

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

رفتار پس از ترک خوردگی نمونه‌های کششی ساخته شده از بتن فوق توانمند، مسلح شده با میلگرد GFRP

حسینعلی رهدار^{۱*}، منصور قلعه‌نوی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

امروزه استفاده از مصالح نوین نظیر بتن فوق‌توانمند و میلگردهای الیاف شیشه GFRP در صنعت ساختمان توسعه یافته‌است. در بسیاری از پروژه‌ها معمولاً از این نوع مصالح در ساخت سازه‌های بتن مسلح و یا ترمیم آن‌ها استفاده می‌شود. به دلیل ویژگی‌های میلگرد GFRP و همچنین سطح جانبی متفاوت آن، رفتار باند - لغزش بین بتن و میلگرد در اعضای بتن مسلح ساخته شده از میلگرد GFRP در مقایسه با اعضای مسلح شده با میلگردهای فولادی متفاوت است، از این رو شناخت و بررسی رفتار اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP در قبل و بعد از ترک خوردگی، برای تحلیل رفتار غیر خطی سازه‌های بتن مسلح ضروری است. از آنجائیکه بتن فوق‌توانمند به دلیل ویژگی‌های آن نظیر مقاومت فشاری بالا، نفوذپذیری کم، مقاومت در برابر سیکل‌های یخبندان و ... به منظور کاهش ابعاد اعضای سازه و یا استفاده در سازه‌های خاص نظیر پل‌ها، نیروگاه‌های اتمی و ... بسیار کاربرد دارد، در این پژوهش رفتار قبل و پس از ترک خوردگی نمونه‌های مسلح کششی ساخته شده از بتن فوق‌توانمند و میلگرد GFRP مورد بررسی گرفته‌است. برای دست یافتن به این هدف نمونه‌های استوانه ای به طول ۸۵۰ میلی‌متر، مسلح شده با یک میلگرد GFRP در مرکز نمونه ساخته شده و تحت آزمایش کشش قرار گرفته‌اند و تأثیر نوع و قطر میلگرد و نسبت ضخامت پوشش بتن روی میلگرد به قطر میلگرد بر رفتار ترک‌خوردگی بتن فوق‌توانمند در کشش برای اعضای بتن مسلح بررسی شده است و سرانجام برای حداقل، حداکثر و متوسط فاصله ترک‌ها و همچنین تنش کششی ترک‌خوردگی در اعضای کششی با توجه به عوامل مؤثر بر آنها روابط مناسب و کاربردی ارائه گردیده‌است.

کلمات کلیدی: بتن فوق توانمند، مقاومت کششی، میلگرد GFRP، عضو کششی مسلح، ترک‌خوردگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.86500.1201	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2017.86500.1201	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۳۹۶/۰۹/۱۲	۱۳۹۶/۰۹/۱۲	۱۳۹۶/۰۹/۰۵	۱۳۹۶/۰۲/۳۱
*نویسنده مسئول:					حسینعلی رهدار	
پست الکترونیکی:					rahdar@uoz.ac.ir	

Post - Cracking Behavior of the Tensile Specimens Made from Ultra High Performance Concrete, Reinforced by GFRP Rebar

H.A. Rahdar^{1*}, M.Ghalehnovi²

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Zabol University, Zabol, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Since it is very important to know the material's behavior to evaluate the nonlinear behavior of structures, it is necessary to know the tension stiffening phenomenon and its effect on the behavior of the reinforced concrete members to examine their behavior in tension. For a reinforced concrete member, the reinforcement confined concrete affects the member's behavior after being cracked in the spacing between two cracks, and the reinforcement rebar in the concrete member shows less strain than the bare rebar. This affects the width of cracks and the stiffness of the member under tension. In this research the experimental method is used to tensile behavior of concrete members reinforced by GFRP rebar therefore the effect of rebar type, reinforcement ratio and c/d ratio on the cracking behavior of ultra high performance concrete (UHPC) is evaluated. The results show that increasing the rebar cover to diameter ratio of all specimens, their initial stiffening increases before the cracking stage in concrete. Also, the tension stiffening effect does not change as the type of the rebar changes. Finally, the spacing of cracks, the way they are distributed and their behavior are discussed.

ARTICLE INFO

Received: 21/05/2017
Revised: 26/11/2017
Accepted: 03/12/2017

Keywords:

Ultra High performance concrete,
tensile strength,
GFRP rebar,
Tensile member,
Cracking

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.86500.1201

*Corresponding author: Hossein Ali Rahdar.
Email address: : rahdar@uoz.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهمی که تحلیل‌گران در تحلیل‌های غیرخطی سازه‌های بتن آرمه به آن نیاز دارند، مقاومت کششی بتن مسلح پس از ترک خوردگی بتن می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که مقاومت کششی بتن مسلح بلافاصله پس از ترک خوردگی صفر نخواهد شد این امر به خاطر مقاومت کششی قطعات بتنی بین دو ترک متوالی به دلیل تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور می‌باشد. در واقع با پیدایش ترک‌های متوالی میزان سهم تحمل بتن در مقاومت کششی به تدریج کاهش می‌یابد و منجر به کاهش سختی نمونه بتن مسلح می‌گردد. با توجه به گسترش استفاده از مصالح نوین نظیر بتن فوق توانمند و میلگردهای الیاف شیشه (GFRP)، بررسی رفتار پس از ترک خوردگی و ارائه روابطی برای رفتار اعضای ساخته شده از این مصالح در مراحل قبل و بعد از ترک خوردگی امری ضروری می‌باشد که در این پژوهش سعی شده است تا به این امر پرداخته شود.

۲- تاریخچه تحقیقات درباره بتن فوق توانمند

بتن فوق توانمند (UHPC) دسته جدیدی از بتن است که در سال‌های اخیر، با رشد فناوری‌های تولید مواد سیمانی ریز توسعه یافته است. اگرچه میان گونه‌های مختلف UHPC تفاوت‌هایی در نحوه ساخت، مقدار مقاومت فشاری و سایر مشخصات مکانیکی وجود دارد، اما بین تمامی آن‌ها شباهت‌های کلی قابل تشخیص است. حداکثر اندازه دانه‌ها در UHPC، ۶۰۰ میکرومتر است. مقاومت فشاری UHPC بیشتر از ۱۲۰ مگاپاسکال است و مقاومت خمشی آن حداکثر تا ۵۰ مگاپاسکال می‌رسد. بعلاوه UHPC نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایینی دارد و میزان روانی آن برای کارا بودن بتن بایستی با فوق روان کننده تأمین شود. در مقایسه با سایر مصالح با پایه سیمان معمولی، مشخصات ساختاری بتن فوق توانمند مانند یکنواختی اندازه ذرات، تخلخل و ساختارهای میکروسکوپی بهبود یافته است. این نوع بتن به دلیل تخلخل و موبینگی کم، تقریباً غیرقابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر را نداشته باشد [1].

Korpa & Trettin [2] استفاده از سیلیس کلئیدی مصنوعی را در ساخت HPC و UHPC مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از سیلیس کلئیدی به همراه خاکستر بادی مزیت بیشتری نسبت به میکرو سیلیس دارد. همچنین Rougeau & Borys [3] از اجزاء پوزولانی دیگری مانند خاکستر بادی، پرکننده‌های ریز سنگ آهکی یا افزودنی‌های آلومیناسلیکات در ساخت UHPC استفاده کردند.

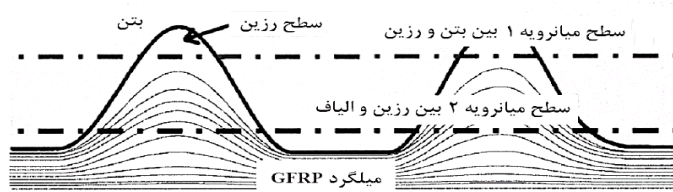
Graybeal [4] برای ساخت نمونه‌های UHPC علاوه بر مصرف میکرو سیلیس با حجم بالا، از مقدار زیادی سیمان نیز استفاده کرده‌اند. بتن ساخته شده توسط این محقق دارای نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۲ بود و در آن از افزودنی‌های کاهنده آب (بر پایه پلی کریوکسیلات) برای دستیابی به کارایی قابل قبول استفاده شده است. این بتن دارای دانه‌های زبر و درشت نمی‌باشد و توسط الیاف‌های فولادی بلند مستقیم با طول ۱۳ میلی‌متر که در حدود ۲ درصد حجم بتن را اشغال می‌کردند، مسلح شده بود. مطالعات متعددی در رابطه با ترکیب، مشخصات مکانیکی و دوام UHPC وجود دارد [5, 6].

رهدار و قلعه‌نوی [7] با بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن فوق توانمند نشان داده که استفاده از سیمان پرتلند مقاومت بالا در تأمین مقاومت فشاری این نوع بتن تأثیر گذار است. Yazici [8] تأثیر شرایط عمل‌آوری و افزودنی‌های معدنی با حجم زیاد را بر خصوصیات مکانیکی ترکیبات مختلف UHPC مورد بررسی قرار داد. در این نمونه‌ها سیمان با استفاده از خاکستر بادی با نسبت‌های مختلف جایگزین شده است. همچنین از میکرو سیلیس و پودر کوارتز با خصوصیات معین و ثابت در تمام ترکیب‌ها استفاده شده است. در این نمونه‌ها سیمان و میکرو سیلیس نقش چسباننده را ایفا می‌کردند. به‌علاوه از بازالت و کوارتز با حداکثر اندازه به ترتیب ۴ و ۰/۱ میلی‌متر نیز استفاده شده است Baena و همکاران [9] رفتار ترک خوردگی و سخت شدگی کششی در اعضای کششی مسلح شده با FRP را بررسی کرده‌اند. Doo & Banthia [10] در سال ۲۰۱۵ رفتار اعضای خمشی ساخته شده از بتن فوق توانمند الیافی مسلح شده با میلگردهای فولادی و الیاف شیشه را شبیه سازی و این شبیه

سازی را با نتایج آزمایش صحت سنجی نموده‌اند. Deng و همکاران [11] نیز در سال ۲۰۱۴ توسط آزمایش تست بیرون کشیدگی (pollout) ویژگی باند لغزش بین میلگرد مقاومت بالا و بتن پودری که نوی بتن فوق توانمند می‌باشد را مورد بررسی قرار داده‌اند.

۳- مفاهیم اولیه و تاریخچه مطالعات میلگردهای GFRP

میلگردهای GFRP ترکیبی از یک ماتریکس پلاستیک (رزین) و الیافی شیشه (GFRP) می‌باشند. رزین نقش مهمی در دوام میلگردهای GFRP ایفا می‌کند. همچنین، مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته این میلگردها تابعی از نوع رزین و الیاف مصرفی می‌باشد [12]. مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP خیلی کم‌تر از میلگردهای فولادی است به گونه‌ای که مدول الاستیسیته این نوع میلگرد حدوداً ۲۰ تا ۲۵٪ میلگردهای فولادی است. مدول الاستیسیته کم این میلگردها باعث می‌شود که پس از ترک خوردگی، سختی سازه‌های مسلح شده با این نوع مصالح با شدت بیش‌تری نسبت به سازه‌های بتن مسلح فولادی افت کند. این کاهش سختی باعث افزایش مقدار خیز و عرض ترک‌ها در تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP می‌شود. همچنین، به دلیل تفاوت در مدول الاستیسیته و سطح ظاهری آرماتورهای GFRP نسبت به آرماتورهای فولادی، رفتار پیوستگی بتن با میلگردهای GFRP و میلگردهای فولادی کاملاً متفاوت است. تحقیقات نشان می‌دهند که در طراحی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP، علاوه بر معیار مقاومت باید معیارهای خیز، شکل‌پذیری و ترک‌خوردگی نیز در نظر گرفته شوند [13]. در دو دهه اخیر مطالعات متعددی روی مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP انجام شده است. Tighiouart و همکاران [14, 15]، با انجام آزمایش‌های بیرون‌کشی میلگرد اثر قطر میلگرد، نوع میلگرد از لحاظ جنس و سطح جانبی و اثر میلگرد فوقانی را در مقاومت پیوستگی بررسی کردند و بر اساس آن، رابطه میان تنش پیوستگی و لغزش میلگرد را پیشنهاد کردند. همچنین، آن‌ها طول وصله را در تیرهای مسلح شده با میلگردهای پلیمری بررسی کرده‌اند. Lee و همکاران [16] نیز نشان دادند که شکست پیوستگی در میلگردهای فولادی همیشه با خرد شدن یا شکافت بتن ناشی از عکس‌العمل آج‌ها اتفاق می‌افتد در حالی که برای میلگردهای GFRP با افزایش مقاومت بتن، همیشه شکست پیوستگی در بتن رخ نمی‌دهد بلکه این شکست در برخی موارد با جدا شدن لایه رزین اطراف الیاف مرکزی میلگرد GFRP اتفاق می‌افتد. Banea و همکاران [17] همچنین Davalos و همکاران [18] یافته‌های Pilakoutas & Achillides [18] در رابطه با رفتار پیوستگی آرماتورهای FRP را مورد تایید قرار دادند. آن‌ها نیز نشان دادند در نمونه‌های با مقاومت بالا رفتار پیوستگی تحت اثر قطر آرماتور و در نمونه‌های با مقاومت کم رفتار پیوستگی تحت تاثیر مقاومت بتن قرار دارد. در اشکال ۱ و ۲ مقایسه چگونگی شکست در سطح پیوستگی بین میلگرد GFRP و دو نوع بتن معمولی و مقاومت بالا آورده شده است.



شکل ۱: مقایسه چگونگی شکست پیوستگی میلگردهای GFRP در بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا [19]



شکل ۲: مقایسه چگونگی شکست پیوستگی میلگردهای GFRP در بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا [19]

بررسی مطالعات انجام شده توسط پیشینان نشان می‌دهد که بحث و بررسی در زمینه رفتار پس ترک خوردگی نمونه‌های ساخته شده از بتن فوق‌توانمند و میلگردهای GFRP و پارامترهای مؤثر به خوبی صورت نگرفته‌است، از اینرو این پژوهش بررسی در این زمینه را هدف خود قرار داده‌است.

۴- مشخصات مصالح و ساخت نمونه‌ها

با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی رفتار پس از ترک خوردگی نمونه‌های ساخته شده از بتن فوق‌توانمند می‌باشد، برای ساخت کلیه نمونه‌ها از بتن فوق‌توانمند استفاده شده‌است. نسبت اختلاط، ویژگی‌ها و مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده در آزمایشگاه که بر اساس آزمایشات استاندارد بدست آمده، در جداول ۱ و ۲ آورده شده‌است.

جدول ۱: طرح اختلاط استفاده شده برای یک متر مکعب بتن ساخت نمونه

مقدار (کیلوگرم)	مصالح
۶۷۰/۰	سیمان
۲۰۰/۰	میکروسیلیس
۲۸۵/۰	پودر کوارتز
۱۰۲۰/۰	ماسه سلیسی
۲۰/۱	فوق روان کننده (۰/۳)
۱۷۸/۰	آب (لیتر)

۴-۱- روند اختلاط

عموما روند اختلاط در طرح‌های مختلف یکسان می‌باشد. ابتدا پودرهای خشک تا زمانی که یک مخلوط همگن بدست آید، با یکدیگر مخلوط می‌شوند. این بخش می‌تواند چندین دقیقه به طول انجامد. سپس بخشی از آب و نیمی از فوق‌روان‌کننده به اختلاط اضافه می‌شود. مخلوط کردن تا زمانی ادامه می‌یابد که مایع کاملاً ترکیب شود. سپس باقی مانده آب و فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه می‌شود. اختلاط تا زمانی که مخلوط کاملاً همگن شود ادامه می‌یابد. با توجه به طرح اختلاط موجود در این پژوهش، روند اختلاط بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

- تمام اجزاء تشکیل‌دهنده وزن شده‌اند.
 - نصف فوق‌روان‌کننده به آب اضافه شده‌است.
 - مصالح خشک شامل پودر سلیسی، ماسه سلیسی، سیمان و میکروسیلیس در مخلوط‌کن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند.
 - آب به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شده‌است.
 - یک دقیقه مکث و سپس باقی مانده فوق‌روان‌کننده به مخلوط در مدت ۳۰ ثانیه افزوده شده‌است.
- مخلوط کردن تا زمانی که بتن از حالت پودر خشک به شکل مخلوط کاملاً همگن تبدیل شود، ادامه پیدا کرده‌است. (این زمان تقریباً سه دقیقه به طول انجامید.)

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند بر اساس نتایج آزمایش‌ها

مقادیر	مشخصات مکانیکی
۱۲۰/۲۱	مقاومت فشاری (MPa)
۴۱/۱۸	مدول کشسانی (GPa)
۲۱۰۰	جرم مخصوص (Kg/m ³)
۱۰/۵۱	مقاومت کششی برزیلی (MPa)
۹/۰۰	مقاومت کششی (MPa)

۴-۲- مشخصات میلگردهای GFRP

میلگردهای GFRP مصرفی دارای سطح جانبی با آج ضعیف می‌باشند. برای اطمینان از مشخصات مکانیکی ارائه شده توسط کارخانه سازنده، آزمایش کشش روی نمونه‌هایی از میلگردهای GFRP مصرفی انجام شده است. ماده GFRP غیرهمگن می‌باشد و خصوصیات آن در جهت‌های مختلف فرق می‌کند. همچنین، خصوصیات این میلگردها در کشش و فشار نیز متفاوت است. بنابراین، نمونه آزمایش کشش باید به گونه‌ای آماده شود که از خرد شدن میلگردها در زیر تنش‌های فشاری گیره‌ها جلوگیری شود. بدین منظور، نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل آیین‌نامه [20] ACI 440.3R آماده‌سازی شده‌اند. میلگردهای GFRP درون غلاف لوله فولادی به صورت ثابت قرار گرفته‌اند، سپس درون آن‌ها با رزین پُر شده است. برای جلوگیری از لغزش بین رزین و سطح صاف لوله، درون لوله فولادی به طور مناسب شیار زده شده است تا زبری لازم را بدست آورد. محققان متعددی پیشنهاد کردند که حداقل طول مدفون میلگرد GFRP درون غلاف فولادی ۱۵ برابر قطر آن باشد. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده، در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۳: متوسط مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP

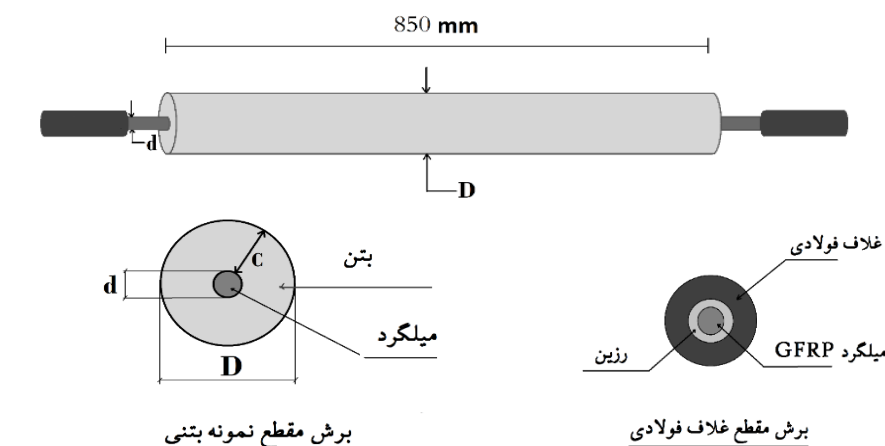
کرنش نهایی %	تنش نهایی MPa	مدول الاستیسیته GPa
۱/۷۶	۱۱۹۰	۶۶
۱/۷۴	۱۰۳۷	۵۴

۴-۳- نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP

۱۲ نمونه از بتن فوق توانمند و تسلیح از نوع میلگرد GFRP ساخته شده است. با توجه به اینکه میلگردهای GFRP در برابر فشار پیرامونی ضعیف می‌باشد برای اتصال این نمونه‌ها به دستگاه تست کشش باید شرایط خاصی را تأمین نمود، به همین منظور در دو سر میلگرد تسلیح یک سری غلاف فولادی استفاده شده است که میلگرد توسط رزین چسبنده در این غلاف‌ها مهار شده است. طول این غلاف متناسب با ظرفیت باربری میلگردها ۳۵۰ میلیمتر انتخاب شده است و سطح داخلی این غلاف‌ها به طور مناسب شیار زده شده تا از لغزش بین رزین و سطح داخلی غلاف جلوگیری شود، جزئیات این نمونه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۴-۴- نام‌گذاری نمونه‌ها

نام‌گذاری نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است تا بتوان به راحتی ویژگی‌های فیزیکی و هندسی نمونه را از روی این نام‌گذاری تشخیص داد. الگوی کلی نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت X-Y-M می‌باشد که در این نام‌گذاری حرف X معرف قطر نمونه بتنی، حرف Y معرف قطر میلگرد تسلیح و حرف M معرف جنس و نوع میلگرد تسلیح می‌باشد. به عنوان مثال عبارت 100-12-GFRP1 معرف نام‌گذاری یک نمونه بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر است که با یک میلگرد الیاف شیشه به قطر ۱۲ میلیمتر از نوع GFRP1 در مرکز نمونه مسلح شده است. مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۳: نمونه‌های مورد آزمایش از بتن فوق توانمند و میلگرد GFRP

جدول ۴: مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

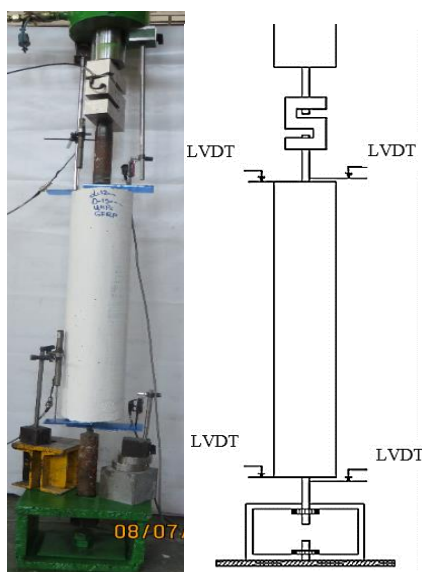
شماره	نام نمونه	ضخامت پوشش (کاور)	C/d	درصد تسلیح (ρ)
۱	65-12-GFRP1	۲۶/۵	۲/۲۰	۳/۵۳
۲	65-12-GFRP2			
۳	100-12-GFRP1	۴۴/۰	۳/۶۵	۱/۴۶
۴	100-12-GFRP2			
۵	150-12-GFRP1	۶۹/۰	۵/۷۵	۰/۶۴
۶	150-12-GFRP2			
۷	65-16-GFRP1	۲۴/۵	۱/۵۳	۶/۴۵
۸	65-16-GFRP2			
۹	100-16-GFRP1	۴۲/۰	۲/۶۲	۲/۶۳
۱۰	100-16-GFRP2			
۱۱	150-16-GFRP1	۶۷/۰	۴/۲۰	۱/۱۵
۱۲	150-16-GFRP2			

۵- تحلیل ترک‌ها در اعضای کششی مسلح شده با میلگردهای GFRP

۵-۱- روش آزمایش

تمام نمونه‌های ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده و پس از بیست و هشت روز عمل‌آوری، تحت آزمایش کششی قرار گرفتند، در این آزمایش میزان سرعت جابجایی جک کششی ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. میزان جابجایی میلگرد و بتن توسط چهار عدد جابجایی سنج با دقت مناسب که در بالا و پایین نمونه بر روی میلگرد و بتن قرار داده شده‌اند، ثبت می‌گردد. میزان نیرو وارده بر نمونه نیز توسط یک دستگاه نیروسنج (load cell) با ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و دقت ۰/۰۱ کیلو نیوتن در هر لحظه ثبت شده و مجموعه داده‌ها توسط کارت داده نصب شده بر روی یک دستگاه رایانه جهت آنالیز و بررسی آماده گردیده است (شکل ۴).

برای ثبت رفتار ترک‌های به وجود آمده بر روی نمونه مورد آزمایش در لحظات مختلف از نمونه عکس‌برداری گردیده است تا مراحل گسترش و پیشرفت ترک‌ها به خوبی قابل مطالعه و بررسی باشد.



شکل ۴: جزئیات و مشخصات نمونه‌های بتنی مورد آزمایش

۵-۲- بررسی روند ترک‌خوردگی در نمونه‌های مورد آزمایش

در این بخش برای همه نمونه‌ها نیروی پیدایش ترک و محدوده گسترش ترک‌ها آورده شده است و در پایان برای هر نمونه مقادیر فاصله ترک‌ها با هم مقایسه شده‌است.

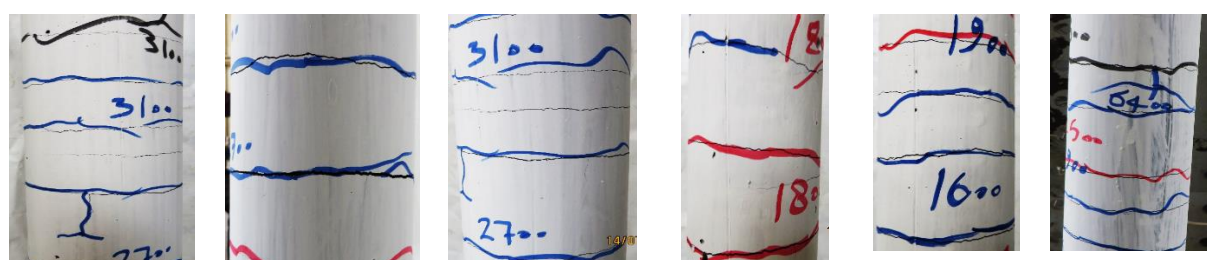
برای نمونه 65-12-GFRP2 اولین ترک در بار ۱۶ کیلونیوتن رخ داد و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید، با افزایش نیروی وارده بر نمونه در نیروی ۱۴ کیلونیوتن ترک بعدی اتفاق افتاد. سایر ترک‌ها در نیروهای ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۵ و ۲۶ کیلونیوتن ایجاد شدند. گسترش ترک‌ها تا بار ۵۴ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله به بعد ترک‌ها دچار بازشدگی شدند. در این نمونه، در نیروهای ۶۴ و ۷۱ کیلونیوتن از ترک‌های عمود بر مقطع نمونه مجموعه‌ای از ترک‌ها در امتداد نمونه منشعب شده‌است، حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۲۵ و ۶۷ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۴۴/۵ میلی‌متر بدست آمده است.

مراحل پیدایش و پیشرفت ترک‌ها در نمونه 65-12-GFRP2 در شکل ۴-الف آورده شده است در نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP تعداد ترک‌ها و میزان بازشدگی نسبت به نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی بسیار بیشتر است. شکل ۵-الف میزان بازشدگی ترک‌ها در این نمونه را نشان می‌دهد.

در نمونه 100-12-GFRP2 با افزایش بار وارده بر نمونه در نیروی ۳۱ کیلونیوتن سه عدد ترک متوالی در یک سوم بالای نمونه اتفاق افتاد که با ایجاد این ترک‌ها ظرفیت باربری نمونه کاهش یافت. سپس با افزایش اعمال بار بر نمونه دوباره در نیروی ۲۷ کیلونیوتن سه ترک در وسط نمونه اتفاق می‌افتد، سایر ترک‌ها در نیروی ۲۹، ۳۲ و ۶۰ کیلونیوتن ایجاد شدند. در نیروی ۶۷ کیلونیوتن ترک‌ها شروع بازشدن کرده و بازشدگی ترک‌ها ادامه یافته است. میزان حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در طول نمونه به ترتیب ۳۵ و ۷۴ میلی‌متر و متوسط فاصله ترک‌ها ۵۲ میلی‌متر بدست آمده‌است (شکل ۴-ب).



شکل ۴: الف: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 65-12-GFRP2 میان بارگذاری
 شکل ۴: ب: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 100-12-GFRP2 پایان بارگذاری



شکل ۵: الف: بازشدگی ترکها برای نمونه 65-12-GFRP2
 شکل ۵: ب: بازشدگی ترکها برای نمونه 100-12-GFRP2

برای این نمونه (100-12-GFRP2) نیز مانند نمونه قبلی میزان بازشدگی ترکها مشهود و قابل مشاهده است. در شکل ۵-ب به عنوان نمونه تعدادی از ترکهای باز شده در این نمونه نمایش داده شده است. در هنگام آزمایش نمونه 150-12-GFRP2 با افزایش بار وارده بر نمونه، در نیروی ۴۵ و ۴۶ کیلونیوتن اولین ترکها ایجاد شد. سپس با افزایش اعمال بار ترکهای بعدی در نمونه اتفاق افتاد. در نیروی ۶۰ کیلونیوتن سه عدد ترک همراه با صدا به وقوع پیوست که این ترکها توسط مجموعه‌ای از ترکهای عمودی در راستای عضو به هم وصل شده بودند. از نیروی ۷۳ کیلونیوتن ترکها شروع به بازشدن کرد و بازشدگی ترکها ادامه یافت. برای این نمونه میزان حداقل و حداکثر فاصله ترکها در طول نمونه به ترتیب ۶۳/۴ و ۱۴۰ و متوسط فاصله ترکها ۸۳/۳ میلی‌متر به دست آمده است (شکل ۶-الف).



قبل از اعمال بار

میانه بارگذاری

پایان بارگذاری

قبل از اعمال بار

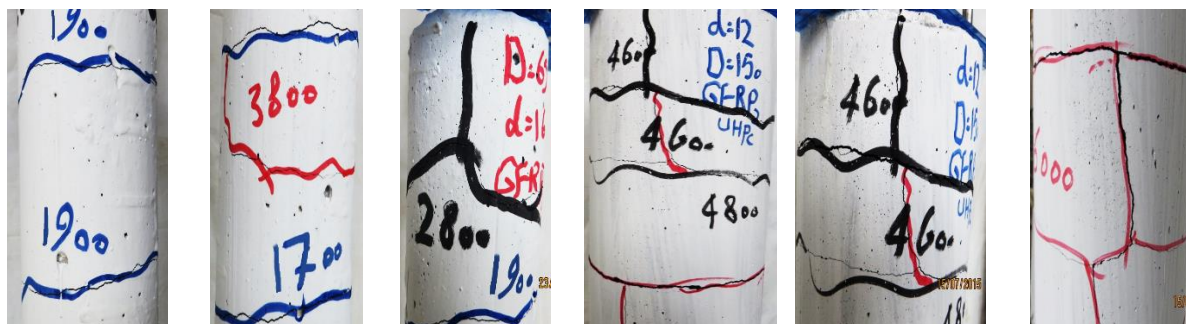
میانه بارگذاری

پایان بارگذاری

شکل ۶:ب: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 65-16-GFRP2

شکل ۶:الف: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 150-12-GFRP2

در این نمونه تعداد ترک‌های عمودی در راستای نمونه، نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. همچنین برای این نمونه نیز مانند سایر نمونه‌هایی که با این نوع میلگرد تسلیح شده‌اند، بازشدگی ترک‌ها کاملاً مشهود است. در شکل ۷-الف تعدادی از این ترک‌ها به نمایش در آمده است.

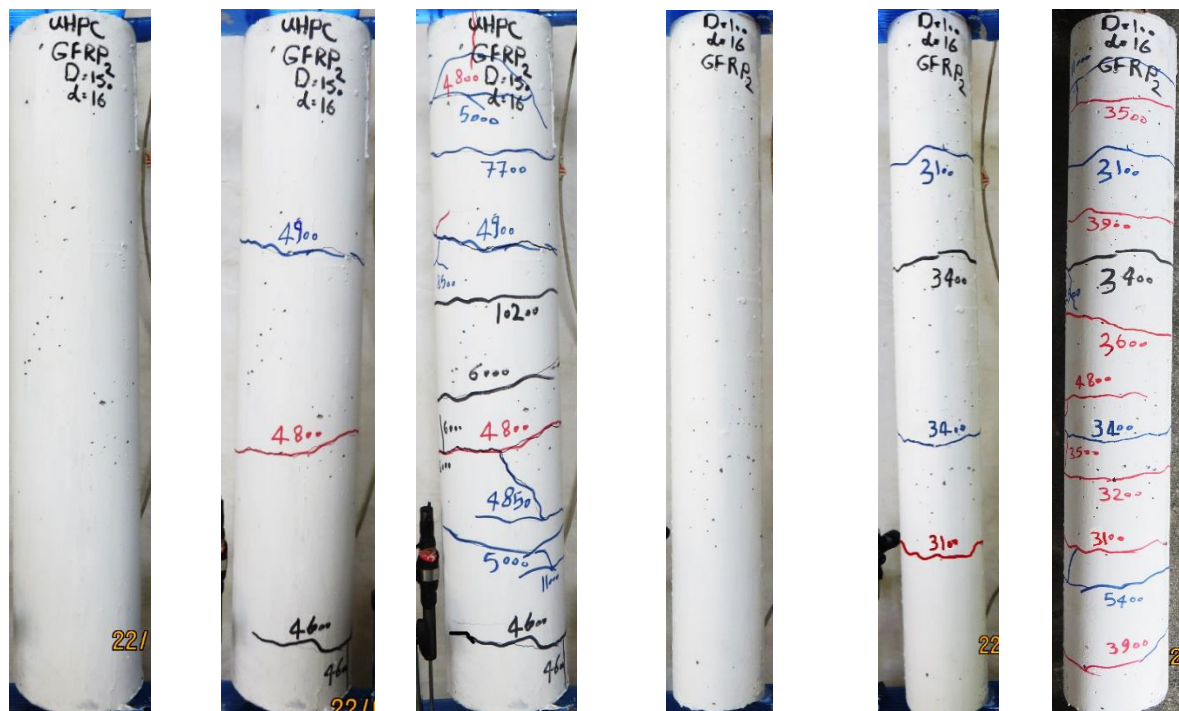


شکل ۷:ب: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 65-16-GFRP2

شکل ۷:الف: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 150-12-GFRP2

برای نمونه 65-16-GFRP2 اولین ترک در بار ۱۸ کیلونیوتن در یک سوم پایینی نمونه اتفاق افتاد و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه در نیروی ۱۷ کیلونیوتن ترک بعدی ایجاد شد. سایر ترک‌ها در نیروهای ۱۹، ۲۱، ۲۸، ۳۸ و ۴۸ کیلونیوتن اتفاق افتادند. گسترش ترک‌ها تا بار ۶۷ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله به بعد ترک‌ها باز شدند. در این نمونه در نیروی ۵۰ کیلونیوتن، از ترکی که در بار ۱۸ کیلونیوتن ایجاد شده بود، ترکی در راستای طولی نمونه منشعب شد. همچنین در میانه نمونه، در نیروی ۹۰ کیلونیوتن، از ترک ایجاد شده در نیروی ۲۱ کیلونیوتن یک ترک به صورت شاخه عمودی در راستای نمونه منشعب شد. در این نمونه هم برای ترک‌های ایجاد شده در قسمت میانی و هم برای ترک‌های ایجاد شده در دو سر نمونه مجموعه‌ای از ترک‌ها در راستای نمونه اتفاق افتاده است. در این نمونه حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۳۳ و ۸۴ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۵۹/۵ میلی‌متر بدست آمده است. روند گسترش و میزان بازشدگی ترک‌ها برای این نمونه در اشکال ۶-ب و ۷-ب نشان داده شده است.

برای نمونه 100-16-GFRP2 اولین ترک در بار ۳۴ کیلونیوتن در یک سوم پایینی نمونه اتفاق افتاد و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه در نیروی ۳۱ کیلونیوتن ترک بعدی ایجاد شد. سایر ترک‌ها در نیروهای ۳۲، ۳۵، ۳۶، ۳۹، ۴۸ و ۵۶ کیلونیوتن به وجود آمدند. گسترش ترک‌ها تا بار ۷۰ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله بازشدگی ترک‌ها شروع شدند. شکل‌های ۸-الف و ۹-الف پیدایش ترک در این نمونه را نشان می‌دهند.



قبل از اعمال بار

میان بارگذاری

پایان بارگذاری

قبل از اعمال بار

میان بارگذاری

پایان بارگذاری

شکل ۸: ب: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 150-16-GFRP2

شکل ۸: الف: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 100-16-GFRP2

در آزمایش نمونه 150-16-GFRP2 با افزایش بار وارده بر نمونه در نیروی ۴۸ کیلونیوتن اولین ترک اتفاق افتاد و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه ترک‌های بعدی در نیروهای ۴۶، ۴۹، ۵۰، ۶۰، ۷۷ و ۱۰۲ به وجود آمدند. در نیروهای ۴۸/۵، ۶۰ و ۸۵ کیلونیوتن ترک‌هایی به صورت شاخه‌ای در بالا و پایین یک سوم میانی نمونه ایجاد شد. از نیروی ۱۱۵ کیلونیوتن ترک‌ها شروع بازشدن کرد و بازشدگی ترک‌ها ادامه یافت. برای این نمونه میزان حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در طول نمونه به ترتیب ۶۲ و ۱۱۴ و متوسط فاصله ترک‌ها ۷۹/۴ میلی‌متر به دست آمده است (شکل ۸-ب و ۹-ب).

نیروی پیدایش اولین ترک در نمونه 65-12-GFRP1، بار ۱۴ کیلونیوتن بود و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه در نیروی ۱۳ کیلونیوتن ترک بعدی اتفاق افتاد. سایر ترک‌ها در نیروهای ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۲ و ۳۸ کیلونیوتن به وجود آمدند و گسترش ترک‌ها تا بار ۴۸ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله بازشدگی ترک‌ها رخ داد. در این نمونه حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۳۵ و ۸۴ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۵۴ میلی‌متر به دست آمده است. شکل‌های زیر ترک‌های ایجاد شده در این نمونه را نشان می‌دهند.



شکل ۹: ب: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 150-16-GFRP2

شکل ۹: الف: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 100-16-GFRP2

برای نمونه 100-12-GFRP1 اولین ترک در بار ۲۸ کیلونیوتن اتفاق افتاد و ظرفیت باربری نمونه با ایجاد ترک کاهش یافت. با افزایش نیروی وارده بر نمونه ترک‌های بعدی در نیروهای ۲۶، ۲۹، ۳۲، ۳۸ و ۴۳ کیلونیوتن به وجود آمدند. گسترش ترک‌ها تا بار ۷۶ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله به بعد ترک‌ها شروع به باز شدن کردند. در این نمونه ترک‌هایی در امتداد نمونه منشعب می‌شود. حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۴۰ و ۸۵ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۶۰/۵ میلی‌متر بدست آمده‌است. شکل‌های ۱۰-ب و ۱۱-ب نمایش دهنده روند پیدایش ترک در این نمونه هستند.



قبل از اعمال بار

میان بارگذاری

پایان بارگذاری

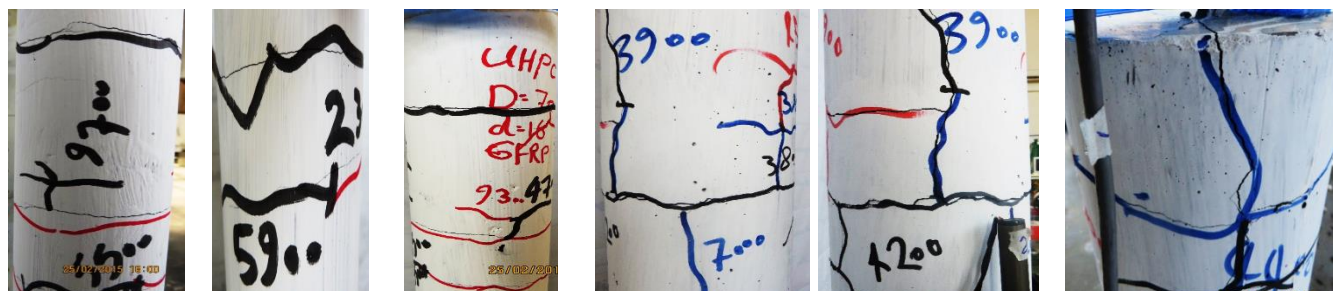
قبل از اعمال بار

میان بارگذاری

پایان بارگذاری

شکل ۱۰: ب: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 100-12-GFRP1

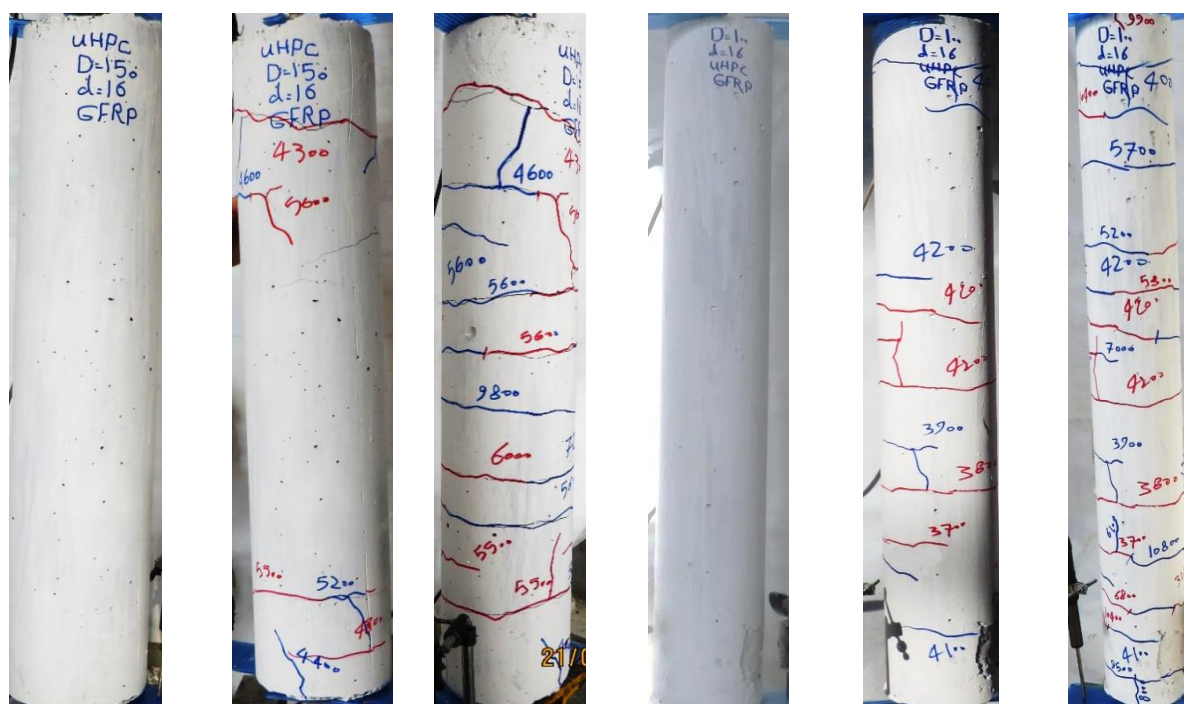
شکل ۱۰: الف: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 65-12-GFRP1



شکل ۱۳: الف: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 150-12-GFRP1

شکل ۱۳: ب: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 65-16-GFRP1

برای نمونه 100-16-GFRP1 در بار ۳۸ کیلونیوتن اولین ترک ایجاد شد و باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه در نیروی ۳۷ کیلونیوتن ترک بعدی رخ داد. سایر ترک‌ها در نیروهای ۴۱، ۴۲، ۴۴، ۴۷، ۵۲، ۵۷ و ۶۸ کیلونیوتن به وجود آمدند. گسترش ترک‌ها تا بار ۹۵ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله بازشدگی ترک‌ها اتفاق افتاد. در این نمونه ترک‌هایی در امتداد نمونه منشعب شده است و حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۳۷ و ۱۰۵ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۵۶ میلی‌متر بدست آمده است. اشکال ۱۴-الف و ۱۵-الف روند پیدایش ترک در این نمونه را نمایش می‌دهند.



پایان بارگذاری

میان بارگذاری

قبل از اعمال بار

پایان بارگذاری

میان بارگذاری

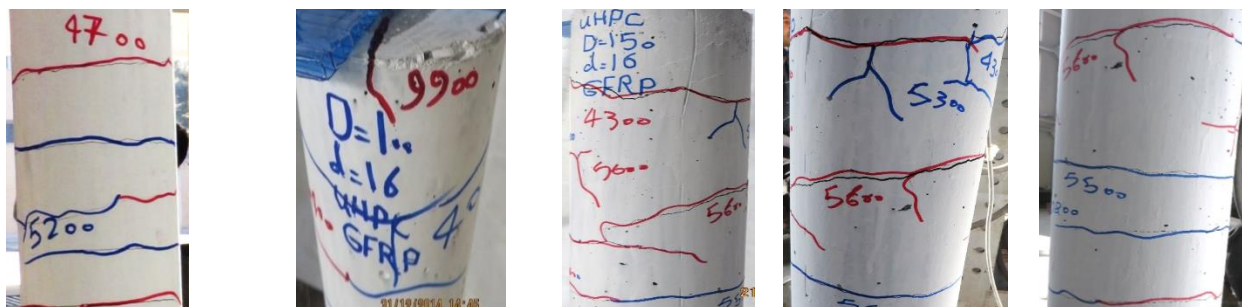
قبل از اعمال بار

شکل ۱۴: الف: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 100-16-GFRP1

شکل ۱۴: ب: مراحل پیدایش ترک برای نمونه 150-16-GFRP1

نیروی پیدایش اولین ترک برای نمونه 150-16-GFRP1 در بار ۴۶ کیلونیوتن بود و ایجاد ترک در نمونه باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه گردید. با افزایش نیروی وارده بر نمونه سایر ترک‌ها در نیروهای ۴۳، ۴۶، ۵۵، ۵۶، ۶۰ و ۹۸ کیلونیوتن به وجود آمدند. گسترش ترک‌ها تا بار ۱۰۵ کیلونیوتن ادامه داشت و از این مرحله بازشدگی ترک‌ها شروع شد. در این نمونه مجموعه ترک‌هایی در امتداد طولی منشعب شده

و حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها به ترتیب ۶۷ و ۱۲۷ میلی‌متر و همچنین متوسط فاصله ترک‌ها ۸۶ میلی‌متر بدست آمده است. در اشکال ۱۴-ب و ۱۵-ب روند پیدایش ترک در این نمونه ارائه شده است.



شکل ۱۵: ب: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 100-16-GFRP1

شکل ۱۵: الف: بازشدگی ترک‌ها برای نمونه 150-16-GFRP1

بررسی رفتار ترک‌خوردگی نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که با انواع میلگرد GFRP مسلح شده‌اند فاصله متوسط ترک‌ها کاهش یافته است. در واقع استفاده از میلگرد GFRP به عنوان تسلیح سبب شده است تا تعداد ترک‌ها در نمونه‌های مسلح شده با این مصالح افزایش یابد. همچنین در نمونه‌هایی که با میلگرد الیاف شیشه (GFRP) مسلح شده‌اند، میزان بازشدگی ترک‌ها زیاد می‌باشد. به دلیل مدول کشسانی پایین میلگردهای GFRP نسبت به سایر مصالح تسلیح است. همچنین مرحله باز شدگی ترک در نمونه‌های مسلح شده با میلگرد الیاف شیشه به خوبی قابل مشاهده است.

۶- رابطه سازی برای رفتار ترک‌خوردگی بتن فوق توانمند در اعضای کششی مسلح

۶-۱ - بررسی حداقل و حداکثر فواصل ترک‌ها

در آزمایش کششی نمونه بتن مسلح، نیروی وارده بر میلگرد، به تدریج به وسیله تنش‌های پیوستگی به بتن منتقل می‌شود. با افزایش بار وارده، نیروی کششی انتقال یافته به بتن در یک فاصله معینی از انتهای نمونه به مقاومت کششی بتن رسیده و از آن تجاوز می‌کند در این لحظه یک ترک عرضی در آن محل از نمونه بتنی اتفاق می‌افتد. اگر طول به وجود آمده بین ترک جدید و انتهای نمونه، بزرگ‌تر از فاصله ترک پایدار (فاصله مربوط به آخرین ترک) باشد، همانند وضعیت قبلی ترک‌های جدیدی در نمونه به وجود می‌آید؛ بنابراین نمونه اصلی تبدیل به چندین قطعه با طول‌های متغیر خواهد شد. لذا می‌توان گفت که فاصله به وجود آمده بین ترک‌ها، طبیعتاً کاملاً تصادفی دارند. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای حداقل فاصله بین ترک‌ها (S_{min})، حداکثر فاصله بین ترک‌ها (S_{max}) و متوسط فاصله ترک‌ها (S_m) در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه مقادیر حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها با مقدار متوسط فاصله ترک‌ها بیانگر این نکته می‌باشند که فاصله بین ترک‌ها به صورت تصادفی در یک محدوده‌ای بین S_{min} و S_{max} اتفاق می‌افتد. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش متوسط فاصله ترک‌ها، مقادیر حداکثر و حداقل فاصله بین ترک‌ها نیز افزایش می‌یابند. همچنین ملاحظه می‌شود که تغییرات حداکثر فاصله ترک‌ها دارای شیب تندتری نسبت به تغییرات حداقل فاصله ترک‌ها است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش به روش تحلیل رگرسیون چند متغیره بهترین روابط برای حداقل، حداکثر و متوسط فاصله ترک‌ها بر اساس پارامترهای موثر بر آنها در این پژوهش به دست آمده است.

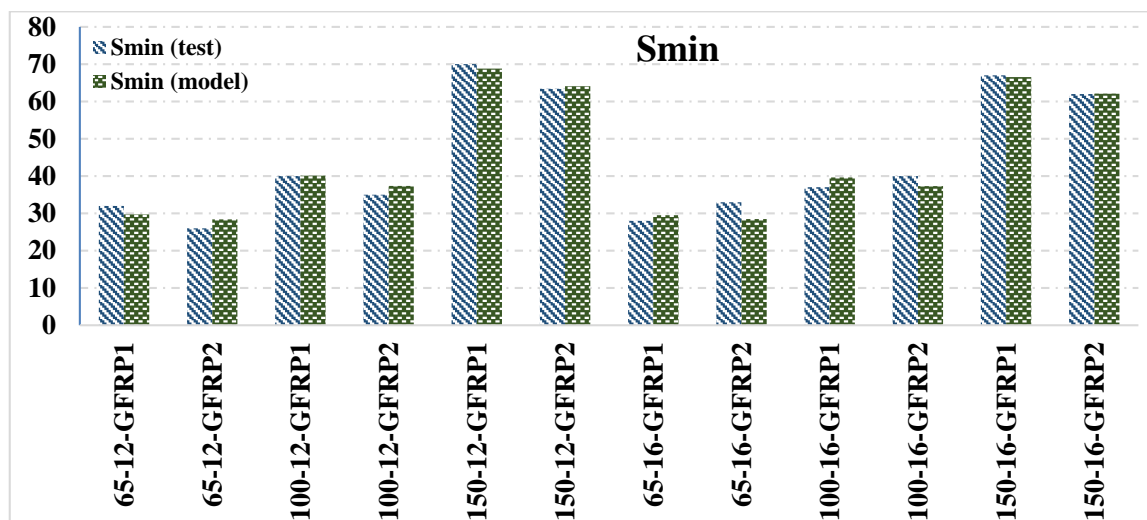
$$S_{min GFRP} = 25.334 + 0.01243C^2 + 0.3457\left(\frac{C}{d}\right)^2 - 0.0221 \frac{d}{np} \quad (1)$$

(واحد بر حسب میلی‌متر) و $R^2=0.97$

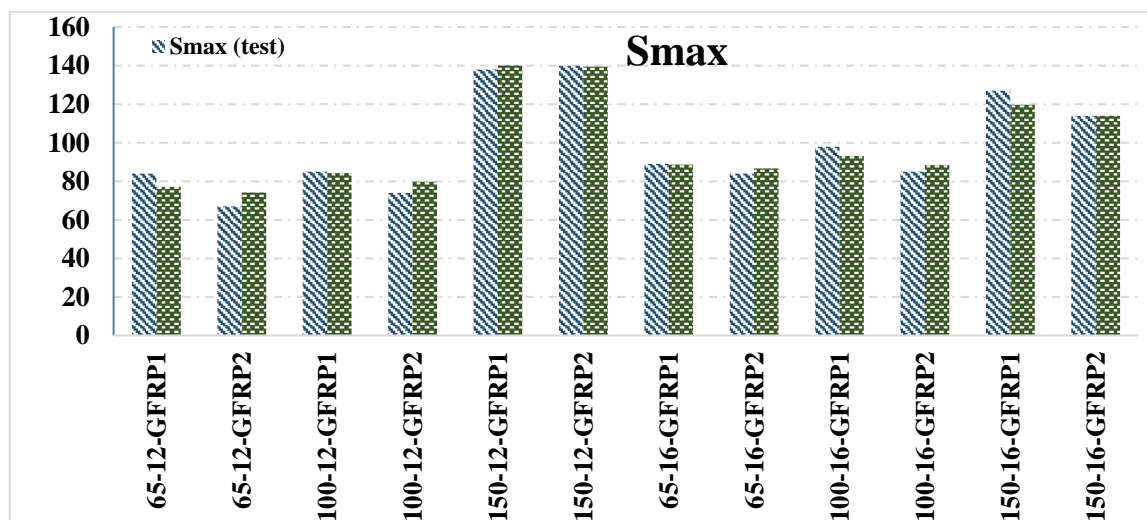
$$S_{\max \text{GFRP}} = 74.82 - 21.499 C/d + 2.965C + 0.0332 C/n_p - 0.203 d/n_p \quad (2)$$

$R^2=0.981$ و (واحد بر حسب میلی‌متر)

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مقادیر حاصل از نتایج آزمایش‌ها و روابط ارائه‌شده توسط نگارنده این مقاله آورده شده است.



شکل ۱۶: مقایسه مقادیر حداقل فاصله ترک‌ها به‌دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه‌شده



شکل ۱۷: مقایسه مقادیر حداکثر فاصله ترک‌ها به‌دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه‌شده

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط ارائه‌شده (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) نشان می‌دهد که برای مقادیر حداکثر و حداقل فاصله ترک‌ها روابط ارائه‌شده در این پژوهش (روابط ۱ و ۲) با نتایج آزمایش همخوانی بسیار خوبی دارد.

۲-۶ - بررسی فاصله متوسط ترک‌ها

با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های معرفی شده در بخش‌های قبلی میزان نیروی پیدایش اولین ترک و فواصل ترک‌های مختلف که در طول نمونه در حین انجام آزمایش اتفاق افتاده، اندازه‌گیری شده است و میزان حداقل فاصله ترک، حداکثر فاصله ترک و نیروی پیدایش اولین ترک در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر نیروی آغاز ترک و متوسط، حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها

ردیف	نام نمونه	Smax test (mm)	Smin test (mm)	Sm test (mm)	$\frac{\sigma_{first\ crack}}{\sqrt{f_c}}$ test (MPa/(MPa) ^{0.5})
۱	65-12-GFRP1	۸۴	۳۵	۵۴	۰/۳۸۳
۲	65-12-GFRP2	۶۷	۲۵	۴۴/۵	۰/۴۳۸
۳	100-12-GFRP1	۸۵	۴۰	۶۰/۵	۰/۳۱۷
۴	100-12-GFRP2	۷۴	۳۵	۵۲	۰/۳۵۱
۵	150-12-GFRP1	۱۳۸	۷۰	۸۷/۴	۰/۱۹۵
۶	150-12-GFRP2	۱۴۰	۶۳/۴	۸۳/۳	۰/۲۲۵
۷	65-16-GFRP1	۸۹	۲۸	۵۰	۰/۶۴۷
۸	65-16-GFRP2	۸۴	۳۳	۵۹/۵	۰/۵۰۶
۹	100-16-GFRP1	۱۰۵	۳۷	۵۶	۰/۴۳۵
۱۰	100-16-GFRP2	۸۲	۴۰	۶۰/۵۳	۰/۳۹۰
۱۱	150-16-GFRP1	۱۲۷	۶۷	۸۶	۰/۲۳۱
۱۲	150-16-GFRP2	۱۱۴	۶۲	۷۹/۴	۰/۲۴۱

*تنش کششی پیدایش اولین ترک از تقسیم نیروی پیدایش اولین ترک بر سطح مقطع خالص بتن نمونه حاصل شده است

از تحلیل عددی نتایج موجود در جدول ۵ در ارتباط با فاصله متوسط ترک‌ها (S_m) می‌توان موارد زیر را عنوان نمود:

- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد (d) یکسان هرچه میزان ضخامت پوشش بتن (C) بزرگ‌تر می‌شود (به عبارت دیگر نسبت c/d و d/ρ بزرگ‌تر باشند)، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
 - برای نمونه‌ها با قطر یکسان هرچه قطر میلگرد کوچک‌تر باشد، تعداد ترک‌های عرضی کمتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
 - برای نمونه‌ها با درصد تسلیح یکسان هرچه قطر میلگرد بزرگ‌تر، تعداد ترک‌های عرضی بیشتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها کمتر می‌شود.
- با استفاده از ملاحظات فوق می‌توان متوسط فاصله ترک‌ها (S_m) را تابعی از اندازه قطر میلگرد (d)، ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد (c) و نسبت‌های c/d و d/ρ در نظر گرفت.

کمیته اروپایی CEB-FIP [21] برای تعیین فاصله متوسط ترک‌ها رابطه ۳ را ارائه نموده است:

$$S_m = 2C + 0.1 \frac{d}{\rho} \quad (3)$$

Rizkalla, S.H. and Hwang, L.S. [22] با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی قطعات بتن آرمه رابطه (رابطه ۴) زیر را ارائه نموده‌اند.

$$S_m = 5(d - 7.11) + 0.08 \frac{d}{\rho} \quad (4)$$

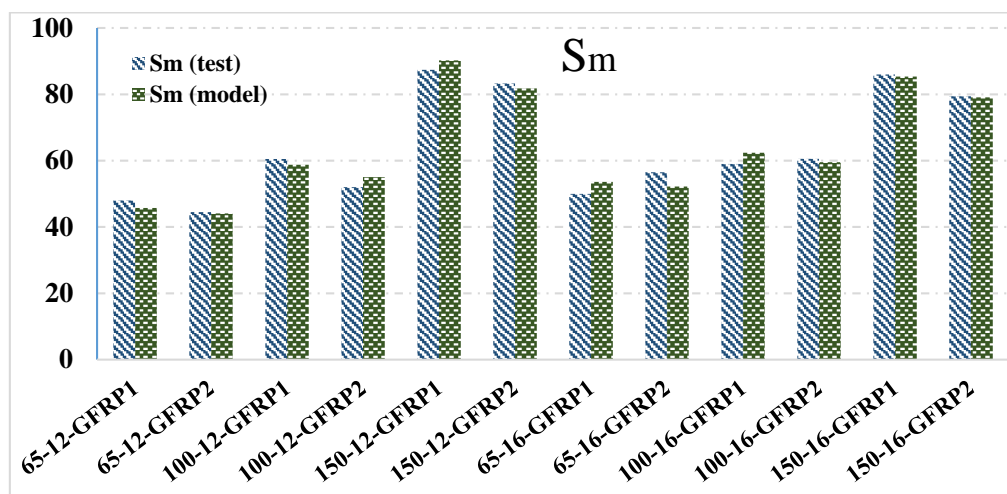
شایانفر و همکاران [23] با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ساخته شده از بتن C26 برای متوسط فاصله ترک‌ها رابطه زیر را ارائه نموده‌اند.

$$S_m = 0.6(d + 40) + 0.09 \frac{d}{\rho} + 0.21C \quad (5)$$

در این تحقیق نیز بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف با روش رگرسیون چند متغیره رابطه ۶ با اعمال تمامی عوامل مؤثر بر متوسط فاصله ترک‌ها ارائه شده است.

$$S_{m_{GFRP}} = 50.952 + 27.656n\rho + 0.0142C^2 - 0.5277\left(\frac{C}{d}\right)^2 + 0.00721 \frac{C}{n\rho} - 0.0537 \frac{d}{n\rho} \quad R2 = 0.942 \quad (6)$$

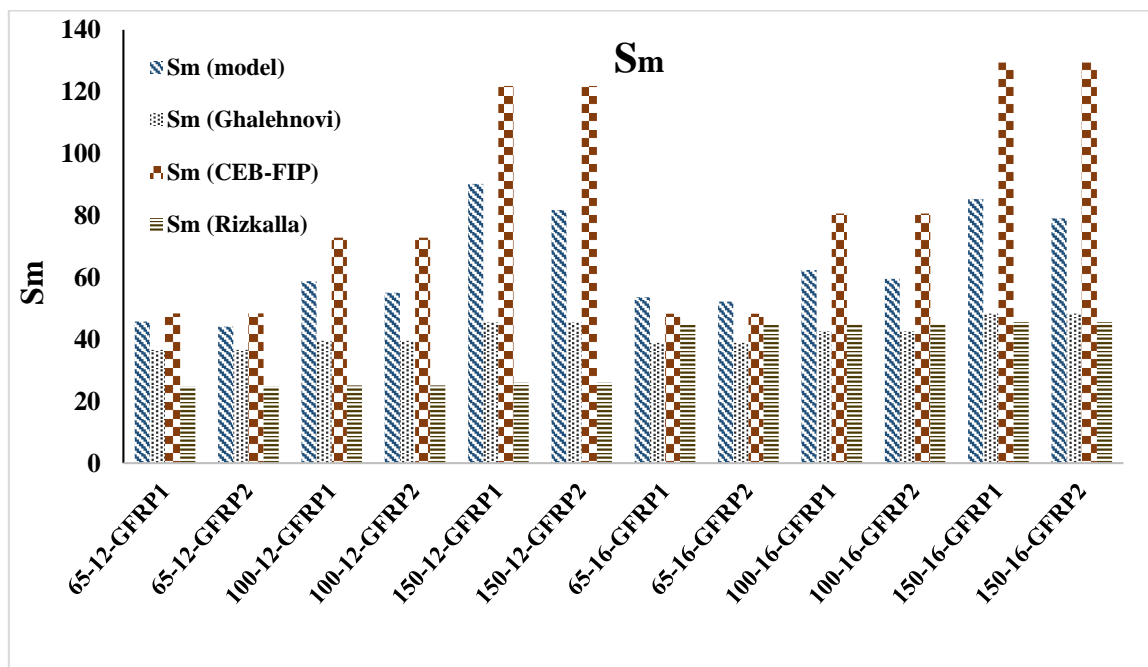
نمودار مربوط به روابط ارائه شده برای متوسط فاصله ترک‌ها و نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸: مقایسه مقادیر متوسط فاصله ترک‌ها به دست آمده از نتایج آزمایش و روابط ارائه شده

نتایج بدست آمده توسط مدل ارائه شده در این تحقیق و مدل‌های ارائه شده توسط محققان ذکر شده در بالا در شکل ۱۹ با هم مقایسه شده است. ملاحظه نمودارها در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که روابط ارائه شده توسط قلعه‌نوی (رابطه ۵) و Rizkalla and Hwang (رابطه ۴) برای اکثر نمونه‌های مورد آزمایش نتایج بسیار دست پایینی ارائه می‌دهند، این دو رابطه در نسبت‌های تسلیح بالا یعنی جایی که قطر نمونه و ضخامت پوشش بتن کم می‌شود مقداری نزدیک به نتایج ارائه می‌دهند. مقادیر ارائه شده توسط رابطه CEB-FIP با نتایج حاصل از مدل به مقدار زیادی همخوانی دارد ولی برای نسبت‌های تسلیح کم (ضخامت پوشش بتن زیاد) مقادیر دست بالا ارائه می‌دهد. رابطه ارائه شده توسط این پژوهش (رابطه ۶) بر نتایج حاصل از آزمایش انطباق بسیار خوبی دارد به گونه‌ای که در نسبت‌های تسلیح بالا (ضخامت پوشش

بتن کم) بر نتایج حاصل از آزمایش منطبق است (شکل ۱۸) و در نسبت‌های تسلیح کم (ضخامت پوشش بتن بالا) اختلاف مقادیر به دست آمده با نتایج نسبت به سایر روابط کمتر و قابل صرف نظر کردن است.



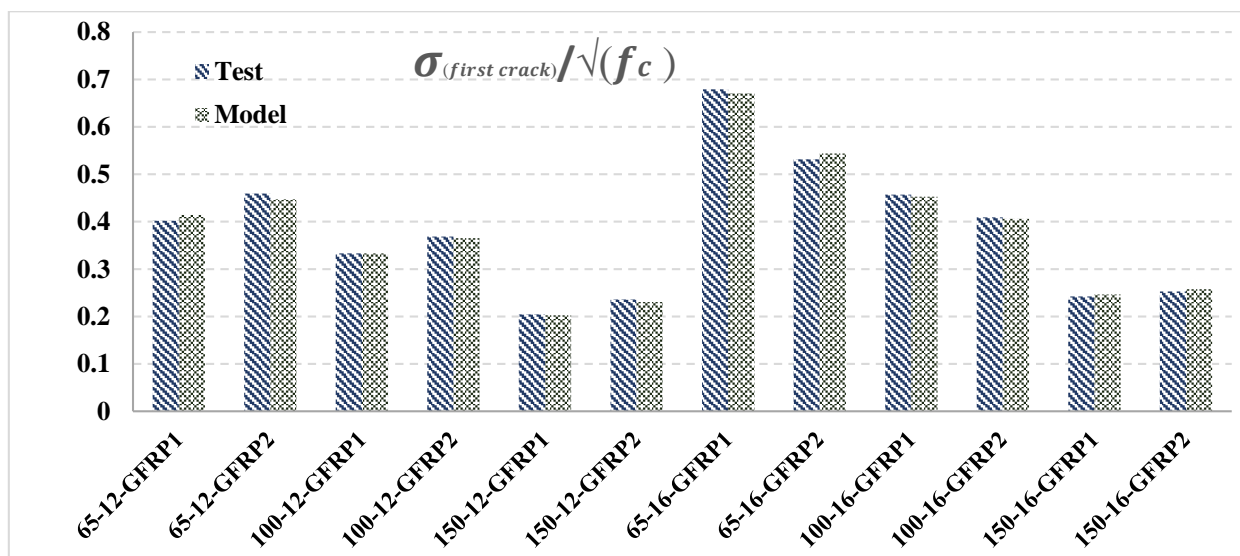
شکل ۱۹: مقایسه مقادیر متوسط فاصله ترک‌ها به دست آمده از مدل ارائه شده با مدل‌های سایر محققان

۳-۶ - بررسی تنش کششی پیدایش آغازین ترک

در فرآیند انجام آزمایش با افزایش نیرو در عضو تنش‌ها توسط پیوستگی بتن و میلگرد از میلگرد به بتن منتقل می‌شود و در محل‌های که تنش موجود در بتن به مقاومت کششی بتن برسد ترک اتفاق می‌افتد و سبب باز توزیع نیرو در عضو می‌گردد این فرآیند تا مرحله پایداری ترک ادامه پیدا می‌کند. از آنجایی که در مراجع مختلف تنش کششی بتن را مضربی از $\sqrt{f_c}$ تعریف می‌نمایند با توجه به مقادیر نیروی پیدایش ترک آغازین در جدول ۵ به روش رگرسیون چند متغیره یک رابطه (رابطه ۷) برای نسبت تنش کششی پیدایش اولین ترک به جذر مقاومت فشاری بتن بر اساس پارامترهای تأثیرگذار بر آن ارائه شده است.

$$\frac{f_t}{\sqrt{f_c}} = 0.387 - 4.54np + 51.016np^2 - 0.00007C^2 + 0.015d \quad (7)$$

در این رابطه‌ها n نسبت مدول الاستیسیته بتن به مدول الاستیسیته فولاد، ρ نسبت تسلیح، d قطر میلگرد و C ضخامت پوشش بتن روی میلگرد (کاور) است. برای این رابطه ضریب همپوشانی ۰/۹۷ می‌باشد. در شکل ۲۰ مقادیر حاصل از آزمایش و داده‌های به دست آمده از رابطه با هم مقایسه شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که رابطه ارائه با نتایج آزمایش‌ها همخوانی بسیار خوبی دارد.



شکل ۲۰: مقایسه مقادیر نسبت تنش ترک خوردگی به مجذور مقاومت فشاری بتن، به دست آمده از نتایج آزمایش و رابطه ارائه شده

۷- مدل سازی عددی

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود Abaqus برای تشریح مدل سازی تحلیلی نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده است. با توجه به اینکه مدل سازی رفتار ترک خوردگی بتن و میزان آسیب آن از بررسی این مدل سازی می باشد، برای این منظور از مدل آسیب دیدگی پلاستیک بتن استفاده شده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه پیوستگی بین بتن و میلگردهای GFRP از مدل باند-لغزش مدل BPE اصلاح شده استفاده می باشند، در این پژوهش برای در نظر گرفتن پیوستگی بین بتن و میلگردهای GFRP از مدل باند-لغزش مدل BPE اصلاح شده استفاده شده است [24]. در این مدل سازی برای بتن از المان SOLID و برای میلگرد از المان Truss استفاده شده است و اندازه مش واحد در نظر گرفته شده است. در بخش های ذیل مدل های رفتار استفاده شده برای رفتار مصالح آورده شده است.

۷-۱- تعریف خواص فولاد و میلگرد GFRP

رفتار میلگردهای فولادی به طور کلی بصورت دو خطی و با سخت شوندگی در نظر گرفته می شود. این رفتار در فشار و کشش یکسان بوده و مدول الاستیسیته مصالح در باربرداری برابر با مدول الاستیسیته اولیه فرض می گردد. مقادیر ضریب پواسون برابر ۰/۳ و مدول الاستیسیته فولاد برای دو نوع میلگرد AII و AIII مطابق مقادیر بدست آمده از آزمایش در نظر گرفته شده است. نمودار تنش- کرنش فولاد به صورت جدولی ۱ و مطابق رفتار واقعی در نرم افزار معرفی می گردد.

۷-۲- تعریف خواص بتن

به طور کلی در نرم افزار Abaqus دو مدل رفتاری برای بتن قابل استفاده است. مدل اول با نام مدل ترک هاله ای بتن ۲ خوانده شده و در سازه هایی قابل کاربرد است که دارای بارگذاری افزایشی ۳ بوده و کرنش های ایجاد شده در بتن یکنواخت باشند. مدل دوم، مدل آسیب دیدگی پلاستیک ۴ می باشد. مدل آسیب دیدگی پلاستیک یک مدل ترکیبی است که قابلیت در نظر گرفتن همزمان شکست ناشی

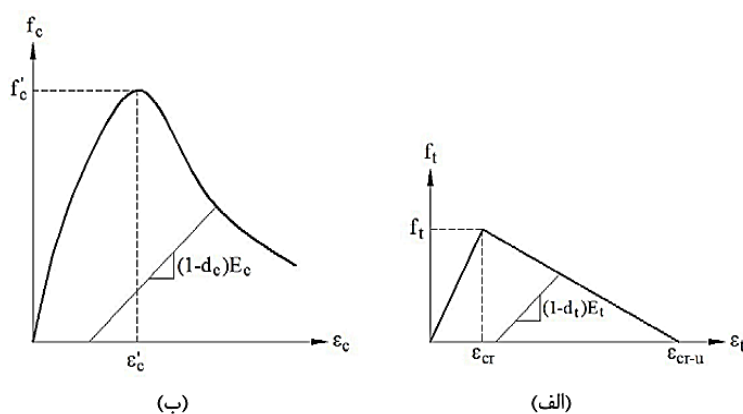
¹ Tabular

² Smeared Cracking Model

³ Monotonic

⁴ Damaged Plasticity Model

از فشار و کشش در بتن را دارد. این مدل اولین بار توسط Lubliner برای تحلیل بتن و سایر مواد نیمه ترد مانند سنگ و سرامیک تحت بارگذاری کلی (افزایشی، چرخه ای ۵ و دینامیکی) ارائه شد [26] و سپس توسط Lee و Fenves (۱۹۹۸) اصلاح و تکمیل گردید [27]. در مدل مزبور، رفتار بتن در فشار و کشش مطابق شکل (۲۱) تعریف می شود. در مدل آسیب دیدگی پلاستیک، مهمترین مکانیزم های شکست بتن، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری هستند. برای معرفی سطح تسلیم مورد استفاده در این مدل در نرم افزار Abaqus، لازم است تا پارامترهای مربوط به آن در برنامه تعریف شوند. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر استفاده از مدل آسیب دیدگی پلاستیک موردنظر می باشد، در ادامه روش تعریف پارامترهای آن به طور خلاصه اشاره می گردد. این پارامترها برای مشخص شدن تابع تسلیم مورد استفاده در نرم افزار ضروری هستند.



شکل ۲۱: نمودار تنش-کرنش بتن (الف) رفتار در کشش - (ب) رفتار در فشار [27]

۷-۲-۱ - مدل آسیب دیدگی پلاستیک بتن

در روش مدل پلاستیک بتن آسیب دیده ۶ دو فرض اصلی در مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته خواهد شد که اولی ترک خوردگی کششی و دومی خرد شدگی فشاری می باشند. معیار گسیختگی در محدوده پلاستیک ماده تحت تنش های ترکیبی بیان می شود. این معیار به دو دسته عمده براساس پاسخ ماده به فشار هیدرواستاتیک تقسیم بندی می شود. اکثر مواد با رفتار شکل پذیر به فشار هیدرواستاتیک وابسته نیستند ولی مواد غیرفلزی مانند خاک، سنگ ها و بتن و خیلی مواد دیگر از این جنس، در دسته مواد وابسته به فشار هیدرواستاتیک قرار می گیرند. فرمول کلی سطح پتانسیل پلاستیک توسط رابطه (۸) تعریف می شود که توسط صفحات انحراف تنش γ روی ارتفاع سطح پلاستیک و در راستای نصف النهارهای سطح در صفحات نصف النهاری رسم شده است (شکل ۲۲).

مقاطع سطوح گسیختگی در طول تقاطع بین سطح مزبور و صفحه انحراف تنش که نرمال به محور هیدرواستاتیک با $h=0$ می باشد، رسم شده است. نصف النهارها سطح منحنی هایی هستند که توسط تقاطع بین سطح گسیختگی و صفحه نصف النهاری که شامل محور هیدرواستاتیک با $\theta=0$ است، نشان داده می شوند. در تحلیل عددی θ می تواند مقادیری بین 0° (صفر درجه) برای نصف النهار کششی، و 60° برای نصف النهار فشاری داشته باشد. هنگامی که سخن از مدل بتن پلاستیک آسیب دیده (CDP) به میان می آید، تابع پتانسیل گسیختگی از مدل دراکر-پراگر ۸ قرض گرفته شده و اصلاحاتی برای رفتار خاص بتن صورت می گیرد.

$$f(J_1, J_2, J_3) = 0 \text{ or } f(h, r, \theta) = 0 \quad (8)$$

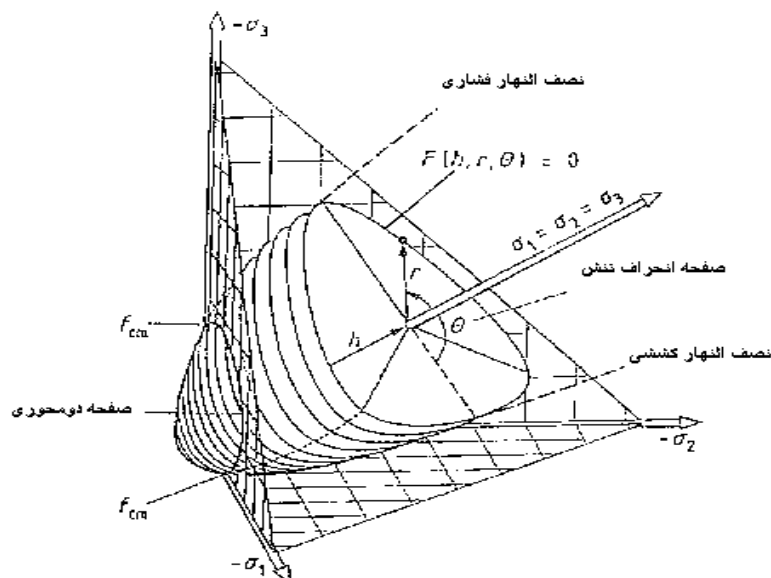
⁵ Cyclic

⁶ Concrete damaged plasticity

⁷ deviatoric stress planes

⁸ Drucker-Prager model

تعریف مفهوم خسارت توسط Kachanov در اواسط دهه ۵۰ میلادی براساس کاهش سطوح اتکای تنش ۹ ارائه شد. از آن پس مدل های زوال یافتگی زیادی برای مکانیک خسارت ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت، ولی مدل زوال سختی سکانتی ۱۱ دارای بیشترین مرجع بود [28].



شکل ۲۲: سطح گسیختگی برای بتن [28]

مدل های زوال یافتگی، زوال سختی الاستیک را به عنوان مجموع خسارت ها در نظر می گیرند. در مورد بتن این رفتار به درجه محصورشدگی المان بستگی دارد. از یک طرف، هنگامی که محصورشدگی بر اثر پروسه بارگذاری کم باشد، زوال رخ داده سریع و برگشت ناپذیر است. از طرف دیگر، در صورتی که درجه محصورشدگی بالا باشد، هنگامی که بار وارد می شود، برای رخ دادن زوال زمان بیشتری مورد نیاز خواهد بود. ساختار فرمول مدل زوال سختی الاستیک براساس مقدار اسکالر d به صورت رابطه (۹) می باشد [28].

$$\sigma = (1-d)E_0\varepsilon = (1-d)\bar{\sigma} \quad (9)$$

• پارامتر زاویه اتساع (ψ)

زاویه اتساع کرنش پلاستیک، بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می نمایند. هنگامی که $\psi=0$ باشد، ماده هیچگونه تغییر حجم کرنشی ندارد. در حقیقت زاویه اتساع رابطه بین حجم و کرنش برشی را بیان می کند. با توجه به آزمایشات، مشخص گردیده است که برای بتن مسلح زاویه اتساع بین 20° تا 40° خواهد بود [29]. هرچه مقدار این زاویه کوچکتر باشد، رفتار مصالح ترد و هرچه این زاویه بزرگتر باشد، ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل پذیر نشان می دهد. نشان داده شده است که زاویه $\psi=31^\circ$ بهترین رفتار را در فشار و کشش در بتن تعریف می نماید.

⁹ reduction of stress support areas

¹⁰ damage mechanics

¹¹ secant stiffness degradation

- پارامتر مشخصات تابع گسیختگی (f)

این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان و توسط رابطه $f = f_{b0}/f_{c0}$ تعریف شده است [30]. اکثر مراجع روی مقادیر بین ۱/۱۶ و ۱/۲۵ بسته به مقاومت بتن و درجه محصورشدگی اتفاق نظر دارند.

- پارامتر شکل انحراف صفحه تنش و زاویه محصورشدگی (γ)

این پارامتر شکل انحراف صفحه تنش و همچنین زاویه محصورشدگی بتن را تعریف می نماید. هنگامی که صفحه انحراف به شکل مثلثی نزدیک باشد، درجه محصورشدگی کمتر و هنگامی که دایره ای شکل باشد، درجه محصورشدگی زیاد را در نظر می گیرند. پارامتر γ را بین ۰/۶۶۶۷ و ۱ تعریف نموده ایم، اما بعضی محققین مقدار حداکثر را ۰/۸ به دست آورده اند [30].

- پارامتر تنظیم کننده ویسکوپلاستیک (η)

ویسکوزیته به منظور پرهیز از واگرایی تحلیل که ممکن است در اثر ایجاد ترک یا خرد شدن بتن در مدل به وجود آید، ماده بتن در نرم افزار با استفاده از پارامتر ویسکوزیته به صورت یک ماده ویسکو پلاستیک در نظر گرفته می شود. در مدل های پیشرفته مواد رسیدن به همگرایی برای کشش و زوال سختی با دشواری هایی همراه است. راه معمول برای غلبه بر این مشکل استفاده از روابطی برای تنظیم ویسکوپلاستیک می باشد. این مقدار تانژانت سختی ماده را با استفاده از رفتار نرم شدگی محاسبه می کند. استفاده از مقادیر کوچک پارامترهای تنظیم کننده ویسکوپلاستیک در مقایسه با نمو زمانی، نرخ همگرایی مدل را در روش نرم شدگی بدون به خطر انداختن نتایج، بهبود می دهد [30].

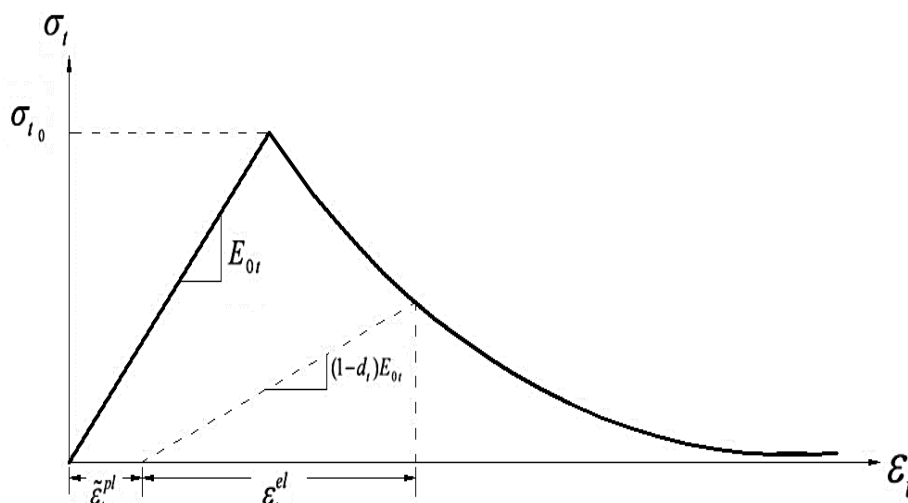
- رابطه سخت شدگی کششی

برای مدل کردن کامل رفتار کششی بتن در Abaqus، رفتار پس گسیختگی تنش-کرنش برای کشش در نظر گرفته می شود. این رفتار با سخت شدگی کششی، نرم شدگی کرنشی و اندرکنش فولاد و بتن به دست می آید (شکل ۲۳). برای این منظور باید مقادیر مدول یانگ E_0 ، تنش σ_t ، کرنش ترک خوردگی $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$ و همچنین پارامتر آسیب دیدگی d_t (damage) برای رده بتن مورد نظر وارد می شود. کرنش ترک خوردگی $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$ از رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_{0t}^{el} \quad (10)$$

در اینجا $\epsilon_{0t}^{el} = \frac{\epsilon_t}{E_0}$ می باشد که کرنش الاستیک بر طبق مصالح آسیب ندیده است و همچنین ϵ_t کرنش کششی کل می باشد.

پارامتر d_t در شکل (۲۳) پارامترهای خسارت کششی نامیده شده و سختی بتن در نقاط مختلف نمودار تنش-کرنش کششی را معین می نماید. حداکثر این پارامتر برابر یک بوده و در صورتی که مقدار آن صفر فرض شود به معنی آنست که سختی مصالح در چرخه های بارگذاری و باربرداری تغییر نمی کند. مقدار این پارامتر تابعی از هندسه و نوع مدل بتن مسلح است و در سازه های مختلف از طریق آزمون و خطا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی یا سایر تحلیل های قابل اطمینان تعیین می گردند [31, 32].



شکل ۲۳: مدل سخت‌شدگی کششی [۱۱۶]

نرم افزار Abaqus درستی منحنی آسیب دیدگی را از مقدار کرنش پلاستیک $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ محاسبه می کند که کنترل آن با استفاده از رابطه (۱۱) می باشد [31].

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (11)$$

• رابطه تنش-کرنش فشاری

برای تعریف تنش-کرنش بتن باید مقدار تنش ها σ_c کرنش های غیرالاستیک $\tilde{\epsilon}_c^{in}$ متناظر با مقادیر تنش و خواص آسیب دیدگی d_c را وارد نمود (شکل ۲۴). پارامتر d_c در شکل (۲۴) پارامتر خسارت فشاری نامیده شده و سختی بتن در نقاط مختلف نمودار تنش-کرنش فشاری را معین می نماید. حداکثر این پارامتر برابر یک بوده و در صورتی که مقدار آنها صفر فرض شود به معنی آنست که سختی مصالح در چرخه های بارگذاری و باربرداری تغییر نمی کند. مقدار این پارامتر همانند d_t (پارامتر خسارت کششی) تابعی از هندسه و نوع مدل بتن مسلح است و در سازه های مختلف از طریق آزمون و خطا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی یا سایر تحلیل های قابل اطمینان تعیین می گردند [۳۱، ۳۲].

مقادیر کرنش کل باید با استفاده از رابطه (۱۲) تبدیل به کرنش های غیرالاستیک شود.

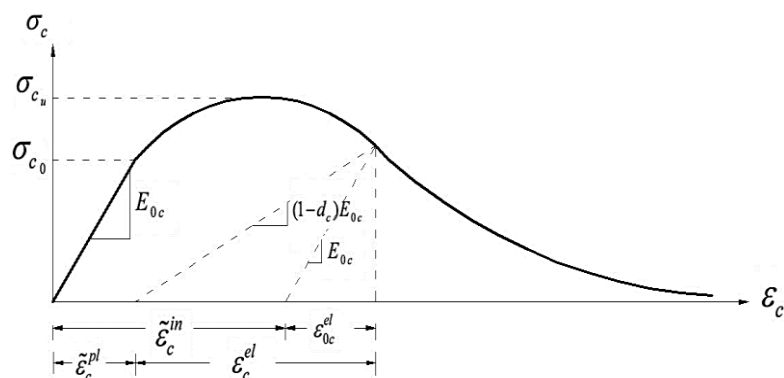
$$\tilde{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (12)$$

که در آن $\epsilon_{0c}^{el} = \frac{\epsilon_c}{E_0}$ ، کرنش الاستیک متناظر با ماده آسیب ندیده و ϵ_c کرنش کششی کل می باشد.

برای اطمینان از منفی نشدن مقادیر کرنش پلاستیک $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ و همچنین کاهش نیافتن آن هنگام افزایش تنش ها رابطه (۱۳) باید کنترل شود [32، 33].

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (13)$$

در شکل (۲۴) رابطه تنش- کرنش با در نظر گرفتن آسیب دیدگی نمایش داده شده است.



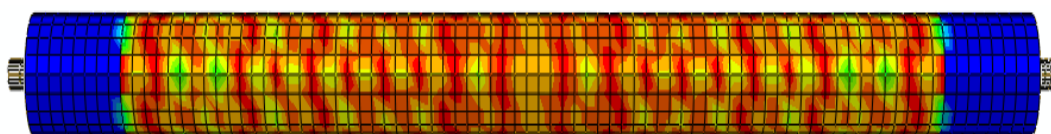
شکل ۲۴: مدل تنش-کرنش فشاری [34, 33]

۲-۷- بررسی نتایج مدل سازی

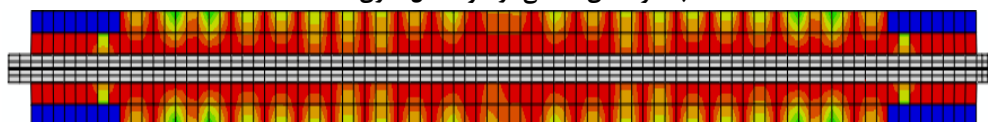
مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی و نتایج آزمایش برای تعدادی از نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP آورده شده است. همه اشکال به ترتیب شامل روند ترک خوردگی در نمونه مورد آزمایش، روند ترک خوردگی در نمونه مورد مدل سازی، توزیع تنش در میلگرد و نمودار مقایسه تنش-کرنش متوسط برای آزمایش و مدل سازی می‌باشد.



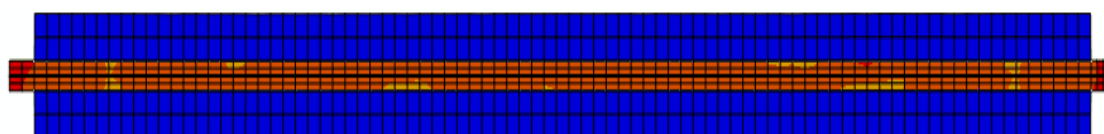
الف- ترک خوردگی در نمونه مورد آزمایش



ب- ترک‌های سطحی در نمونه مدل سازی شده

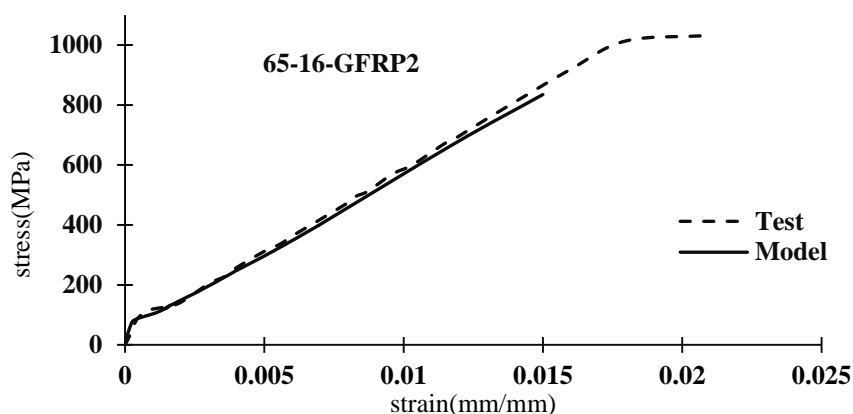


پ- ترک‌های داخلی در نمونه مدل سازی شده



ت- توزیع تنش تسلیم در میلگرد

شکل ۲۵: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 65-16-GFRP2 [25]



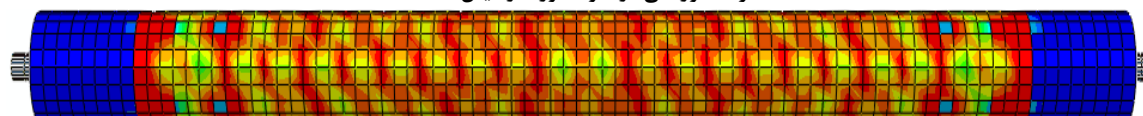
ث- نمودار تنش- کرنش متوسط برای نمونه

ادامه شکل ۲۵: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 65-16-GFRP2 [25]

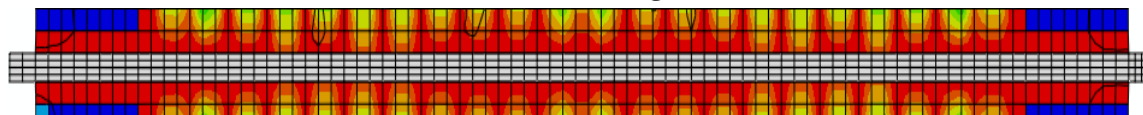
مقایسه رفتار نمونه 65-16-GFRP1 در مدل سازی و آزمایش در شکل ۲۶ آورده شده است.



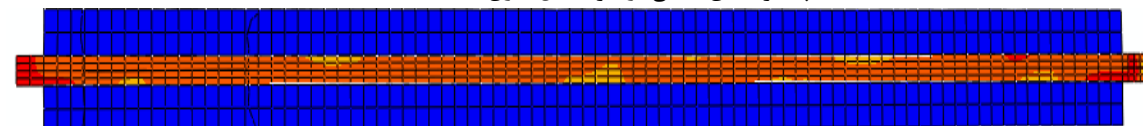
الف- ترک خوردگی در نمونه مورد آزمایش



ب- ترک‌های سطحی در نمونه مدل سازی شده

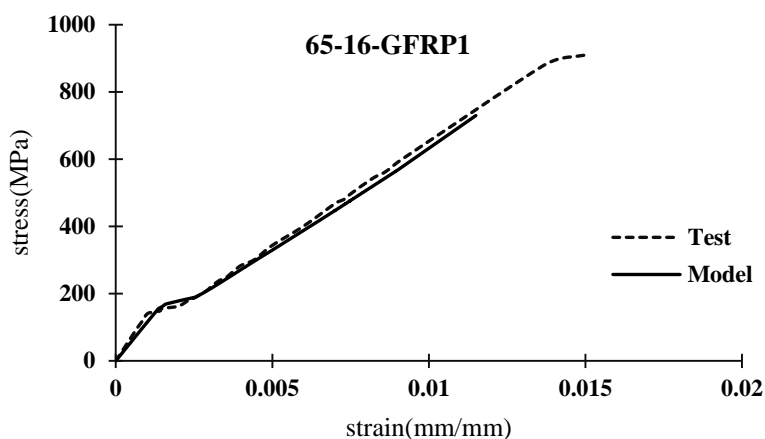


پ- ترک‌های داخلی در نمونه مدل سازی شده



ت- توزیع تنش تسلیم در میلگرد

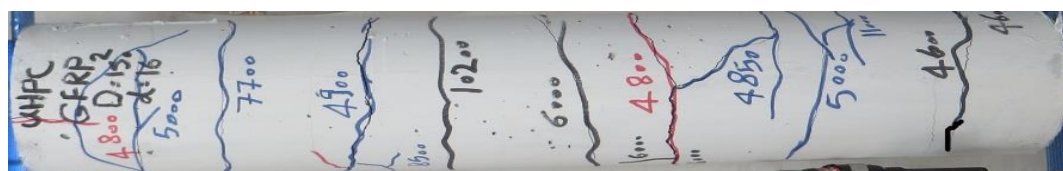
شکل ۲۶: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 65-16-GFRP1 [25]



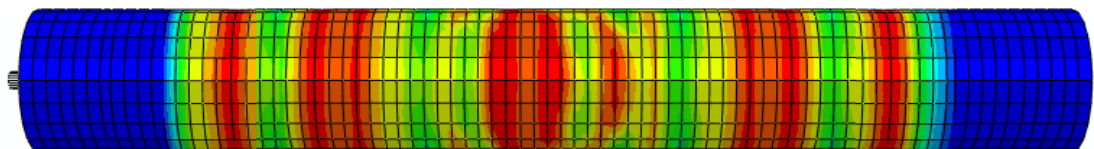
ث- نمودار تنش - کرنش متوسط برای نمونه

ادامه شکل ۲۶: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 65-16-GFRP1 [۲۵]

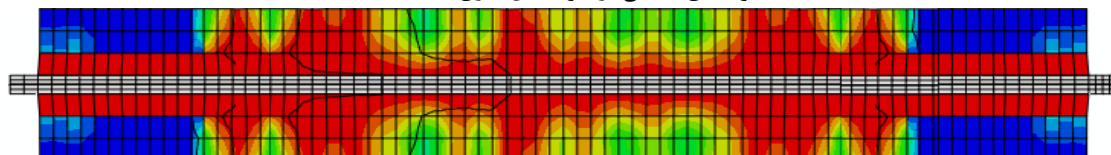
مقایسه رفتار نمونه 150-16-GFRP2 در مدل سازی و آزمایش در شکل ۲۷ آورده شده است.



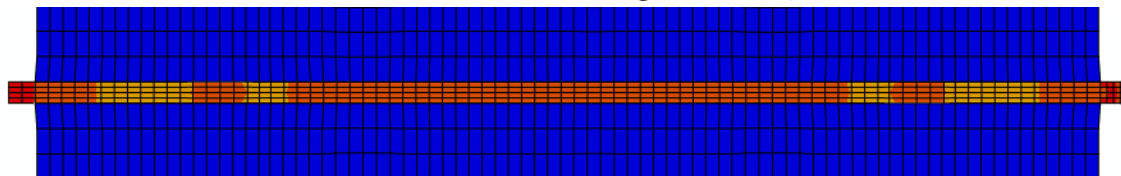
الف- ترک خوردگی در نمونه مورد آزمایش



ب- ترک های سطحی در نمونه مدل سازی شده

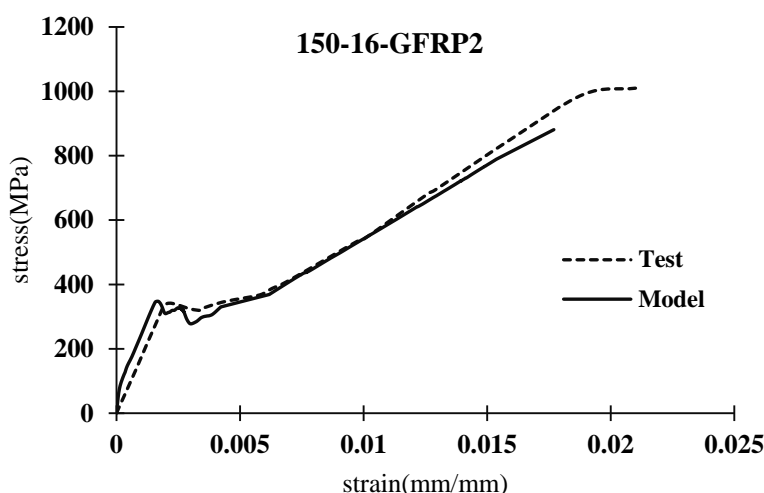


پ- ترک های داخلی در نمونه مدل سازی شده



ت- توزیع تنش تسلیم در میلگرد

شکل ۲۷: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 150-16-GFRP2 [25]



ث- نمودار تنش- کرنش متوسط برای نمونه

ادامه شکل ۲۷: مقایسه رفتار ترک خوردگی آزمایش و مدل سازی برای نمونه 150-16-GFRP2 [25]

بررسی شکل‌های ارائه شده برای نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای GFRP نیز نشان می‌دهد که در مدل سازی نمونه‌های آزمایش شده رفتار ترک خوردگی به خوبی نشان داده شده است، همچنین میزان اختلاف بین نمودار تنش- کرنش متوسط بدست آمده از مدل سازی با نمودار تنش- کرنش متوسط بدست آمده از آزمایش کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ویژگی‌های بتن فوق توانمند و رفتار ترک خوردگی نمونه‌های کششی مسلح با انجام آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق با آزمایش کششی بر روی ۱۲ نمونه بتنی با مقطع دایره‌ای به طول ۸۵۰ میلی‌متر از بتن فوق توانمند که با یک عدد میلگرد GFRP در مرکز نمونه مسلح شده، رفتار ترک خوردگی این نوع بتن بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها سرعت جابجایی جک کششی ۰/۷ میلی-متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و میزان جابجایی‌ها و نیرو-های وارد شده بر نمونه در هر لحظه ثبت شد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل شده است.

- در مرحله پایداری ترک، حداکثر فاصله ترک‌ها برای نمونه‌های دارای میلگرد نوع GFRP2 نسبت به نمونه‌های دارای میلگرد نوع GFRP1 کمتر است که این موضوع سبب می‌شود تا تعداد ترک‌ها در نمونه‌های دارای میلگرد نوع GFRP2 نسبت به نمونه‌های دارای میلگرد نوع GFRP1 بیشتر شود، این افزایش تعداد ترک‌ها باعث افت بیشتر میزان اثر سخت شدگی کششی در این نمونه‌ها می‌شود. همچنین افزایش نسبت C/d منجر به افزایش نیروی مورد نیاز برای آغاز مرحله ترک خوردگی می‌شود.
- مسلح کردن نمونه‌ها با میلگرد GFRP سبب می‌شود تا پس از مرحله پیدایش ترک‌ها، مرحله پایداری ترک به خوبی دیده می‌شود در حالی که در نمونه‌هایی که توسط میلگردهایی که مدول کشسانی بیشتری نسبت به میلگرد GFRP دارند نظیر میلگردهای فولادی مسلح شده‌اند فقط در نمونه‌هایی که نسبت تسلیح بالایی (ضخامت پوشش کمی داشتند) داشتند این وضعیت اتفاق می‌افتد.
- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد (d) یکسان هرچه میزان ضخامت پوشش بتن (C) بزرگ‌تر می‌شود (به عبارت دیگر نسبت C/d و d/p بزرگ‌تر باشند)، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.
- برای نمونه‌ها با قطر یکسان هرچه قطر میلگرد کوچک‌تر باشد، تعداد ترک‌های عرضی کم‌تر و در نتیجه فاصله ترک‌ها بیشتر می‌شود.

- برای نمونه‌ها با درصد تسلیح یکسان هرچه قطر میلگرد بزرگ‌تر، تعداد ترک‌های عرضی بیشتر و در نتیجه فاصله ترک‌ها کمتر می‌شود.
- رابطه ارائه‌شده برای متوسط فاصله ترک‌ها با رابطه ارائه‌شده از سوی کمیته اروپایی CEB-FIP همخوانی بسیار خوبی دارد و بر نتایج حاصل از آزمایش منطبق است.
- روابط ارائه‌شده برای حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها در بتن با نتایج حاصل از آزمایش و روابط پیشنهادی سایر محققان همخوانی بسیار خوبی دارد.
- رابطه پیشنهادی برای برای نسبت تنش کششی پیدایش اولین ترک به جذر مقاومت فشاری بتن توسط این پژوهش با دقت بسیار خوبی نیروی اولین ترک‌خوردگی در نمونه را محاسبه می‌نماید.

مراجع

- [1] Ramezani pour, A. Firoozmakan, Sh. and Ebadi, T. (2011). The effect of nano silica colloidal solution on the properties of mortar. In: Sixth National Congress on Civil Engineering. Semnan, Iran.
- [2] Korpa, A. and Trettin, R. (2004). The Use of Synthetic Colloidal Silica Dispersions for Making High Performance and Ultra High Performance Systems (HPC/UHPC). In: International symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, 155-164.
- [3] Rougeau, P. and Borys, B. (2004). Ultra High Performance Concrete with Ultrafine Particles Other Than Silica fume in Ultra High Performance Concrete. In: International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, 213-225.
- [4] Graybeal, B. (2006). Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HRT-06(103).
- [5] Fehling, E. Bunje, K. and Leutbecher, T. (2004). Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete. In: International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, 327-338.
- [6] Droll K. (2004). Influence of Additions on Ultra High Performance Concretes – Grain Size Optimization. Proceedings of the In: International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, 285-301.
- [7] Rahdar, H. A. and Ghalehnavi, M. (2016). Post-cracking behaviour of UHPC on the concrete members reinforced by steel rebar. *Computers and Concrete; An International Journal*, 18(1), 139-154.
- [8] Yazici, H. (2007). The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete with High Volume. Mineral Admixtures. *Building and Environment*, 42(5), 2083-2089.
- [9] Baena, M. Torres, L. Turon, A. and Miàs, C. (2013). Analysis of cracking behaviour and tension stiffening in FRP reinforced concrete tensile elements. *Composites Part B: Engineering* 45(1), 1360-1367
- [10] Doo-Yeol, Y. and Banthia, N. (2015). Numerical simulation on structural behavior of UHPFRC beams with steel and GFRP bars. *Computers and Concrete; An International Journal*, 16(5), 759-774
- [11] Deng, Z.C. Jumbe, R.D. and Yuan, C.X. (2014). Bonding between high strength rebar and reactive powder concrete *Computers and Concrete; An International Journal*, 13(3), 411-421.
- [12] Vijay, P. (1999). Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars. PhD Thesis. West Virginia University
- [13] Newhook, J. Ghali, A. and Tadros, G. (2002). Cracking and deformability of concrete flexural sections with fiber reinforced polymer. *Journal of Structural Engineering*, 128(9), 1195-1201.
- [14] Tighiouart, B. Benmokrane, B. and Gao, D. (1988). Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and building materials*, 12(8), 453-462.
- [15] Tighiouart, B. Benmokrane, B. and Mukhopadhyaya, P. (1998). Bond strength of glass FRP rebar splices in beams under static loading. *Construction and Building Materials*, 13(7), 383-392.
- [16] Lee, JY. Kim, TY. Kim, TJ. Yi, CK. Park, JS. You, YC. And Park, YH. (2008). Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering*, 39(2), 258-270.
- [17] Baena, M. Torres, L. Turon, A. and Barris, C. (2009). Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composites Part B: Engineering*, 40(8), 784-797.

- [18] Davalos, J.F. Chen, Y. and Ray, I. (2008). Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 722-730.
- [19] Achillides, Z. Pilakoutas, K. (2004). Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composites for Construction*, 8(2), 173-181.
- [20] ACI, A., 440.3 R-04. (2004). *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 350
- [21] CEB-FIP. (1993). *CEB-FIP Model Code 1990 for Concrete Structures*. Committee Euro- International du Beton and Federation International de la Precontrainte. ThomasTelford, London.
- [22] Rizkalla, S.H. Hwang, L.S. (1984). Crack Prediction for Members in Uniaxial Tension. *ACI Journal*, 81 (11), 572-579.
- [23] Shayanfar, M.A., Ghalehnovi, M. and Safiey, A. (2007). Corrosion effects on tension stiffening behavior of reinforced concrete. *Computers and Concrete; an International Journal*, 4(5), 45-70.
- [24] Cosenza, E. Manfredi, G. and Realfonzo, R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *Journal of composites for construction*, 1(2), 40-51.
- [25] Rahdar, Hosseinali. (2016). Investigation of tension-stiffening of Ultra-High performance concrete reinforced by steel and GFRP bars. PhD Thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Department of Civil Engineering
- [26] Lubliner, J. Oliver, J. Oller, S. and Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299-326.
- [27] Lee, J. Fenves, G.L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 124(8), 892-900.
- [28] Kachanov, L.M. (1999). Rupture Time under Creep Conditions. *International Journal of Fracture*, 97(1), 11-18.
- [29] Malm, R. (2009). Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method. PhD Thesis. Royal institute of thechnology.
- [30] Grassl, P. Jirasek, M. (1999). Damage-plastic model for concrete failure. *International journal of solids and structures*, 43(22), 7166-7196.
- [31] Jankowiak, T. Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), 53-69.
- [32] Lopez-Almansa, F. Alfarah, B. and Oller, S. (2014). Numerical simulation of RC frame testing with damaged plasticity model. Comparison with simplified models. In *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul, Turkey.
- [33] Birtel, V. Mark, P. (2006). Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. In *ABAQUS Users' Conference*.