای پلیمری الیافی GFRP به دلیل مدول الاستیسیته کم این میلگردها در مقایسه با تیرهای بتنی مسلح فولادی، در یک نسبت مشابه مسلح کننده، دارای خیز و عرض ترک‌های بیشتری می‌باشند. با توجه به این که خیز و ترک خوردگی از مهمترین پارامترها در مسئله قابلیت بهره‌برداری سازه‌های بتن‌آرمه به شمار می‌آید، بنابراین طراحی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP در حالت بهره‌برداری تعیین‌کننده‌تر از حالت نهایی است [۲-۳]. در دو دهه اخیر مطالعات زیادی بر خیز و ترک خوردگی به عنوان مهم‌ترین پارامترها در طراحی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP انجام شده است. برای خیز، روش اصلاح ضرایب و پارامترهای معادله برانسون [۴] که در آیین‌نامه‌های طراحی فولاد موجود است، پیشنهاد شده است. سایر روش‌ها، استفاده از معادلات ممان اینرسی اصلاح شده با در نظر گرفتن انحنا در طول تیر می‌باشد. این روش‌های مختلف در آیین‌نامه‌های طراحی FRP برای محاسبه خیز تیرهای مسلح شده با FRP استفاده شده است [۵-۷]. از طرف دیگر، این آیین‌نامه‌ها رفتار ترک خوردگی، مدل‌ها و معادلات طراحی مربوط به اعضای بتنی مسلح شده با FRP را بر اساس فرمول‌ها و معادلات مربوط به بتن مسلح فولادی [۸-۹] با در نظر گرفتن ضرایبی که بر اساس تفاوت در خصوصیات مکانیکی بین میلگردهای FRP و فولاد، و همچنین رفتار میلگردها در بتن است، در نظر می‌گیرند. اگرچه هنوز مدل‌ها و معادلات مربوط به عرض ترک میلگردهای FRP و فولاد مورد بحث و بررسی هستند.

اصفهانی و همکاران [۱۰] رفتار پیوستگی میلگردهای GFRP در بتن را با میلگردهای فولادی مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که پیوستگی میلگردهای GFRP ماسه پاشی شده کم‌تر از میلگردهای فولادی نیست. النمر و همکاران [۱۱] رفتار خمشی ۱۲ تیر بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها مشخصات سطحی میلگردهای GFRP، مقاومت بتن و نسبت آرماتور پارامترهای اصلی بودند. آنها به این نتیجه رسیدند که پاسخ این تیرها از نظر رفتار ترک خوردگی، سختی پس از ترک خوردگی، مقدار تغییر شکل، عرض ترک و حالت شکست تفاوت عمده‌ای با تیرهای مسلح با فولاد دارند. آنها دریافتند که در هر سطح بار مخصوص، بیش‌ترین مقدار عرض ترک سطحی و بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در برخی اوقات از تیرهای مسلح فولادی بزرگ‌تر هستند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP پوشش‌دار ماسه‌ای^۱ در مقایسه با تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP مارپیچ^۲، تعداد ترک بیش‌تر با عرض ترک کم‌تری ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، میلگردهای GFRP پوشش‌دار ماسه‌ای، مشخصات پیوستگی و عملکرد خمشی بهتری دارند. علاوه بر این، افزایش مقاومت بتن و نسبت آرماتور، موجب کاهش خیز تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP می‌شود. به علاوه، آنها دریافتند که افزایش مقاومت بتن و نسبت آرماتور، موجب افزایش تعداد ترک‌ها، کاهش فاصله بین ترک‌ها و کاهش عرض ترک‌های اولیه می‌شود. تریالت و بن مکران [۱۲] مطالعه تجربی برای پی بردن به اثر نسبت آرماتور و مقاومت بتن در ۱۲ تیر بتنی مسلح شده با FRP را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تیرهای بتنی با نسبت مسلح کننده بیش‌تر، سختی بیش‌تری نسبت به تیرهای بتنی با نسبت مسلح کننده کم‌تر دارند. علاوه بر این، سختی تیر نسبت عکس با خیز در تیرهای بتن مسلح با FRP دارد و با افزایش نسبت آرماتور، خیز کاهش می‌یابد. همچنین، آنها به این نتیجه رسیدند که سختی تیرها با تغییر مقاومت بتن تغییر چندانی نخواهد کرد (کم‌تر از ۱۰٪) و با افزایش نسبت آرماتور، مقاومت نهایی نیز زیاد می‌گردد. همچنین، آنها

^۱ - Sand-Coated

^۲ - Helically Grooved

دریافتند که نسبت آرماتور تأثیر کمی در فاصله بین ترک‌ها دارد، و زمانی که بار افزایش می‌یابد، فاصله بین ترک‌ها اندکی کاهش پیدا می‌کند. به علاوه، آنها پی بردند در یک مقدار لنگر مشخص، با بالا رفتن مقاومت بتن، عرض ترک بیش‌تر می‌شود. گنگارا و فازا [۱۳] نشان دادند که هندسه تیرها نقش مهمی را در تشکیل ترک ایفا می‌کند. هم‌چنین، تریالت و بن مکران [۱۲] بیان کردند، افزایش نسبت میلگرد مسلح کننده، فاصله بین ترک‌ها را کاهش می‌دهد. مسمودی و همکاران [۱۴] با بررسی رفتار خمشی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP نشان دادند که نسبت میلگرد اثر ناچیزی بر فاصله ترک دارد، اما نوع میلگرد استفاده شده مؤثر است. پیوستگی بهتر بین بتن و میلگرد مسلح کننده، باعث کاهش فاصله بین ترک‌ها و در نتیجه کاهش عرض ترک می‌شود. آنها نشان دادند که اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP نسبت به میلگردهای فولادی در یک محیط مشابه، رفتار پیوستگی خوبی دارند. هم‌چنین، آنها پی بردند با افزایش نسبت آرماتور، عرض ترک کاهش پیدا می‌کند و مقاومت بتن تأثیر زیادی بر عرض ترک ندارد. اسپینا و باکیس [۱۵] تأثیر نسبت میلگرد مسلح کننده را بر عرض ترک خوردگی تیرهای بتنی مسلح شده به میلگردهای GFRP مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش انجام شده نشان داد که نسبت میلگرد مسلح کننده تأثیر بسیار زیادی در عرض ترک دارد و با افزایش نسبت میلگرد مسلح کننده، عرض ترک‌ها کاهش می‌یابد. اصفهانی و همکاران [۱۶] رفتار خمشی ۱۲ نمونه تیر بتن‌آرمه تقویت شده با ورق‌های CFRP در مقاطع با درصدهای مختلف فولاد کششی (فولاد کم، متوسط و زیاد) را بررسی کردند که در این تحقیق نسبت آرماتور پارامتر اصلی بود. نتایج تحقیق نشان داد که رابطه طراحی آیین‌نامه ACI440.2R-02 آمریکا [۱۷] و ISIS کانادا [۱۸] اثر تقویت‌کنندگی ورق‌های FRP در مقاومت تیرهای خمشی با فولاد کم را دست بالا برآورد می‌کند. افتخار و مستوفی نژاد [۱۹] اثرات آرایش میلگرد فولادی را بر فواصل و عرض ترک‌های خمشی در تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با صفحات CFRP بررسی کردند. در این تحقیق تعداد ۹ تیر بتن‌آرمه مسلح شده با میلگردهای فولادی در مقیاس واقعی، با مشخصات یکسان (از لحاظ ابعاد و میزان میلگردهای کششی و فشاری) و با سه آرایش مختلف آرماتور کششی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که آرایش آرماتورهای کششی می‌تواند یک پارامتر مؤثر بر خیز و ترک‌خوردگی تیرهای بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP باشد، اما در روابط آیین‌نامه‌ای، اثر آن در نظر گرفته نشده است. سبزی و اصفهانی [۲۰] با استفاده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی ۱۲ تیر بتن‌آرمه، تأثیر آرایش میلگردهای کششی فولادی بر قلوه‌کن شدن بتن در تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با ورق‌های CFRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت یکسان بودن مساحت کل میلگردهای کششی، با ریزتر شدن آرایش میلگردها همراه با افزایش تعداد آنها، احتمال رخ دادن پدیده‌ی قلوه‌کن شدن بتن افزایش می‌یابد.

۲- اهمیت موضوع

اگرچه مطالعات علمی و تجربی زیادی بر رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP انجام شده است و مطابق با نتایج، مدل‌های تجربی پیشنهاد شده است، لیکن در مورد اثر مقاومت بتن، آرایش و نسبت میلگردها بر رفتار خمشی و ترک‌خوردگی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP نتایج اندکی وجود دارد. بنابراین نیاز است تا مطالعات بیش‌تری در مورد رفتار این میلگردها در بتن، با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف انجام شود و روابط موجود در آیین‌نامه‌های طراحی ارزیابی گردد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مصالح

میلگردهای کششی: در این پژوهش، از میلگردهای GFRP با چهار قطر مختلف ۱۸ و ۱۴ میلی‌متر (برای نسبت آرماتور زیاد) و ۱۶ و ۱۰ میلی‌متر (برای نسبت آرماتور کم) به عنوان میلگردهای کششی نمونه‌ها استفاده شده است. میلگردهای GFRP استفاده شده از نوع پوشش‌دار ماسه‌ای می‌باشند و جهت اطمینان از مشخصات مکانیکی ارائه شده توسط کارخانه‌ی سازنده، آزمایش‌های مربوط به مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP طبق استانداردها انجام شده است. مشخصات میلگردهای GFRP در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP.

کرنش نهایی (%)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	قطر (mm)
۱/۸۰	۷۸۹	۴۴	۱۰
۱/۹۹	۸۲۵	۴۵	۱۴
۱/۸۰	۷۷۵	۴۶	۱۶
۱/۷۱	۸۰۰	۴۲	۱۸

میلگردهای فولادی: در این پژوهش، از میلگردهای فولادی با دو قطر مختلف درشت (۱۰ میلی‌متر) و ریز (۸ میلی‌متر) به عنوان میلگردهای عرضی، و از دو میلگرد فولادی با قطر ۱۲ میلی‌متر به عنوان میلگردهای فوقانی در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. میلگردهای فولادی استفاده شده از نوع تیپ ۳ و آجدار هستند. مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی با استفاده از آزمایش کشش، طبق استاندارد بدست آمد. مشخصات میلگردهای فولادی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی.

کرنش نهایی (%)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	قطر (mm)
۱۲/۱۶	۶۲۳	۴۶۳	۱۹۰	۸
۱۲/۴۴	۶۸۳	۴۱۲	۲۱۰	۱۰
۱۶/۴۵	۶۰۲	۴۲۴	۲۰۵	۱۲

بتن: در ساخت نمونه‌ها از دو نوع بتن با مقاومت معمولی حدود ۳۰ مگاپاسکال و مقاومت بالا حدود ۶۰ مگاپاسکال به کار گرفته شده است. مشخصات هر دو نوع بتن مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. برای ساخت بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال از میکروسیلیس و فوق روان‌کننده نیز استفاده شد. برای تعیین مقاومت فشاری مشخصه‌ی هر یک از نمونه‌های تیری، ۱۲ نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر ساخته و در شرایط مشابه نمونه‌های تیری عمل‌آوری گردیدند. ۴ نمونه استوانه‌ای در سن ۲۸ روز آزمایش شد و سایر نمونه‌ها به عنوان نمونه شاهد در زمان بارگذاری نهایی نمونه‌های تیری شکسته شدند.

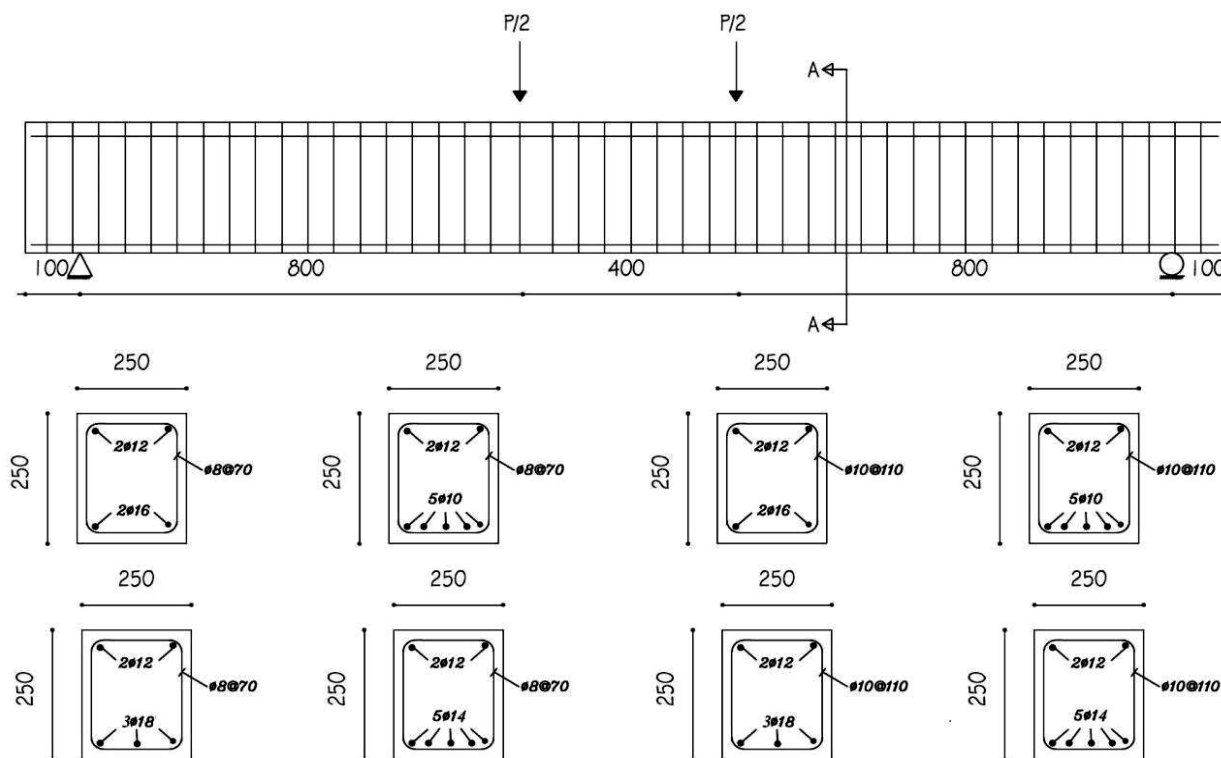
جدول ۳: مشخصات بتن مصرفی.

بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های مصالح سنگی (mm)	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	مقاومت بتن مصرفی (MPa)
۱۴	۰/۵	تیپ ۲	۳۰
۱۰	۰/۳	تیپ ۲	۶۰

۲-۳- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش جمعاً ۱۲ نمونه تیر بتن‌آرمه مسلح شده با میلگردهای GFRP به ابعاد مقطع ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر و به طول ۲۲۰۰ میلی‌متر، جهت انجام آزمایش خمشی و بررسی خیز و ترک‌خوردگی، طراحی و ساخته شده است. فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ۸ نمونه از تیرها با نسبت آرماتور کم ساخته شده‌اند که ۴ نمونه از آنها از بتن با مقاومت بالا و ۴ نمونه‌ی دیگر از بتن با مقاومت معمولی ساخته شدند. ۴ نمونه‌ی دیگر از تیرها با نسبت آرماتور زیاد و ساخته شده از بتن با مقاومت معمولی می‌باشند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، شامل مقاومت بتن، آرایش و نسبت میلگردها می‌باشند. در ساخت نمونه‌ها از دو نوع بتن با مقاومت

معمولی حدود ۳۰ مگاپاسکال و مقاومت بالا حدود ۶۰ مگاپاسکال به کار گرفته شده است. بررسی اثر آرایش میلگردهای کششی شامل تغییر در تعداد و قطر میلگردها، در صورت ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردهای کششی می‌باشد. در این پژوهش چهار نوع آرایش برای میلگردهای کششی در نظر گرفته شده است که به صورت ۳۰۱۸ و ۵۰۱۴ (به طور میانگین برابر ۰/۰۱۴۴) برای نسبت آرماتور زیاد و ۲۰۱۶ و ۵۰۱۰ (به طور میانگین برابر ۰/۰۰۷۴) برای نسبت آرماتور کم می‌باشد. همچنین تغییر در آرایش خاموت شامل تغییر در فاصله و قطر میلگردهای خاموت، با ثابت نگه داشتن مقدار A_p/S می‌باشد. در این پژوهش، دو نوع آرایش برای خاموت در نظر گرفته شده است، که به صورت ۷۰@۸ و ۱۱۰@۱۰ می‌باشد. شکل ۱، ابعاد هندسی و نحوه آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: بارهای اعمالی، ابعاد هندسی و نحوه آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌های آزمایشگاهی (ابعاد بر حسب میلی‌متر).

پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها جهت آزمایش خمشی آماده می‌شوند. در جدول ۴، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. تیرها به صورت کلی $aDc-dSf-H$ و $aDc-dSf-N$ نام‌گذاری شده‌اند که a ، c ، d و f به ترتیب تعداد میلگردهای کششی، قطر میلگردهای کششی، قطر میلگردهای عرضی و فاصله بین میلگردهای عرضی می‌باشد. H و N نیز بیانگر مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال است که منظور از N بتن با مقاومت معمولی (۳۰ مگاپاسکال) و H بتن با مقاومت بالا (۶۰ مگاپاسکال) می‌باشد. در تمامی تیرها از دو میلگرد فولادی با قطر ۱۲ میلی‌متر به عنوان میلگردهای فوقانی استفاده شده است.

جدول ۴: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.

تیرها	مقاومت بتن (MPa)	میلگردهای کششی	میلگردهای خاموت	سطح مقطع میلگردهای کششی (mm ²)	d (mm)	نسبت آرماتور (ρ_f)	ρ_{fb}/ρ_f
3D18-8S70-N	۳۰	۳Ø۱۸	Ø۸@۷۰	۷۶۳	۲۱۳	۰/۰۱۴۴	۳/۲۶
3D18-10S110-N	۳۰	۳Ø۱۸	Ø۱۰@۱۱۰	۷۶۳	۲۱۱	۰/۰۱۴۴	۳/۲۹
5D14-8S70-N	۳۰	۵Ø۱۴	Ø۸@۷۰	۷۷۰	۲۱۵	۰/۰۱۴۳	۳/۰۷
5D14-10S110-N	۳۰	۵Ø۱۴	Ø۱۰@۱۱۰	۷۷۰	۲۱۳	۰/۰۱۴۴	۳/۱۰
2D16-8S70-N	۳۰	۲Ø۱۶	Ø۸@۷۰	۴۰۲	۲۱۴	۰/۰۰۷۵	۱/۵۸
2D16-10S110-N	۳۰	۲Ø۱۶	Ø۱۰@۱۱۰	۴۰۲	۲۱۲	۰/۰۰۷۶	۱/۶۰
5D10-8S70-N	۳۰	۵Ø۱۰	Ø۸@۷۰	۳۹۳	۲۱۷	۰/۰۰۷۲	۱/۵۸
5D10-10S110-N	۳۰	۵Ø۱۰	Ø۱۰@۱۱۰	۳۹۳	۲۱۵	۰/۰۰۷۳	۱/۶۰
2D16-8S70-H	۶۰	۲Ø۱۶	Ø۸@۷۰	۴۰۲	۲۱۴	۰/۰۰۷۵	۱/۰۷
2D16-10S110-H	۶۰	۲Ø۱۶	Ø۱۰@۱۱۰	۴۰۲	۲۱۲	۰/۰۰۷۶	۱/۰۸
5D10-8S70-H	۶۰	۵Ø۱۰	Ø۸@۷۰	۳۹۳	۲۱۷	۰/۰۰۷۲	۱/۰۷
5D10-10S110-H	۶۰	۵Ø۱۰	Ø۱۰@۱۱۰	۳۹۳	۲۱۵	۰/۰۰۷۳	۱/۰۸

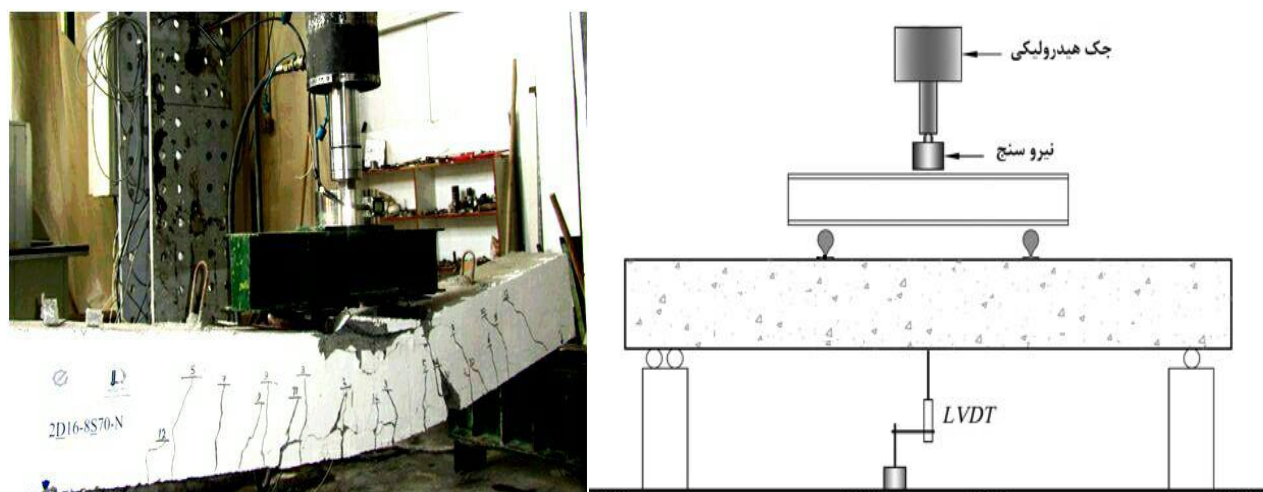
۳-۳- تجهیزات و روند انجام آزمایش خمشی

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای یکی از بهترین و متداول‌ترین آزمایش‌های تیری است. به همین منظور در این پژوهش، تمامی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP تحت خمش چهار نقطه‌ای بر روی تکیه‌گاه‌های ساده مورد آزمایش قرار گرفتند. نیرو به وسیله یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن (به صورت بار استاتیکی و یکنواخت) و یک تیر توزیع کننده فولادی صلب به صورت بار دو نقطه‌ای به فاصله ۴۰۰ میلی‌متر به تیر نمونه‌ی آزمایشگاهی وارد شد. جهت اندازه‌گیری خیز وسط دهانه تیر از دستگاه اندازه‌گیری تغییر مکان خطی^۳ (LVDT) استفاده شده است. نیرو توسط نیروسنج^۴ و به صورت استاتیکی به دستگاه ثبت داده^۵ منتقل شد و خیز تجربی تیرها در وسط دهانه برداشت شد. اطلاعات خروجی از طریق ارتباط LVDT و Load Cell با سیستم ثبت داده‌ها به وسیله رایانه ثبت شد و نتایج مربوط به خیز تیرها به صورت نمودار بار - تغییرمکان نشان داده شده است. به علاوه، در مراحل مختلف بارگذاری، مقدار عرض ترک اندازه‌گیری و چگونگی گسترش ترک‌ها در یک طرف هر تیر رسم شد، و بار متناظر با ایجاد هر ترک در کنار آن نوشته شد، تا چگونگی شکست تیر مشخص گردد. نتایج مربوط به ترک خوردگی، به صورت نمودار بار - عرض ترک نشان داده شده است. شکل ۲، چگونگی قرارگیری تجهیزات سنجش نیرو و تغییرمکان را بر روی تیر نشان می‌دهد. نمونه‌ها با نسبت ρ_f/ρ_{fb} بزرگ‌تر از ۱ طراحی و ساخته شده‌اند. بنابراین، شکست تیرها به صورت خرد شدن بتن در ناحیه فشاری روی می‌دهد. شکست مطلوب طراحی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی، جاری شدن فولاد است، اما بر اساس آیین‌نامه ACI 440.1R [۷]، شکست خرد شدن بتن در ناحیه فشاری، شکست مطلوب طراحی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP است.

^۳ - Linear Variable Displacement Transducer

^۴ - Load Cell

^۵ - Logger-Data



شکل ۲: تجهیزات آزمایش استاتیکی.

۴- نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های با نسبت آرماتور کم

۴-۱- ظرفیت خمشی و مود شکست

بر اساس آیین‌نامه ACI440.1R [۷]، وقتی یک تیر مسلح شده با میلگردهای GFRP تحت لنگر خمشی می‌شکند، دو نوع شکست محتمل است که یکی شکست ناشی از خرد شدن بتن در فشار و دیگری شکست کششی (پارگی) ماده مسلح کننده است. اگر در زمانی که کرنش فشاری بتن به ۰/۰۰۳۵ رسیده باشد، میلگردهای GFRP نیز به تنش کششی نهایی خود برسند، حالت بالانس اتفاق افتاده است. نسبت FRP مسلح کننده در حالت بالانس از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (1)$$

در این رابطه، E_f مدول الاستیسیته میلگردهای FRP، ε_{cu} کرنش معادل شکست فشاری بتن، ε_f کرنش میلگردهای FRP و d عمق مؤثر مقطع می‌باشند. اگر نسبت مسلح کننده ρ_f از نسبت آرماتور بالانس ρ_{fb} بیش تر باشد، شکست با خرد شدن بتن در ناحیه فشاری روی می‌دهد. در این حالت لنگر مقاوم اسمی مقطع از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$M_n = A_f \cdot f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) = \rho_f \cdot f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (2)$$

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (3)$$

در این روابط، A_f سطح مقطع میلگردهای کششی، E_f مدول الاستیسیته میلگردهای FRP، ε_{cu} کرنش معادل شکست فشاری بتن، ε_f کرنش میلگردهای FRP و d عمق مؤثر مقطع می‌باشند. به علاوه، اگر نسبت مسلح کننده ρ_f از ρ_{fb} کم تر باشد، شکست در اثر پارگی میلگردهای FRP اتفاق می‌افتد. در این حالت لنگر اسمی مقاوم مقطع از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (4)$$

در این رابطه، f_{fu} تنش نهایی میلگردهای FRP، c عمق تار خنثی و β_1 ضریبی است که نسبت عمق بلوک ویتنی به عمق تار خنثی را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که شکست ناشی از پارگی بسیار تردتر از شکست ناشی از خرد شدن فشاری بتن است. جدول ۵، خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آنها با آیین‌نامه ACI440.1R را نشان می‌دهد و شامل نمونه‌هایی است که نسبت آرماتور آنها کم می‌باشد (ρ_f به‌طور میانگین برابر ۰/۰۷۴). میانگین نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440.1R برابر ۱/۰۱ می‌باشد.

جدول ۵: خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با نسبت آرماتور کم و مقایسه نتایج با روابط

آیین‌نامه ACI440.1R.

نمونه‌ها	بار اولین ترک (kN)	بار نهایی آزمایشگاهی (kN)	تغییر مکان بیشینه در وسط تیر (mm)	بار به دست آمده بر اساس آیین‌نامه ACI440.1R (kN)	نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440.1R
2D16-8S70-N	۱۴	۱۲۷	۴۳/۰	۱۳۰	۰/۹۸
2D16-10S110-N	۱۲	۱۳۳	۴۸/۷	۱۲۹	۱/۰۳
5D10-8S70-N	۱۵	۱۳۳	۴۳/۰	۱۳۳	۱/۰۰
5D10-10S110-N	۱۸	۱۳۵	۴۸/۱	۱۳۱	۱/۰۳
2D16-8S70-H	۲۵	۱۷۷	۵۲/۲	۱۶۹	۱/۰۴
2D16-10S110-H	۳۰	۱۷۲	۵۳/۸	۱۶۷	۱/۰۳
5D10-8S70-H	۲۵	۱۷۰	۴۷/۶	۱۷۱	۰/۹۹
5D10-10S110-H	۲۵	۱۷۳	۴۹/۵	۱۶۹	۱/۰۲
				میانگین	۱/۰۱

۲-۴- مقایسه آرایش مختلف خاموت و میلگردهای کششی بر ظرفیت باربری

تغییر در آرایش خاموت شامل تغییر در فاصله و قطر میلگردهای خاموت، با ثابت نگه داشتن مقدار A_{pV}/S می‌باشد. بر اساس آیین‌نامه انتظار می‌رود که ظرفیت باربری با تغییر در آرایش خاموت (با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها)، تغییر چندانی نداشته باشد، زیرا مقدار A_{pV}/S ثابت است. نتایج جدول ۵ نیز نشان می‌دهد که با افزایش فاصله و قطر خاموت (با ثابت نگه داشتن مقدار A_{pV}/S)، در نمونه‌های مشابه از نظر سایر پارامترها، ظرفیت باربری به میزان ناچیزی تغییر می‌کند.

تغییر در آرایش میلگردهای کششی شامل تغییر در تعداد و قطر میلگردها، با ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردهای کششی می‌باشد. مشابه تغییر در آرایش خاموت، بر اساس آیین‌نامه، به دلیل این‌که مساحت کل میلگردهای کششی ثابت است انتظار می‌رود که ظرفیت باربری با تغییر در آرایش میلگردهای کششی (با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها)، تغییر چندانی نداشته باشد. نتایج جدول ۵ نیز

نشان می‌دهد که با افزایش قطر و کاهش تعداد میلگردهای کششی، در نمونه‌های مشابه از نظر سایر پارامترها، ظرفیت باربری به میزان ناچیزی تغییر می‌کند.

۳-۴- تأثیر مقاومت بتن بر ظرفیت باربری

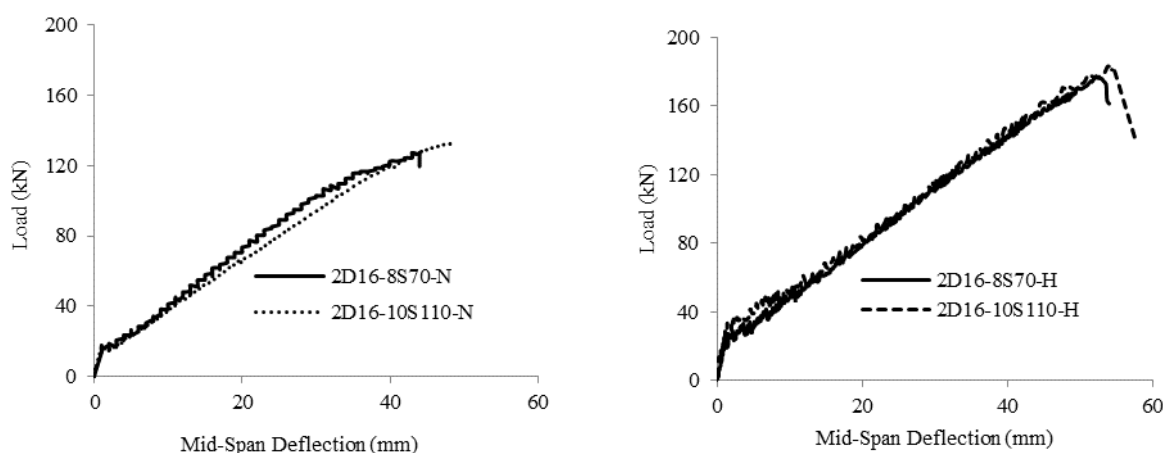
بر اساس نتایج جدول ۵، با افزایش مقاومت بتن از ۳۰ به ۶۰ مگاپاسکال، زمانی که از میلگردهای کششی درشت استفاده شود، ظرفیت باربری در نمونه 2D16-8S70-H نسبت به نمونه 2D16-8S70-N، حدود ۳۹/۴ درصد و همچنین در نمونه 2D16-10S110-H نسبت به نمونه 2D16-10S110-N، حدود ۲۹/۳ درصد افزایش یافته است. به علاوه، هنگامی که از میلگردهای کششی ریز استفاده شود، ظرفیت باربری در نمونه 5D10-8S70-H نسبت به نمونه 5D10-8S70-N، حدود ۲۷/۸ درصد و همچنین در نمونه 5D10-10S110-H نسبت به نمونه 5D10-10S110-N، حدود ۲۸/۱ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش مقاومت بتن از ۳۰ به ۶۰ مگاپاسکال در نمونه‌های مشابه، به طور میانگین حدود ۳۱ درصد ظرفیت باربری تیرها را افزایش می‌دهد. یوست و همکاران [۲۱] نیز اظهار داشتند که افزایش مقاومت بتن باعث عملکرد بهتر خصوصیات مقاومت کششی میلگردهای GFRP در بتن می‌شود.

۴-۴- خیز (تغییر مکان)

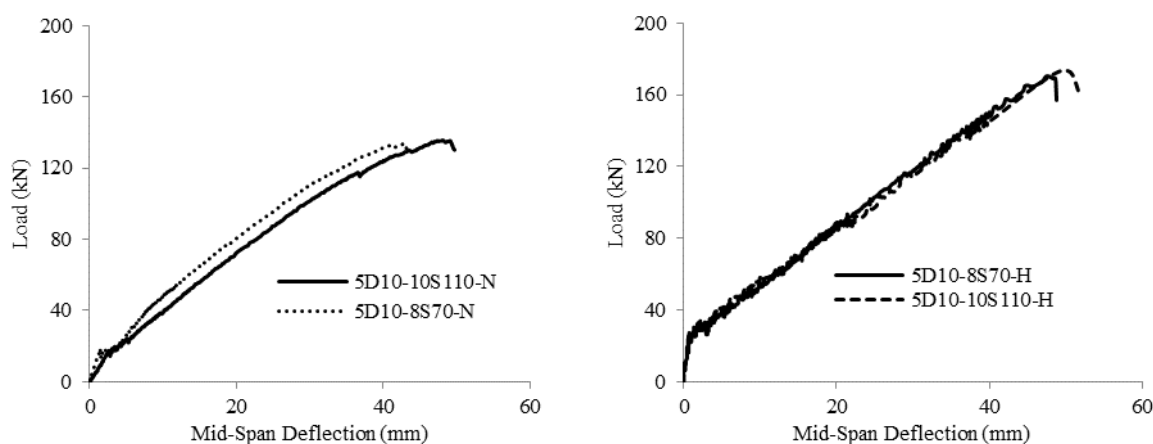
از آنجا که مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP کم‌تر از فولاد است، پس از ترک خوردگی، سختی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP به شدت کاهش یافته و خیز آنها بیش‌تر از تیرهای مسلح شده با فولاد خواهد شد، بنابراین، در این تیرها خیز یک عامل تعیین‌کننده است و باید در طراحی در نظر گرفته شود. در این پژوهش، خیز (تغییر مکان بیشینه وسط تیر) از میانگین دو LVDT نصب شده در وسط دهانه تیرها به دست آمده است. جدول ۵، تغییر مکان بیشینه در وسط هر تیر را نشان می‌دهد.

۴-۴-۱- مقایسه آرایش مختلف خاموت بر خیز، با ثابت نگه داشتن مقدار A_p/S

تغییر در آرایش خاموت شامل تغییر در فاصله و قطر میلگردهای خاموت، با ثابت نگه داشتن مقدار A_p/S می‌باشد. شکل ۳، مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای کششی درشت و آرایش خاموت متفاوت و شکل ۴، مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای کششی ریز و آرایش خاموت متفاوت را نشان می‌دهد. هر دو شکل، شامل تیرهای با مقاومت بتن بالا و معمولی می‌باشد.



شکل ۳: مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای کششی درشت و آرایش خاموت متفاوت.



شکل ۴: مقایسه منحنی‌های بار - تغییرمکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای کششی ریز و آرایش خاموت متفاوت.

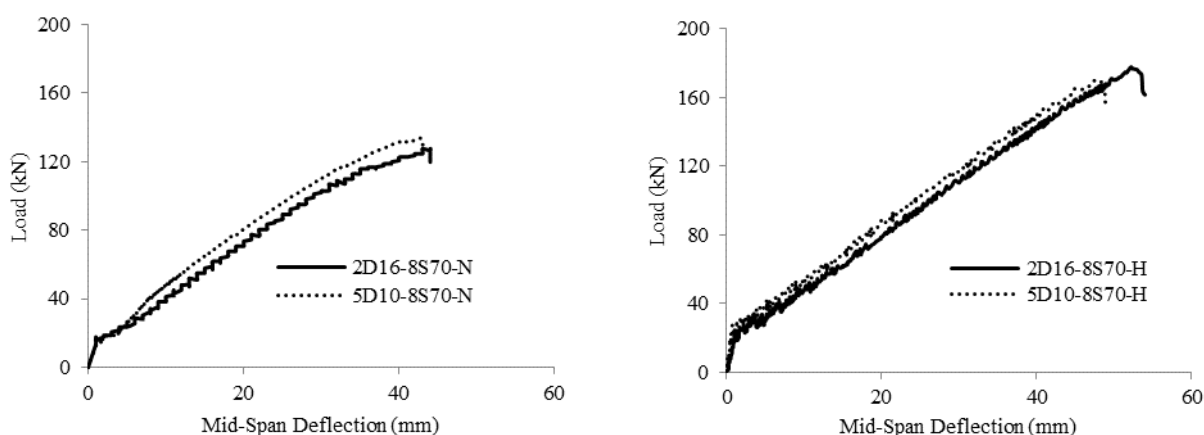
با توجه به منحنی‌های بار - تغییرمکان شکل ۳، در دو نمونه 2D16-10S110-N و 2D16-8S70-N، با افزایش فاصله و قطر خاموت، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر به میزان ۱۳/۳ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین، با توجه به منحنی بار - تغییرمکان مربوط به دو نمونه 2D16-10S110-H و 2D16-8S70-H، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر با افزایش فاصله و قطر خاموت، حدود ۳/۱ درصد افزایش می‌یابد.

با توجه به منحنی‌های بار - تغییرمکان شکل ۴، در دو نمونه 5D10-10S110-N و 5D10-8S70-N، با افزایش فاصله و قطر خاموت، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر حدود ۱۱/۹ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله و قطر خاموت در دو نمونه 5D10-10S110-H و 5D10-8S70-H، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر، به میزان ناچیزی حدود ۴ درصد افزایش می‌یابد.

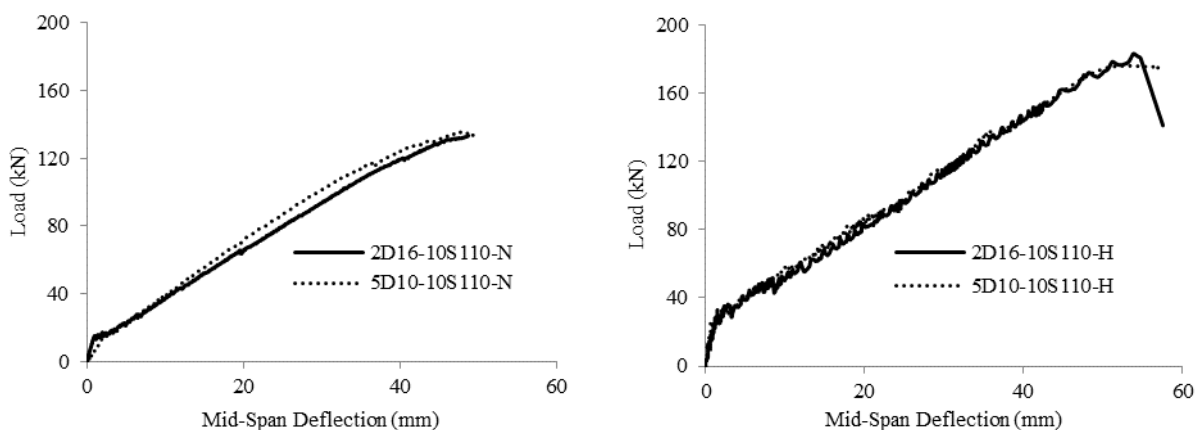
بر اساس پژوهش‌های انجام شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که در یک بار ثابت و هنگام استفاده از آرایش میلگرد کششی مشابه، در نمونه‌های با نسبت آرماتور کم، با افزایش فاصله و قطر خاموت (با ثابت نگه داشتن مقدار $S A_p$)، خیز وسط دهانه به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد که درصد افزایش خیز در نمونه‌های با مقاومت بتن معمولی بیش‌تر است. در خصوص این نتیجه می‌توان چنین عنوان نمود که کاهش قطر (افزایش تعداد میلگردهای عرضی)، باعث کاهش لغزش آرماتورهای طولی در بتن و در نتیجه باعث کاهش خیز تیر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر آرایش خاموت بر خیز تیرهای با مقاومت بتن معمولی بیش‌تر از تیرهای با مقاومت بتن بالا است. با توجه به جدول ۴، افزایش فاصله و قطر خاموت (کاهش تعداد میلگردهای عرضی)، به طور میانگین خیز را در نمونه‌های با مقاومت بتن معمولی حدود ۱۲/۶ درصد و در نمونه‌های با مقاومت بتن بالا حدود ۳/۵ درصد افزایش می‌دهد.

۲-۴-۴- مقایسه آرایش مختلف میلگردهای کششی بر خیز، با ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردها

تغییر در آرایش میلگردهای کششی شامل تغییر در تعداد و قطر میلگردها، با ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردها می‌باشد. شکل ۵، منحنی‌های بار - تغییرمکان تیرهای بتنی هنگام استفاده از خاموت با میلگردهای عرضی ریز و شکل ۶، منحنی‌های بار - تغییرمکان تیرهای بتنی هنگام استفاده از خاموت با میلگردهای عرضی درشت را نشان می‌دهد.



شکل ۵: مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای عرضی ریز و آرایش میلگرد کششی متفاوت.



شکل ۶: مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای عرضی درشت و آرایش میلگرد کششی متفاوت.

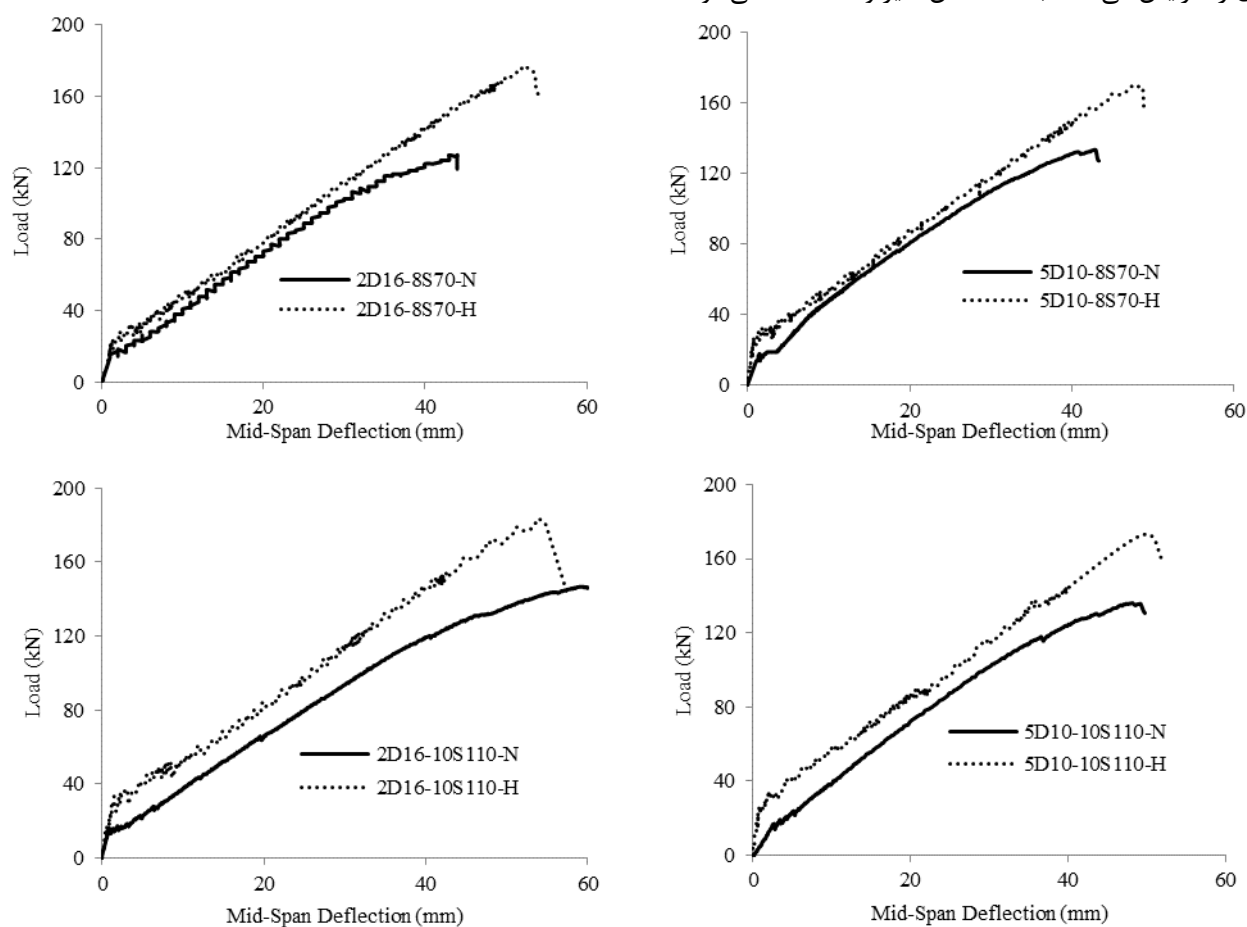
با توجه به منحنی‌های بار - تغییر مکان شکل ۵، در نمونه‌های با مقاومت بتن معمولی 2D16-8S70-N و 5D10-8S70-N، با افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر تقریباً ثابت مانده است. در نمونه‌های با مقاومت بتن بالا 2D16-8S70-H و 5D10-8S70-H، با افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر حدود ۸/۸ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به منحنی‌های بار - تغییر مکان شکل ۶، در دو نمونه 2D16-10S110-N و 5D10-10S110-N، با افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر به مقدار ناچیزی حدود ۱/۲۳ درصد کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با مقاومت بتن بالا 2D16-10S110-H و 5D10-10S110-H، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر حدود ۸ درصد کاهش یافته است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی، به طور میانگین خیز را در نمونه‌های با مقاومت بتن معمولی حدود ۰/۶ درصد و در نمونه‌های با مقاومت بتن بالا حدود ۸/۴ درصد کاهش می‌دهد. در خصوص این نتیجه می‌توان چنین عنوان نمود که چنانچه میلگردهای کششی از قطر کوچک‌تری برخوردار باشند، توزیع میلگردهای کششی در مقطع، در عرض بیش‌تری انجام شده و این باعث رفتار همگن و یکنواخت‌تر تیرها می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش تعداد میلگرد باعث توزیع یکنواخت‌تر میلگرد در عرض مقطع تیر بتنی می‌شود و در نتیجه باعث کمی کاهش خیز وسط دهانه می‌شود.

۳-۴-۴- تأثیر مقاومت بتن بر خیز در نمونه‌های مشابه

شکل ۷، منحنی‌های بار - تغییر مکان را در نمونه‌های مشابه (از نظر آرایش میلگردهای کششی و خاموت یکسان) را نشان می‌دهد. پارامتر متغیر، مقاومت بتن است و نتایج نشان می‌دهد که در یک بار ثابت در تمامی نمونه‌ها، افزایش مقاومت بتن باعث کاهش خیز تیرها می‌شود. به عبارت دیگر، در نمونه‌های مشابه و در یک بار ثابت، تیرهای ساخته شده از بتن با مقاومت بالا، خیز کمتری نسبت به تیرهای ساخته شده از بتن با مقاومت معمولی دارند. در بتن با مقاومت بالا، پیوستگی بتن با میلگردهای کششی بیشتر است که یک دلیل کاهش خیز با افزایش مقاومت بتن است. بنابراین، افزایش مقاومت بتن در تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP، علاوه بر این که ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، باعث کاهش خیز وسط دهانه می‌شود.

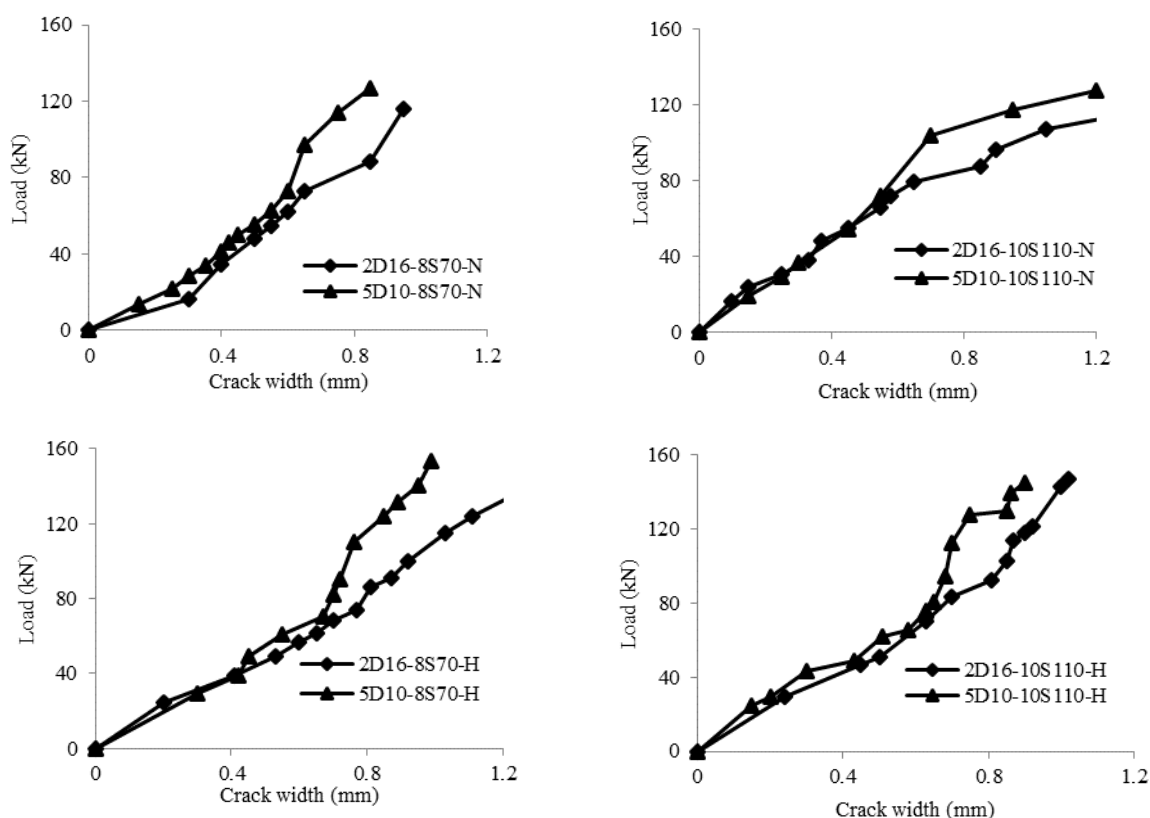


شکل ۷: منحنی‌های بار - تغییر مکان مربوط به تأثیر مقاومت بتن بر خیز در نمونه‌های مشابه.

۵-۴- رفتار ترک خوردگی

قبل از ترک خوردگی، کرنش میلگرد مسلح کننده و بتن یکسان است و هیچ‌گونه لغزشی در بین آنها وجود ندارد. وقتی تنش کششی از مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک ایجاد می‌گردد. در محل ترک با افزایش بازشدگی آن، تنش‌ها در ماده مسلح کننده افزایش و در بتن کاهش می‌یابند. پس از بازشدگی کامل ترک، تنش در بتن صفر شده و کل نیروی کششی توسط ماده مسلح کننده تحمل می‌شود [۱۰]. پارامترهای زیادی بر تعداد، فاصله و عرض ترک‌ها تأثیر دارند. در این پژوهش، اثر مقاومت بتن و آرایش میلگردهای کششی و عرضی

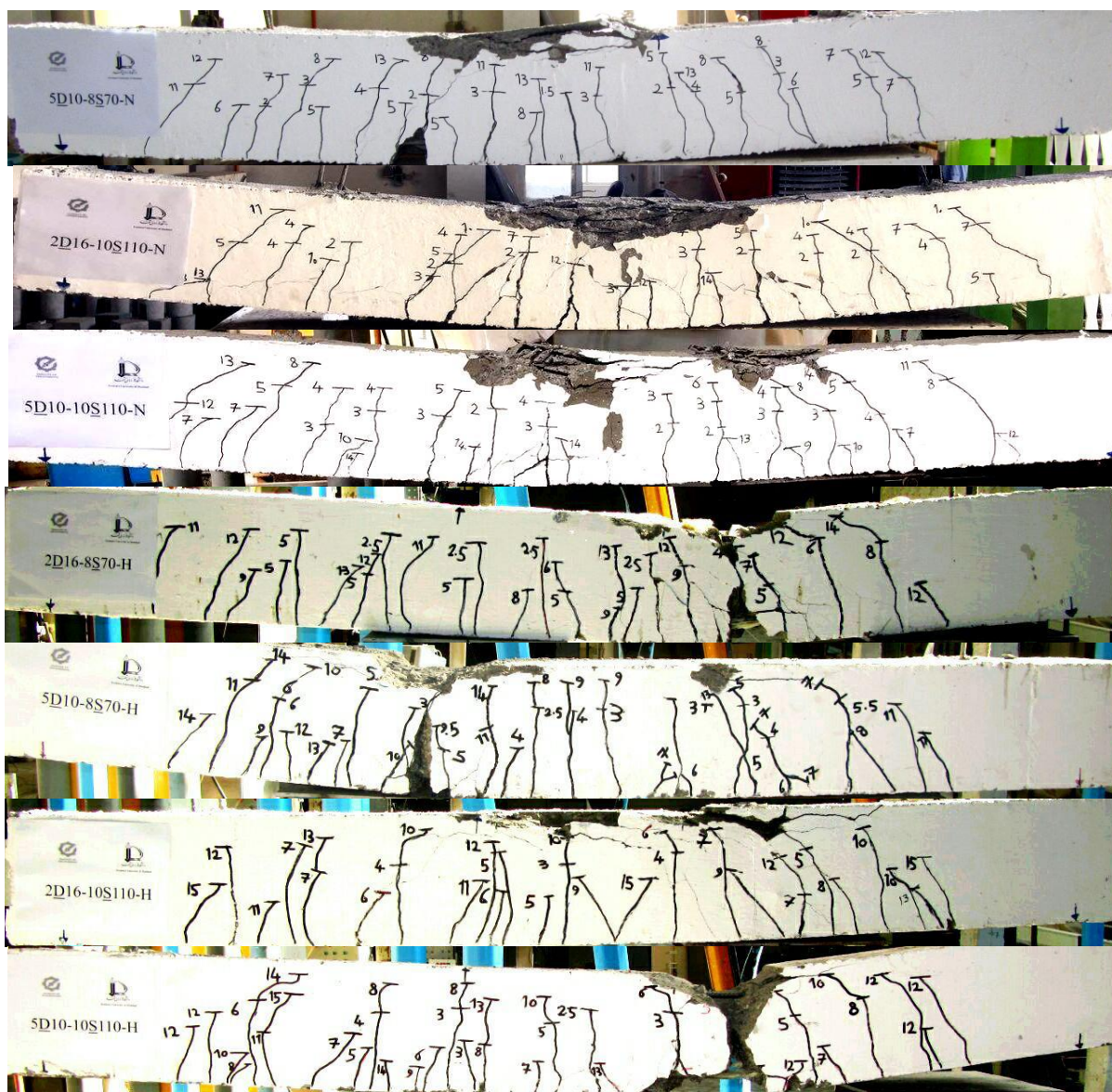
بر رفتار ترک خوردگی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP بررسی شده است. جدول ۵، مقدار بار اولین ترک در تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که رفتار ترک خوردگی نمونه‌ها تابعی از قطر میلگردهای کششی، قطر میلگردهای خاموت و مقاومت بتن است. در این پژوهش، تمامی تیرها قبل از بارگذاری، ترک نخورده می‌باشند. جهت بررسی رفتار ترک خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی، در طول آزمایش تا لحظه بار نهایی، تیرها با دقت کامل مشاهده شدند و عرض ترک متناظر در سطوح مختلف بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت شد. شکل ۸، نتایج آزمایشگاهی متناظر با هر تیر را به صورت نمودارهای بار - عرض ترک نشان می‌دهد.



شکل ۸: منحنی‌های بار بر حسب عرض ترک در نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت آرمان‌تور کم.

شروع مکانیزم رشد ترک با شکل‌گیری ترک‌های اولیه آغاز می‌شود. هنگامی که کرنش در ناحیه کششی یک مقطع بتنی با حد نهایی کرنش کششی بتن برابر شود، اولین ترک ظاهر می‌شود. با افزایش بار، ترک‌های بیش‌تری ظاهر می‌شود. شکل ۹، چگونگی ترک خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.





شکل ۹: چگونگی ترک خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت آرمان‌تور کم.

همان‌طور که منحنی‌های شکل ۸ نشان می‌دهد، تا بار حدود ۸۰ کیلونیوتن (در حدود بارهای سرویس آیین‌نامه‌ای)، در تمامی نمونه‌ها، با تغییر آرایش میلگردهای کششی، مقدار عرض ترک تغییر زیادی نمی‌کند، اما در بارهای بیش‌تر از ۸۰ کیلونیوتن، با افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی (استفاده از ۵۰/۱۰ به جای ۲۰/۱۶)، مقدار عرض ترک در طول تیر کاهش می‌یابد. بنابراین در تمامی نمونه‌ها، افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک خوردگی در طول تیر می‌شود. در واقع، استفاده از میلگردهای با قطر کم‌تر، باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک خوردگی در طول تیر می‌شود. این توزیع یکنواخت ترک، عرض ترک کم‌تری را ایجاد می‌کند. در خصوص این نتیجه می‌توان چنین عنوان نمود که مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگردهای کششی GFRP به قطر میلگردها وابسته است. هرچه قطر میلگردهای کششی کوچک‌تر باشد، عملکرد پیوستگی بین بتن و میلگرد بهتر است و این پیوستگی بیش‌تر باعث کاهش عرض ترک‌های ایجاد شده می‌شود. در مورد میلگردهای عرضی می‌توان چنین عنوان نمود که در یک بار ثابت، کاهش قطر و فاصله بین میلگردهای عرضی، تغییر چندانی در مقدار عرض ترک در طول تیر ایجاد نمی‌کند. هم‌چنین، منحنی‌های شکل ۸ نشان می‌دهند که

استفاده از بتن با مقاومت بالا، باعث تغییر در رفتار ترک خوردگی تیرها می‌شود. به عبارت دیگر، در یک سطح بار مشخص تا لحظه نهایی، در تیرهای مشابه از نظر میلگردهای کششی و خاموت، استفاده از بتن با مقاومت بالا، عرض ترک کمتری را نسبت به بتن با مقاومت معمولی ایجاد می‌کند. بوگرا و همکاران [۲۲] نیز همین رفتار را در دال‌های بتنی مسلح شده با FRP مشاهده کردند. به عبارت دیگر، استفاده از بتن با مقاومت بالاتر در دال‌های بتنی مسلح شده با FRP، باعث کاهش عرض ترک‌ها می‌شود.

۵- نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های با نسبت آرماتور زیاد

۵-۱- ظرفیت خمشی

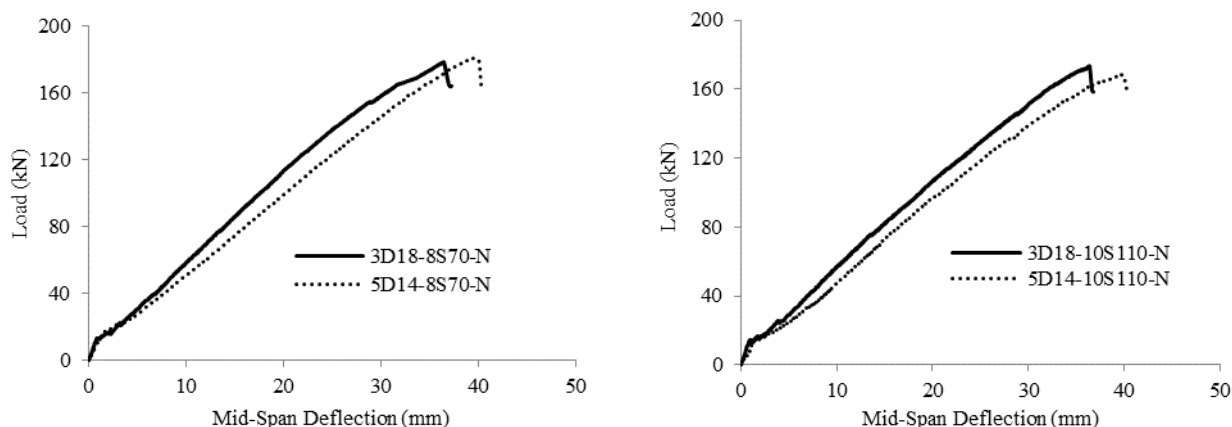
جدول ۶، خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با نسبت آرماتور زیاد و مقایسه آنها با آیین‌نامه ACI440.1R را نشان می‌دهد. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که همانند تیرهای با نسبت آرماتور کم، تغییر در آرایش خاموت و تغییر در آرایش میلگردهای کششی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری تیرهای با نسبت آرماتور زیاد هم ندارد. جدول ۶ شامل نمونه‌های با نسبت آرماتور زیاد می‌باشد (p_f به‌طور میانگین برابر ۰/۱۴۴). میانگین نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440.1R برابر ۱/۰۶ می‌باشد.

جدول ۶: خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با نسبت آرماتور زیاد و مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه ACI440.1R.

نمونه‌ها	بار اولین ترک (kN)	بار نهایی آزمایشگاهی (kN)	تغییر مکان بیشینه در وسط تیر (mm)	بار به دست آمده بر اساس آیین‌نامه ACI440 (kN)	نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440
3D18-8S70-N	۱۸	۱۷۸	۳۶/۳۶	۱۶۶	۱/۰۷
3D18-10S110-N	۱۸	۱۷۳	۳۶/۳۴	۱۶۳	۱/۰۶
5D14-8S70-N	۲۰	۱۸۰	۳۹/۳۹	۱۶۹	۱/۰۷
5D14-10S110-N	۱۹	۱۶۹	۳۹/۸۳	۱۶۶	۱/۰۲
				میانگین	۱/۰۶

۵-۲- مقایسه آرایش مختلف میلگردهای کششی بر خیز، با ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردها

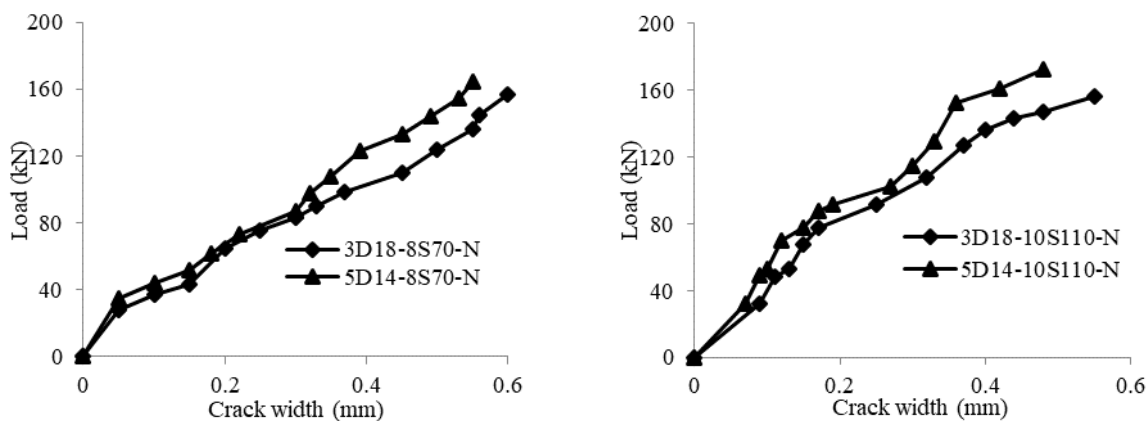
شکل ۱۰، منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای بتنی با نسبت آرماتور زیاد را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش قطر و افزایش تعداد میلگردهای کششی باعث کمی افزایش خیز وسط دهانه نمونه‌ها شده است. با توجه به منحنی‌های بار - تغییر مکان شکل ۱۰، با افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی، خیز متناظر با بار نهایی در وسط تیر در دو نمونه 3D18-8S70-N و 5D14-8S70-N حدود ۸/۳ درصد و در دو نمونه 3D18-10S110-N و 5D14-10S110-N حدود ۹/۶ درصد افزایش می‌یابد.



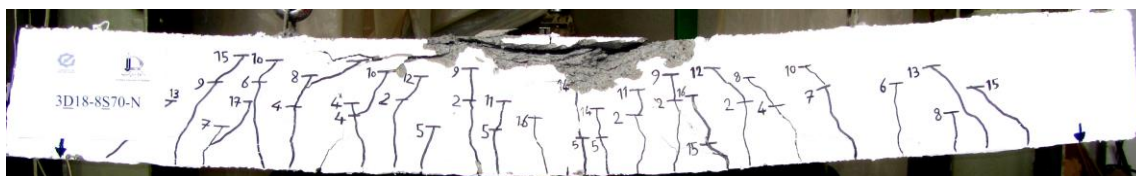
شکل ۱۰: منحنی‌های بار - تغییرمکان مربوط به تأثیر آرایش میلگردهای کششی هنگام استفاده از میلگردهای عرضی ریز و درشت.

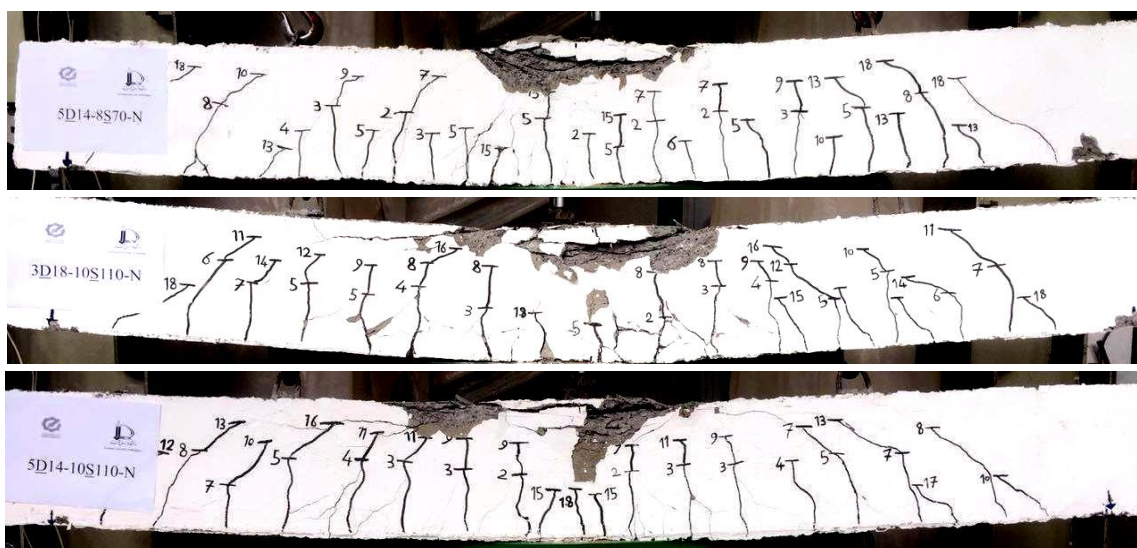
۳-۵- رفتار ترک خوردگی

جدول ۶، مقدار بار اولین ترک نمونه‌های با درصد آرماتور کششی زیاد را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که رفتار ترک خوردگی نمونه‌ها و همچنین عرض ترک مربوط به اولین ترک خمشی، تابعی از قطر میلگردهای کششی و قطر میلگردهای خاموت است. جهت بررسی رفتار ترک خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی، در طول آزمایش تا لحظه بار نهایی، عرض ترک متناظر در سطوح مختلف بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت شد. شکل ۱۱، نتایج آزمایشگاهی هر تیر را به صورت نمودارهای بار - عرض ترک نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲، چگونگی ترک خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: منحنی‌های بار بر حسب عرض ترک در نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت آرماتور زیاد.





شکل ۱۲: چگونگی ترک خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت آرماتور زیاد.

همان‌طور که منحنی‌های شکل ۱۱ نشان می‌دهد، همانند نتایج مربوط به نمونه‌های با درصد آرماتور کششی کم، افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی (استفاده از $5\phi 14$ به جای $3\phi 18$) در این نمونه‌ها هم باعث کاهش عرض ترک در طول تیر شده است. به عبارت دیگر در یک بار ثابت، در نمونه‌های با درصد آرماتور زیاد، کاهش قطر میلگردهای کششی و هم‌زمان افزایش تعداد آنها باعث کاهش عرض ترک‌ها در طول تیر می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خمشی ۱۲ تیر بتن‌آرمه مسلح شده با میلگردهای GFRP بررسی شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، شامل مقاومت بتن، آرایش و نسبت میلگردهای کششی بودند. نتایج این پژوهش با توجه به بررسی‌های انجام شده، به صورت زیر است:

- در تمامی نمونه‌ها (تیرهای با نسبت آرماتور کم و زیاد)، با تغییر در آرایش خاموت و یا تغییر در آرایش میلگردهای کششی، ظرفیت باربری تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.
- نتایج مربوط به تأثیر مقاومت بتن بر ظرفیت باربری و خیز تیرهای با نسبت آرماتور کم نشان می‌دهد که افزایش مقاومت بتن در نمونه‌های مشابه (از نظر آرایش میلگردهای خاموت و آرایش میلگردهای کششی) از طرفی باعث افزایش ظرفیت باربری تیرها شده است و از طرف دیگر، در یک مقدار بار ثابت، خیز وسط دهانه را نیز کاهش داده است. به طور میانگین، افزایش مقاومت بتن از ۳۰ مگاپاسکال به ۶۰ مگاپاسکال در نمونه‌های مشابه با درصد آرماتور کم، حدود ۳۱ درصد ظرفیت باربری تیرها را افزایش می‌دهد. هم‌چنین، در یک سطح بار مشخص تا لحظه نهایی، در تیرهای مشابه از نظر میلگردهای کششی و خاموت، استفاده از بتن با مقاومت بالا، عرض ترک کم‌تری را نسبت به بتن با مقاومت معمولی ایجاد می‌کند.
- منحنی‌های بار - تغییرمکان تیرها (تمامی تیرهای با نسبت آرماتور کم و زیاد) نشان می‌دهد که در یک بار ثابت و هنگام استفاده از آرایش میلگرد کششی مشابه، با افزایش فاصله و قطر خاموت (با ثابت نگه داشتن مقدار A_p/S)، خیز وسط دهانه تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. هم‌چنین در نمونه‌های مشابه و در یک بار ثابت، با کاهش قطر و افزایش تعداد میلگردهای کششی (ثابت نگه داشتن مساحت کل میلگردهای کششی) نیز خیز وسط دهانه تغییر چندانی نمی‌کند.

- منحنی‌های بار - عرض ترک تیرهای با نسبت آرماتور کم نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، تا بار حدود ۸۰ کیلونیوتن (در حدود بارهای سرویس آیین‌نامه‌ای)، با تغییر آرایش میلگردهای کششی، مقدار عرض ترک تغییر زیادی نمی‌کند، اما در بارهای بیش‌تر از ۸۰ کیلونیوتن، با افزایش تعداد آرماتور و کاهش قطر میلگردهای کششی (استفاده از ۵۰۱۰ به جای ۲۰۱۶)، مقدار عرض ترک در طول تیر کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که در تمامی نمونه‌ها، افزایش تعداد و کاهش قطر میلگردهای کششی باعث کاهش عرض ترک در طول تیر می‌شود. همچنین نتایج مربوط به تغییر آرایش خاموت نشان می‌دهد که در یک بار ثابت، کاهش قطر و فاصله بین میلگردهای عرضی در تیرهای مشابه از نظر سایر پارامترها، تغییر چندانی در مقدار عرض ترک در طول تیر ایجاد نمی‌کند.
- منحنی‌های بار - عرض ترک تیرهای با درصد آرماتور زیاد نشان می‌دهد که در یک بار ثابت، با افزایش میلگرد و کاهش قطر میلگردهای کششی (استفاده از ۵۰۱۴ به جای ۳۰۱۸)، عرض ترک در طول تیر (در یک فاصله ثابت) کاهش می‌یابد.
- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی تیرها و روابط آیین‌نامه ACI440.1R نشان می‌دهد که در تیرهای با نسبت آرماتور کم، میانگین نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440.1R برابر ۱/۰۱ می‌باشد. همچنین در تیرهای با نسبت آرماتور زیاد، میانگین نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440.1R برابر ۱/۰۶ می‌باشد. بنابراین، میانگین نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440.1R در تیرهای با نسبت آرماتور زیاد، کمی بیش‌تر از تیرهای با نسبت آرماتور کم است. این نتایج برای بتن‌های با مقاومت کم و زیاد تفاوت چندانی ندارد.

مراجع

- [1] Matthys, S. and Taerwe, L. (2000). Concrete slabs reinforced with FRP grids. I: One-way bending. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 4(3), pp. 145–53.
- [2] Pilakoutas, K. and Neocleous, K. and Guadagnini, M. (2002). Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 6(3), pp. 154–61.
- [3] Nanni, A. (2003). North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues. *Construction and Building Materials*, 17(6–7), pp. 439–46.
- [4] Branson, D. E. (1968). Design procedures for computing deflections. *Journal of the American Concrete Institute*, 65(9), pp. 730-742.
- [5] CAN/CSA-S806. (2012). Design and Construction of building components with fibre-reinforced polymers. *Canadian Standards Association*. Ontario, Canada, p. 187.
- [6] ISIS Manual No.3. (2007). Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. *The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures*, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, p. 151.
- [7] ACI440.1R-15. (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Reported by ACI Committee 440*, Farmington Hills, Michigan.
- [8] Frosch, R. J. (1999). Another look at cracking and crack control in reinforced concrete. *ACI Structural Journal*, 96(3), pp. 437-442.

- [9] Gergely, P. and Lutz, L.A. (1968). Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 10(12), pp. 87-117.
- [10] Esfahani, MR. and Kianoush, MR. and Lachemi, M. (2005). Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Normal and Self Consolidating Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3), pp. 553-560.
- [11] El-Nemr, A. and Ahmed, A.E. and Benmokrane, B. (2013). Flexural Behaviour and Serviceability of Normal- and High-Strength Concrete Beams Reinforced with GFRP bars. *ACI Structural Journal*, 110(6), pp. 1077-1088.
- [12] Theriault, M. and Benmokrane, B. (1998). Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behaviour of concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 2(1), pp. 7-16.
- [13] GangaRao, H. V. S. and Faza, S. (1991). Bending and bond behaviour and design of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars. *Final report to the Federal Highway Administration*, West Virginia University, p. 159.
- [14] Masmoudi, R. and Benmokrane, B. and Chaallal, O. (1996). Cracking behaviour of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23(6), pp. 1172-1179.
- [15] Ospina, C. E. and Bakis, C. E. (2007). Indirect Flexural Crack Control of Concrete Beams and One-Way Slabs Reinforced with FRP Bars. *Proceedings of FRPRCS-8*, University of Patras, Patras, Greece, Volume 8.
- [16] Esfahani, M.R. and Kianoush, A.R. and Tajari, A.R. (2007). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering Structures*, Volume (29), pp. 2428-2444.
- [17] ACI 440.2R-02. (2002). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. *Reported by ACI Committee 440*.
- [18] ISIS Canada. (2001). Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fiber reinforced polymers. *Design Manual*.
- [19] Eftekhar, M.R. and Mostofinejad, D. (2011). Effects of Bar Size on the Cracking Pattern and Debonding Load of RC Beams Strengthened with FRP Sheets. *Sharif Journal, Sharif University of Technology*, 27(2), pp. 23-41: (in Persian).
- [20] Sabzi, J. and Esfahani, M.R. (2018). Effects of Tensile Steel Bars Arrangement on Concrete Cover Separation of RC Beams Strengthened by CFRP Sheets. *Construction and Building Materials*, 162(1), pp. 470-479.
- [21] Yost, J. R. and Gross, S. P. and Dinehart, D. W. (2003). Effective Moment of Inertia for Glass Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 100(6), pp. 732-739.
- [22] Bouguerra, K. and Ahmed, E. A. and El-Gamal, S. and Benmokrane, B. (2011). Testing of Full-Scale Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars. *Construction and Building Materials*, 25(10), pp. 3956-3965.