

# اساس



انجمن مهندسين عمران ايران

فصلنامه علمی و پژوهشی انجمن مهندسين عمران ايران

سال نوزدهم، شماره ۴۶

بهار ۱۳۹۶

در این شماره می خوانید:  
● سرمقاله: دکتر علیرضا رهایی

● مدل سخت شدگی کششی بتن فوق توانمند برای رفتار نمونه های بتنی مسلح شده با میلگردهای الیاف شیشه (GFRP) حسینعلی رهدار، منصور قلعه نویی

● بررسی تاثیر مشخصات مخلوطهای آسفالتی در مقاومت لغزشی و تصادفات تقاطع های بدون چراغ راهنمایی شهری بهنام امینی، ساسان عادل

● ارزیابی اثرات مودهای بالاتر در قاب های خمشی فولادی تحت زلزله های نزدیک راستای موازی و عمود بر گسل محسن گرامی، امیرحسام مشایخی، نوید سپاه پلو

● مدل سازی خطای شعاعی مداری ماهواره ارتفاع سنجی جیسون - ۲ با استفاده از نقاط هم گذر؛ مطالعه موردی: منطقه خلیج فارس مرضیه جعفری، حمید محمدی، ایرج جزیرئیان

● بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیلیس بر بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه حمیدرضا اشرفی، یحیی آدینه فر، سیدعلی حسن زاده، سیدشهاب حسنی نسب، علی زارعی

● تحلیل تیرهای سراسری و قابهای پل با استفاده از پراکنش لنگر محمودرضا حسینی طباطبایی، محمد رضایی پزند، محمودرضا ملایی نیا



ISSN: 2008-7721

## مدل سخت‌شدگی کششی بتن فوق‌توانمند برای رفتار نمونه‌های بتنی مسلح شده با میلگردهای الیاف شیشه (GFRP)

منصور قلعه‌نوی

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد  
ghalehnovi@um.ac.ir

حسینعلی رهدار

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه زابل  
rahdar@uoz.ac.ir

### چکیده

پدیده سخت‌شدگی کششی به عنوان پارامتری مهم در رفتار اعضای بتنی مسلح نقش بسیار مهمی در شناخت رفتار واقعی مصالح در مدل‌سازی‌ها و ارزیابی رفتار غیرخطی سازه‌ها دارد. در یک عضو بتن مسلح، بتن در فاصله بین دو ترک، تغییر طول میلگرد را مقید کرده و باعث می‌شود میلگرد عضو بتنی نسبت به میلگرد تنها کرنش کمتری نشان دهد. در واقع این پدیده موجب می‌شود تا سختی نمونه و رفتار عضو تغییر کند.

از آنجایی که پدیده سخت‌شدگی کششی<sup>۱</sup> به عواملی نظیر ابعاد عضو، نسبت تسلیح، قطر میلگردها و ویژگی مواد وابسته است، با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های بتن مسلح با مقطع دایره‌ای و مسلح شده با یک میلگرد<sup>۲</sup> GFRP به قطر ۱۲ یا ۱۶ میلی‌متر از دو نوع میلگرد با مدول کشسانی متفاوت در مرکز نمونه، تأثیر ویژگی‌های مکانیکی میلگرد تسلیح، نسبت تسلیح و نسبت  $C/d$  بر رفتار سخت‌شدگی کششی بتن فوق‌توانمند در اعضای بتنی مسلح با میلگردهای GFRP ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش  $C/d$  در همه نمونه‌ها باعث افزایش سختی اولیه تا قبل از مرحله آغاز ترک در بتن می‌شود. با بررسی رفتار نمونه‌ها پس از پیدایش ترک‌های نخستین برای نواحی قبل و بعد از ترک‌خوردگی بتن در نمونه‌های مسلح شده با GFRP مدل‌های عددی مناسبی ارائه شده است.

### کلمات کلیدی

پدیده سخت‌شدگی کششی، بتن فوق‌توانمند، میلگردهای الیاف شیشه (GFRP)، ترک، نمونه بتن مسلح کششی.

### Tension stiffening model of UHPC for behavior of concrete members that reinforced by GFRP rebar

#### ABSTRACT

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. the tensile behavior of concrete depends on factors such as member dimensions, reinforcement ratio, diameter of rebar and mechanical properties of material, Since in this research the experimental method is used to examine the effect of mechanical properties of rebar, reinforcement ratio and  $C/d$  ratio on the tension stiffening behavior of ultra high performance concrete members that reinforced by GFRP rebar. The results show that increasing the rebar cover on diameter rebar ratio ( $C/d$ ) in all of specimens causes that their initial stiffening increases before the cracking stage in concrete. Also. In this study proposed a novel model for tension stiffening in RC members that reinforced with GFRP rebar.

#### KEYWORDS

Tension stiffening, ultra high performance concrete, GFRP rebar, crack, reinforced concrete member.

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۱

تاریخ آخرین اصلاحات: ۹۶/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۲۷

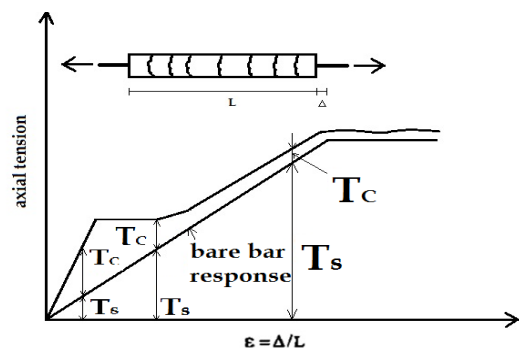
## ۱- مقدمه

اعضا است [۱۵] و [۷]. همچنین با مطالعه بر رفتار نمونه‌های بتن مسلح پس از مرحله ترک‌خودگی بتن، استراماندیولی و همکارش [۲۸] یک منحنی با شاخه نزولی نمایی برای این ناحیه ارائه کرده‌اند که در این رابطه پارامتر کاهش نمایی، تابعی از نسبت تسلیم عضو ( $\rho$ ) و نسبت مدول کشسانی فولاد به بتن ( $n$ ) است. مطالعات عباد و مرزوک [۱۰] نیز منجر به ارائه یک مدل سخت‌شدگی کششی برای بتن تقویت شده با ورق‌های FRP<sup>۲</sup> جهت استفاده در آنالیز دال‌های دوطرفه تقویت شده با ورق FRP شده است. شایانفر و همکاران [۱۴] با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های بتن مسلح به طول ۵۰۰ میلی‌متر و با مقاومت ۲۶ مگاپاسکال تأثیر خوردگی میلگرد فولادی را بر رفتار سخت‌شدگی کششی بررسی نموده‌اند. بانا و همکاران [۲] برای بحث لغزش-چسبندگی و سخت‌شدگی کششی بتن معمولی با FRP یک مدل عددی جهت آنالیز ارائه و نتایج حاصل از این مدل را با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی نموده‌اند. در یک گزارش نتایج تحقیقات هفت گروه از محققان بر روی تقریباً ۵۰ تحلیل و آزمایش در زمینه سختی کششی میلگردهای تسلیم محاط شده در بتن مسلح با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر ضخامت پوشش، فاصله ترک‌ها، نمره میلگردها، سخت‌شدگی کششی میلگرد عریان و اثر نرم‌شدگی بتن توسط نوعی و الفگرن [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته‌است. الگ‌هایسن و همکاران [۱۲] به بررسی مکانیسم ترک خوردگی، اثر اندازه ضخامت پوشش و قطر میلگرد بر ترک خوردگی پرداخته‌اند. استراماندیولی و همکاران [۲۸] یک مدل سخت‌شدگی کششی با شاخه نزولی نمایی جهت استفاده در یک برنامه محاسباتی برای آنالیز تیرهای بتن مسلح پیشنهاد داده‌اند. لی و کیم [۱۹] با آزمایش بر روی ۳۵ نمونه کششی مستقیم اثر مقاومت‌های فشاری ۲۰، ۶۰ و ۸۰ MPa را بر روی سخت‌شدگی کششی و پاسخ ترک نمونه‌ها بررسی کرده‌اند. مرزوک و چن [۲۰] برای ناحیه بعد از ترک برای بتن معمولی و بتن مقاومت بالا رابطه ارائه داده‌اند.

رهدار و قلعه‌نوی [۲۳] در سال ۲۰۱۶ برای نمونه‌های بتنی مسلح شده با میلگرد فولادی و ساخته شده از بتن فوق‌توانمند<sup>۴</sup> با بررسی پدیده سخت‌شدگی کششی این نمونه‌ها و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برای ناحیه پس از ترک خوردگی مدل مناسبی ارائه نموده‌اند. سئونگ و همکاران [۲۶] برای بتن با مقاومت معمولی یک مدل سخت‌شدگی کششی ارائه داده‌اند، این مدل برای المان‌های بتن مسلح تحت کشش مستقیم، خمش و برش، میزان کرنش متوسط بتن تا قبل از تسلیم میلگرد تسلیم را ارائه می‌دهد. اثر سخت‌شدگی کششی برای بتن‌های پیش‌تنیده شیمیایی (CPC<sup>۵</sup>) تحت کشش محوری بصورت آزمایشگاهی توسط ساهامیتمونگ کول و کیشی مورد بررسی قرار گرفته‌است [۲۵]. دوو و بنثیا [۹] 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.

با توجه به اینکه امروزه استفاده از مصالح نوین نظیر میلگردهای GFRP و بتن‌های فوق‌توانمند به دلیل ویژگی‌های مقاومتی بالای این نوع مصالح در صنعت ساختمان و بویژه در ساخت سازه‌های عظیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها دارای پیشرفت زیادی می‌باشد، شناخت صحیح رفتار این نوع مصالح و اندرکنش متقابل آنها ضرورت دارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار سازه‌های ساخته شده از این نوع مصالح، اثر سخت‌شدگی کششی است. سخت‌شدگی کششی پدیده‌ای است که به بحث در مورد تأثیر بتن بر سختی ماده‌ی مسلح کننده می‌پردازد [۱۷]. این پدیده، تنش‌ها و کرنش‌های ماده‌ی مسلح کننده‌ی متصل به بتن را کاهش می‌دهد و باعث کمتر شدن کرنش میانگین ماده‌ی مسلح کننده‌ی متصل به بتن در مقایسه با کرنش ماده‌ی مسلح کننده‌ی فاقد بتن می‌شود. سخت‌شدگی کششی بر عرض و فاصله ترک‌ها و سختی عضو تحت کشش و یا تحت خمش تأثیر می‌گذارد [۴].

در عضو تحت کشش بتن مسلح، قبل از ایجاد ترک، به دلیل وجود بتن اطراف ماده مسلح کننده، سختی عضو بیشتر از ماده مسلح کننده‌ی بدون پوشش بتنی است. با ایجاد و افزایش ترک‌ها پاسخ عضو به سمت پاسخ ماده مسلح کننده‌ی بدون پوشش بتنی میل می‌کند. با پدیدار شدن ترک‌های اولیه، بار تحمل شده توسط بتن با توسعه ترک‌های ثانویه‌ای که بین ترک‌های اولیه ایجاد می‌شوند، کاهش می‌یابد [۵]، [۳]، [۱۶]. آیین‌نامه‌های CEB-FIP و fib، [۶] و [۱۳]، مدل سخت‌شدگی یکسانی را پیشنهاد می‌کنند. در مدل ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی fib [۱۳] از رابطه نیرو-کرنش عضو بتن مسلح به میلگرد تسلیم استفاده شده است (شکل ۱).



شکل (۱): رابطه بار - کرنش عضو تحت کشش [۱۰]

در گذشته تحقیقات فراوانی روی اثر سخت‌شدگی کششی اعضای بتنی مسلح با فولاد و بتن با مقاومت معمول انجام شده است؛ نتایج حاصل از این تحقیقات بیانگر میزان تأثیر قابل توجه سخت‌شدگی کششی در این



شکل (۲): نمونه‌های مورد آزمایش از بتن فوق توانمند و میلگرد GFRP

دینگ زونگ و همکاران [۸] نیز در سال ۲۰۱۴ توسط آزمایش تست بیرون کشیدگی (pullout) ویژگی باند لغزش بین میلگرد مقاومت بالا و بتن پودری که نوبت فوق توانمند می‌باشد را مورد بررسی قرار داده‌اند.

برای تعیین اثر سخت‌شدگی کششی سه روش آزمایشگاهی، ساده-سازي توزیع تنش و ریز مدل‌سازی رفتار، استفاده می‌شود که از میان روش‌های ذکر شده روش آزمایشگاه با توجه به انطباق کامل بر رفتار نمونه‌ها مناسب‌ترین روش می‌باشد. در این روش نمونه‌های بتن مسلح به صورت کششی تک محوره بارگذاری می‌شوند و رفتار پس از ترک خوردگی و نحوه‌ی گسترش ترک بررسی می‌شود. بر مبنای منحنی نیرو-تغییر مکان حاصله و تقسیم تغییر مکان به طول نمونه و نیرو بر سطح مقطع، متوسط تنش-کرنش نمونه تسلیح شده محاسبه می‌شود که تفاضل آن از رفتار تسلیح به تنهایی معرف میزان سخت‌شدگی کششی بتن است [۲۶].

### ۲-۲- نام‌گذاری نمونه‌ها

نام‌گذاری نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌است 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. به‌عنوان مثال عبارت ۱۰۰-۱۲-GFRP۱ معرف نام‌گذاری یک نمونه بتنی به قطر ۱۰۰ mm است که با یک میلگرد GFRP به قطر ۱۲ mm از نوع ۱ GFRP در مرکز نمونه مسلح شده‌است. مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده‌است.

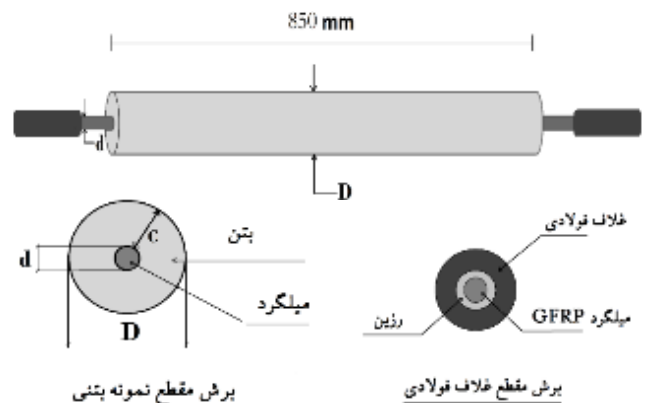
### ۲- ساخت نمونه‌ها و مشخصات مواد

#### ۲-۱- نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP

تعداد ۱۲ نمونه منحصر به فرد از بتن فوق توانمند و تسلیح از نوع میلگرد GFRP ساخته شده‌است از هر نمونه دو عدد مورد آزمایش قرار گرفته‌است و نمودارها ارائه شده بیانگر متوسط نتایج تست برای هر نمونه است. مشخصات این نمونه‌ها مطابق شکل (۲) می‌باشند نسبت‌های پوشش کاور بتنی به گونه‌ای انتخاب شده‌است که میزان پوشش ارائه شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برای شرایط محیطی مختلف را تأمین کند. از سوی دیگر 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 باید در دو سر میلگرد تسلیح یک سری غلاف فولادی استفاده نمود که میلگرد توسط رزین چسبیده در این غلاف‌ها مهار شده‌است. طول این غلاف متناسب با ظرفیت باربری میلگردها ۳۵۰ mm انتخاب شده‌است و سطح داخلی این غلاف‌ها توسط قلاوین مناسب شیار زده شده‌است تا از لغزش بین رزین و سطح داخلی غلاف جلوگیری شود.

جدول (۱): مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

شماره	نام نمونه	ضخامت پوشش (کاور) C/d	درصد تسلیح (ρ)
۱	۶۵-۱۲-GFRP۱	۲۶/۵	۳/۵۳
۲	۶۵-۱۲-GFRP۲		
۳	۱۰۰-۱۲-GFRP۱	۴۴/۰	۱/۴۶
۴	۱۰۰-۱۲-GFRP۲		
۵	۱۵۰-۱۲-GFRP۱	۶۹/۰	۰/۶۴
۶	۱۵۰-۱۲-GFRP۲		
۷	۶۵-۱۶-GFRP۱	۲۴/۵	۶/۴۵
۸	۶۵-۱۶-GFRP۲		
۹	۱۰۰-۱۶-GFRP۱	۴۲/۰	۲/۶۳
۱۰	۱۰۰-۱۶-GFRP۲		
۱۱	۱۵۰-۱۶-GFRP۱	۶۷/۰	۱/۱۵
۱۲	۱۵۰-۱۶-GFRP۲		



### ۲-۳- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

۱۰۲۰/۰	ماسه سیلیسی
۲۰/۱	فوق روان کننده (۰.۳)
۱۷۸/۰	آب (لیتر)

جدول (۳): 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 <sup>۳</sup> )
۱۰/۵۱	مقاومت کششی برزیلی (MPa)
۹/۰۰	مقاومت کششی (MPa)



شکل (۳): مخلوط‌کن مورد استفاده برای ساخت بتن فوق توانمند

#### ۲-۴ 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 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 ACI ۴۴۰.۳R [۱] آماده‌سازی شده‌اند. میلگردهای GFRP درون غلاف لوله فولادی به صورت ثابت قرار گرفته‌اند، سپس درون آن‌ها

با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی سخت‌شدگی کششی بتن فوق توانمند می‌باشد، بتن مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها از نوع بتن فوق توانمند است. نسبت اختلاط اجزای مختلف بتن فوق توانمند استفاده شده برای نمونه‌های مورد آزمایش نیز در جدول (۲) آورده شده است. همچنین ویژگی‌ها و مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده در آزمایشگاه که بر اساس آزمایش‌های استاندارد بدست آمده [۳۳]، در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری این نوع بتن به روند اختلاط و شیوه عمل‌آوری حساس می‌باشد در ادامه روند اختلاط شرح داده می‌شود.

#### ۲-۳-۱- روند اختلاط

عموما روندهای اختلاط در طرح‌های مختلف یکسان هستند. 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 مخلوط 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 شده است.
- مصالح خشک شامل پودر سیلیس، ماسه سیلیسی، سیمان و میکروسیلیس در مخلوط‌کن (شکل ۳) به مدت ۲ دقیقه مخلوط شده‌اند.
- آب به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شده است.
- یک دقیقه مکث و سپس باقی مانده فوق‌روان‌کننده و آب به مخلوط در مدت ۳۰ ثانیه افزوده شده است.
- مخلوط کردن تا زمانی که بتن از حالت پودر خشک به شکل ملات تبدیل شود، ادامه پیدا کرده است (این زمان تقریباً دو یا سه دقیقه به طول انجامید).

جدول (۲): مقادیر مصالح برای یک متر مکعب از طرح اختلاط

مقدار (کیلوگرم)	مصالح
۶۷۰/۰	سیمان
۲۰۰/۰	میکروسیلیس
۲۸۵/۰	پودر کوارتز

های مورد نظر ابتدا قالب‌های پلاستیکی به ارتفاع ۸۵۰ mm تهیه شده است. به کمک یک میز کار مناسب که قالب‌ها بر روی آن قرار گرفته‌اند، میلگرد تسلیح در مرکز نمونه قرار داده شده‌است. بتن‌ریزی در قالب‌ها، طی سه مرحله صورت گرفته و در هر مرحله جهت تراکم مناسب و خارج شدن هوای موجود در بتن از میز ویریه استفاده شده‌است. شکل (۶) تعدادی از نمونه‌ها در هنگام بتن‌ریزی را نشان می‌دهد. عمل آوری نمونه‌ها در مدت ۲۸ روز و به صورت عمل‌آوری در محیط اشباع بوده‌است. به دلیل توزیع تنش کششی حلقوی و توزیع شعاعی ترک در اطراف میگرد سطح مقطع نمونه دایره‌ای انتخاب شده‌است [۱۸].



شکل (۶): تعدادی از نمونه‌ها در هنگام بتن‌ریزی

### ۳- روش آزمایش

نمونه‌ها 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 (mm/minutes) در نظر گرفته شده‌است. 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 وارد بر نمونه نیز توسط یک دستگاه نیروسنج (load cell) با ظرفیت ۲۰۰ کیلونیوتن و دقت ۰/۰۱ KN در هر لحظه ثبت شده و مجموعه داده‌ها توسط کارت داده نصب شده بر روی یک دستگاه رایانه جهت آنالیز و بررسی آماده گردیده‌است (شکل ۷).

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

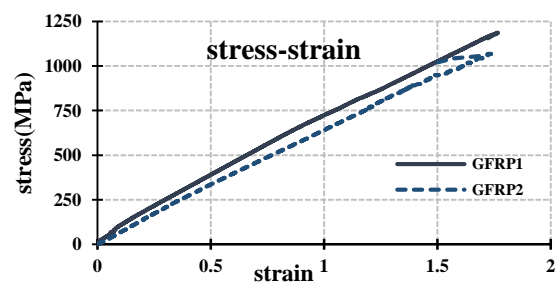
با رزین پُر شده‌است. برای جلوگیری از لغزش بین رزین و سطح صاف لوله، درون لوله فولادی حدیده شده‌است تا زبری لازم را بدست آورد. کومار تریپاتی [۲۹] برای طول غلاف فلزی پیشنهاد کرده‌است که حداقل طول مدفون میلگرد FRP درون غلاف فولادی ۱۵ برابر قطر آن می‌باشد. نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه آزمایش کشش، چگونگی آماده‌سازی نمونه‌ها و نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها، در شکل‌های (۴ و ۵) و مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۴) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۴-ب): چگونگی قرارگیری نمونه GFRP<sub>۱</sub> در دستگاه آزمایش کشش



شکل (۴-الف): چگونگی قرارگیری نمونه GFRP<sub>۲</sub> در دستگاه آزمایش کشش



شکل (۵): نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کششی نمونه

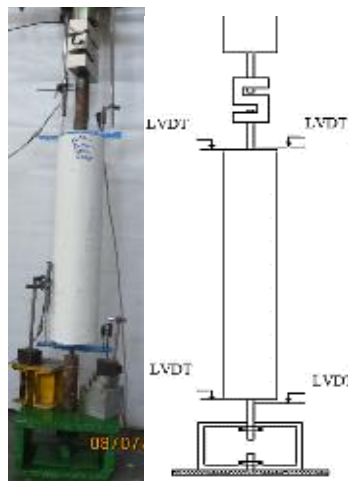
جدول (۴): متوسط مشخصات مکانیکی میلگردهای GFRP

کرنش‌نهایی (%)	تنش‌نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	
۱/۷۶	۱۱۹۰	۶۶	مشخصات آزمایش GFRP <sub>۱</sub>
۱/۷۴	۱۰۳۷	۵۴	مشخصات آزمایش GFRP <sub>۲</sub>

### ۲-۵ ساخت و تهیه نمونه‌ها

پس از تهیه میلگردهای الیاف شیشه و آماده‌سازی میلگردها و نصب غلاف‌های فلزی در دو سر میلگردهای الیاف شیشه، برای ساخت نمونه-

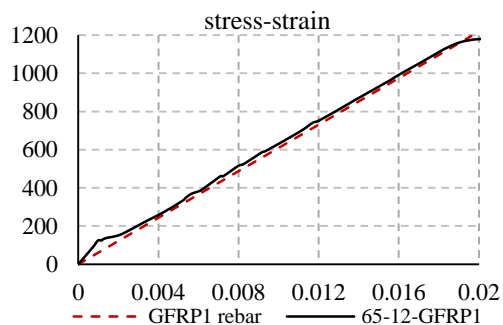
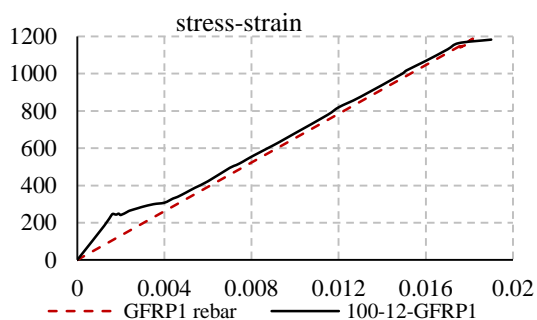
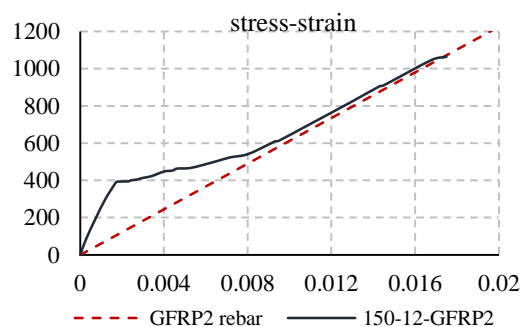
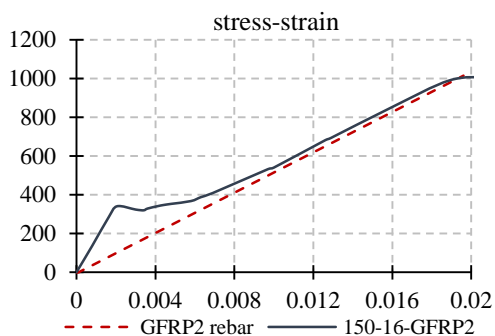
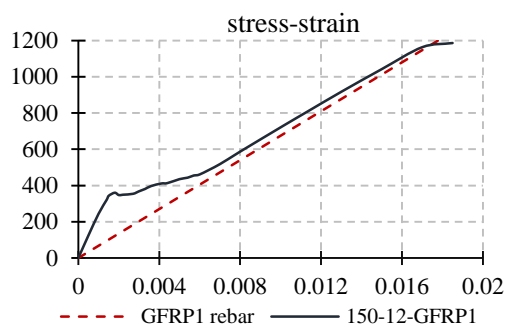
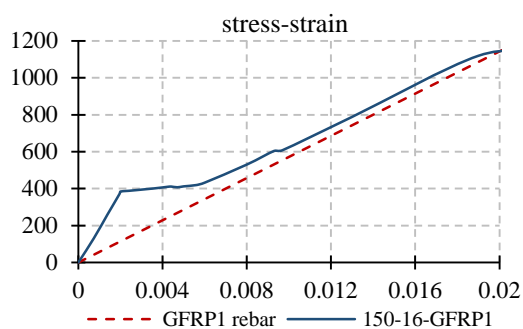
شکل (۷): جزئیات و مشخصات نمونه‌های بتنی مورد آزمایش

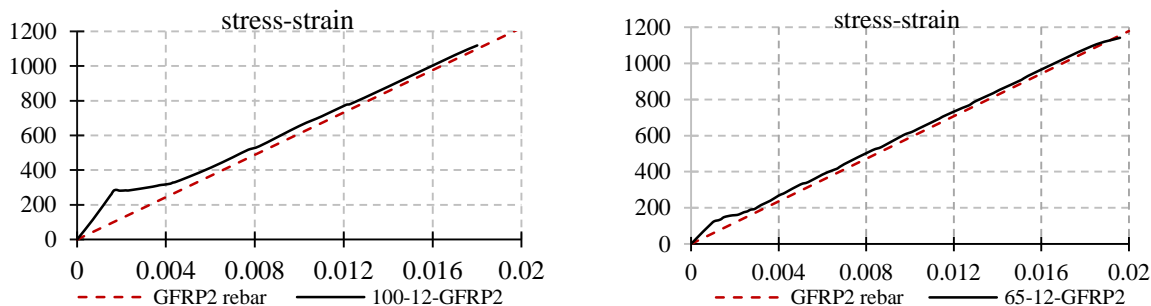


#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

##### ۴-۱- بررسی منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مورد آزمایش

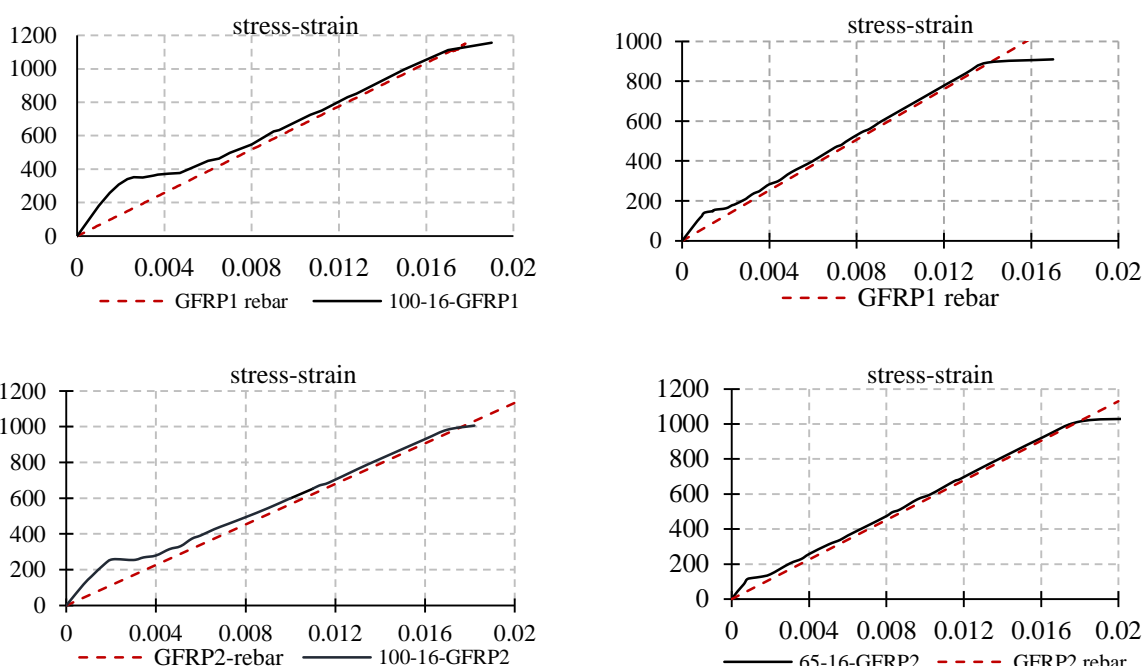
با توجه به اینکه پارامترهایی نظیر ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، درصد تسلیح نمونه بتن مسلح، نوع و جنس میلگرد تسلیح بر رفتار اعضای کششی بتن مسلح تأثیرگذار است، طراحی انجام آزمایش‌ها نیز به منظور بررسی تأثیر این پارامترها بر رفتار نمونه‌های بتن مسلح صورت گرفته‌است. نمودارهای تنش-کرنش متوسط کششی بدست آمده برای نمونه‌های معرفی شده در شکل (۸) آورده شده است.





شکل (۸): نمودار تنش - کرنش نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP

(در کلیه نمودارهای بالا محور عمودی تنش (MPa) و محور افقی کرنش در نمونه (mm/mm) است.)



ادامه شکل (۸) نمودار تنش - کرنش نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP

(در کلیه نمودارهای بالا محور عمودی تنش (MPa) و محور افقی کرنش در نمونه (mm/mm) است.)

افزایش میزان سختی اولیه نمونه گردیده است. بررسی نمودارهای مورد آزمایش با نتایج ارائه شده توسط رهدار و قلعه نوی [۲۲] نشان می‌دهد که میزان افزایش سختی نمونه قبل از ترک خوردگی در نمونه‌های مسلح شده با انواع میلگرد GFRP نسبت به میزان افزایش سختی اولیه در نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی به مراتب کمتر است به گونه‌ای که برای نمونه‌ها با قطر خارجی ۱۵۰ mm به میزان ۳ برابر کمتر و برای نمونه‌ها با قطر خارجی ۶۵ mm به میزان ۲ برابر کمتر است.

در نمونه‌های مشابه افزایش درصد تسلیح باعث کاهش در میزان سختی اولیه نمونه شده است، هرچند میزان این کاهش ناچیز و حدود ۳ تا ۵

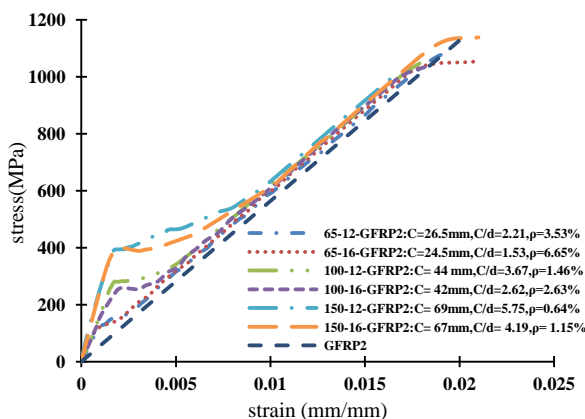
بررسی نمودارهای موجود در شکل (۸) نشان می‌دهد که برای نمونه‌ها با قطر ۶۵ mm مسلح شده با میلگرد به قطر ۱۲ و ۱۶ از هر دو نوع میلگرد GFRP۱ و GFRP۲ سختی اولیه نمونه (سختی نمونه قبل از ترک خوردگی) نزدیک به ۲ برابر سختی میلگرد تنها (بدون پوشش بتنی) است و برای نمونه‌ها با قطر خارجی ۱۰۰ mm برای هر دو قطر و هر دو نوع میلگرد میزان سختی اولیه نمونه حدود ۲/۶ برابر سختی میلگرد تنها است و این مقدار در نمونه‌های با قطر ۱۵۰ mm به مقدار ۳/۵ برابر است. مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد افزایش قطر نمونه، که منجر به افزایش ضخامت پوشش بتن روی میلگرد تسلیح می‌شود، سبب



بررسی بهتر تأثیر این عوامل بر رفتار نمونه‌ها، به صورت جداگانه اثر تغییر ضخامت پوشش بتن روی میلگرد برای هر نوع میلگرد بررسی شده است و همچنین تأثیر تغییر نوع میلگرد برای نسبت‌های پوشش بتن و درصد تسلیح یکسان در اشکال (۹ و ۱۰) مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

منحنی‌های تنش-کرنش رفتار کششی نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای GFRP<sub>۱</sub> و GFRP<sub>۲</sub> در اشکال (۹ و ۱۰) نشان می‌دهد که در نمونه‌های مسلح شده با هر دو نوع میلگرد GFRP سختی اولیه نمونه با افزایش پوشش ضخامت بتن روی میلگرد افزایش یافته است. در اکثر نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP میزان تنش پیدایش ترک خوردگی در مقایسه با نمونه‌های مشابه مسلح شده با میلگرد فولادی

مقدار بیشتری دارد. در کلیه نمونه‌های مسلح شده با هر دو نوع میلگرد GFRP پس از مرحله پیدایش ترک‌ها مرحله پایداری ترک به خوبی دیده می‌شود.

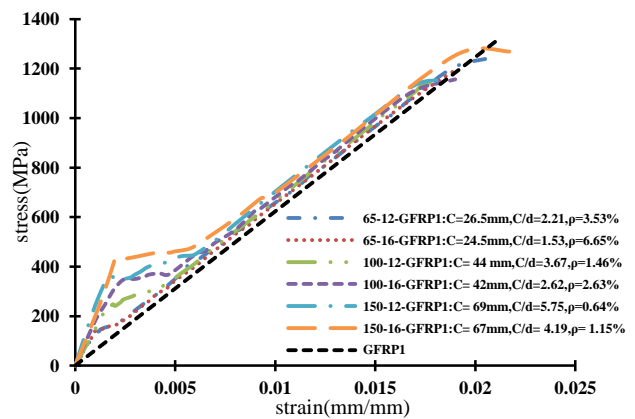


شکل (۱۰): نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP<sub>۲</sub>

درصد است. همچنین بررسی رفتار نمونه‌ها پس از مرحله ترک خوردگی نشان می‌دهد که در کلیه نمونه‌ها مرحله پایداری و بازشدگی ترک‌ها به خوبی اتفاق افتاده است. در نمونه‌ها با ضخامت پوشش بتنی کمتر (کاور کمتر) خصوصاً نمونه‌ها با قطر خارجی ۶۵ mm پیدایش ترک‌های متوالی با شیب کمتری سبب کاهش سختی نمونه شده است، در حالی که برای نمونه‌ها با قطر خارجی ۱۵۰ mm این کاهش سختی به دلیل پیدایش ترک‌های متوالی بیشتر است.

#### ۴-۲- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تنش-کرنش متوسط کششی نمونه‌های مورد آزمایش

بررسی نمودارهای تنش-کرنش ارائه شده در بخش قبل نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله نوع میلگرد تسلیح، درصد تسلیح نمونه و ضخامت پوشش بتن روی میلگرد تسلیح (کاور) از مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار نمونه‌های مورد آزمایش است. از این رو در این بخش برای



شکل (۹): نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP<sub>۱</sub>

در نمونه‌های مسلح شده با GFRP<sub>۲</sub> افزایش ضخامت پوشش بتنی از ۶۵ mm به ۱۰۰ و ۱۵۰ سبب شده است تا تنش پیدایش ترک آغازین به ترتیب در تنش‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ MPa اتفاق افتد. در واقع تنش پیدایش ترک آغازین با تغییر ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد به ترتیب ۳ و ۴ برابر حالتی می‌شود که ضخامت پوشش ۶۵ mm است. برای نمونه‌های مسلح شده با GFRP<sub>۱</sub> این میزان افزایش تنش ترک آغازین با تغییر ضخامت کاور به ترتیب از ۱۸۰ MPa به ۳۰۰ و ۴۲۰ می‌باشد. برای هر دو نوع میلگرد تسلیح تأثیر تغییر در قطر میلگرد بر میزان تنش ترک ناچیز بوده است و برای هر دو نمونه این میزان افزایش کمتر از ۱۰ درصد است.

#### ۵- تنش-کرنش کششی سهم بتن

در صورتی که کل نیروی کششی وارد بر نمونه T در نظر گرفته شود، رابطه تعادل زیر در هر مقطع برقرار می‌باشد:

$$T = F_s + F_c \quad (1)$$

در رابطه فوق  $F_s$  متوسط نیروی کششی سهم میلگرد می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_s = A_s E_s \epsilon_{sm} \quad (2)$$

$\epsilon_{sm}$  کرنش متوسط میلگرد در طول نمونه بتن مسلح بوده که مقدار آن هنگام آزمایش برای هر مقدار نیروی وارده T مشخص می‌شود.  $A_s$  و  $E_s$  به ترتیب سطح مقطع و ضریب ارتجاعی میلگرد می‌باشند.

متوسط نیروی کششی سهم بتن با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید:

کرنش متوسط میلگرد به دست می‌آید. کاربرد این رابطه در تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن آرمه به روش اجزای محدود با در نظر گرفتن مدل ترک پخش شده از اهمیت خاصی برخوردار است.

با استفاده از رابطه فوق می‌توان یک مدل سخت‌شدگی کششی (tension stiffening) منطبق بر رفتار واقعی، برای منحنی تنش-کرنش کششی یک المان بتن آرمه به دست آورد. منحنی تغییرات مقاومت کششی مؤثر سهم بتن ( $\sigma_{cm}$ ) بر حسب کرنش متوسط میلگرد ( $\epsilon_{sm}$ ) برای نمونه‌های آزمایش شده بر اساس روابط ارائه شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

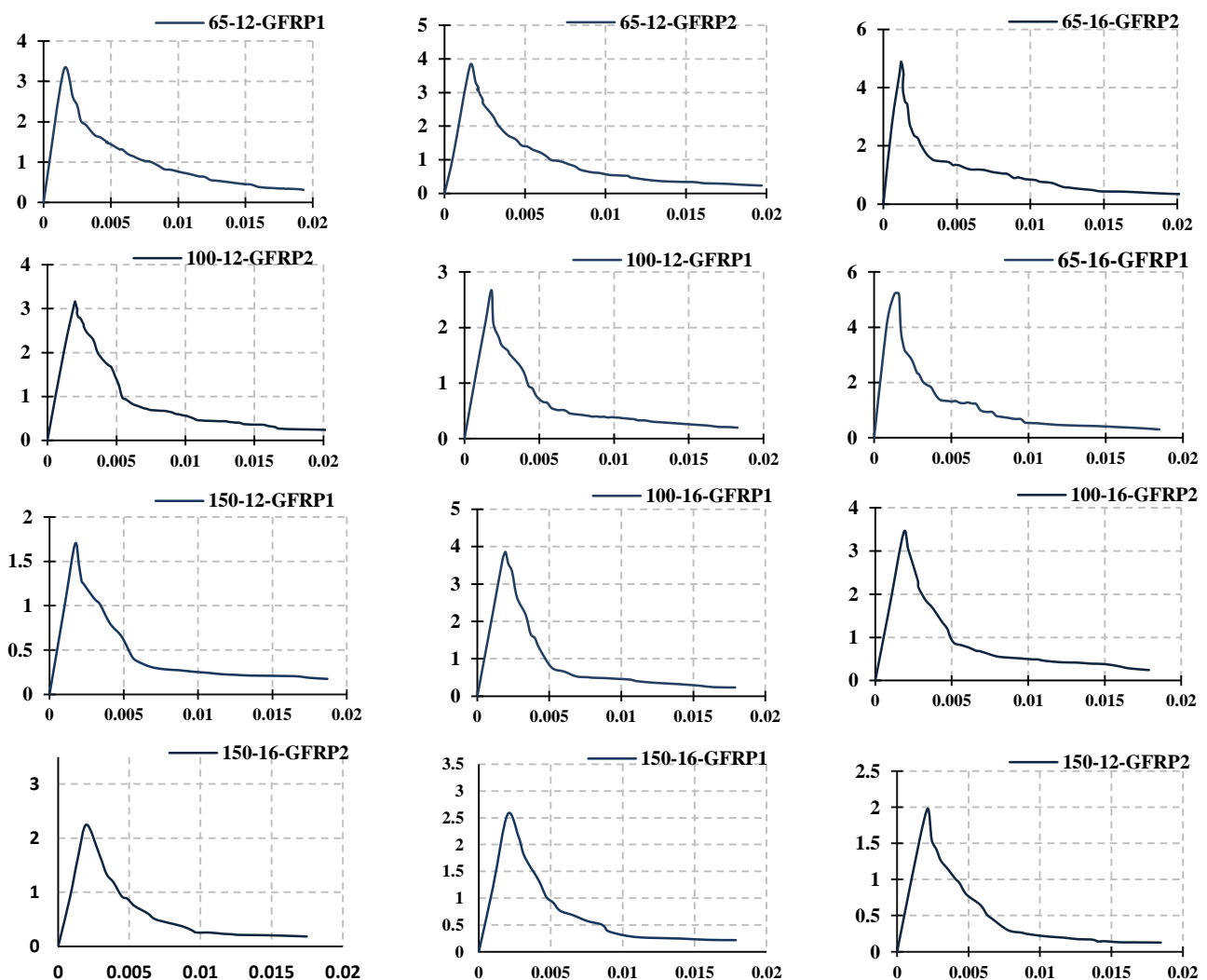
$$F_c = T - F_s \quad (3)$$

همچنین متوسط تنش کششی بتن در نمونه بتن مسلح با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{cm} = \frac{F_c}{A_c} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $A_c$  سطح مقطع خالص بتن ( $A_c = A_g - A_s$ ) است.

با استفاده از رابطه (۴) تغییرات متوسط تنش کششی بتن بر حسب



شکل (۱۱): منحنی‌های تنش-کرنش کششی سهم بتن برای نمونه‌های مختلف

(در کلیه نمودارهای بالا محور عمودی تنش (MPa) و محور افقی کرنش (mm/mm) است.)

مقدارهای نمودارهای ترسیم شده در شکل (۱۱) از اختلاف مقدار تنش در دو منحنی ارائه شده برای یک نمونه در شکل (۸) و بر

شکل (۱۲): شماتیک رفتار کششی بدست آمده برای بتن

در ناحیه اول رابطه بین تنش- کرنش خطی می باشد این ناحیه تا رسیدن تنش به مقاومت کششی بتن ادامه دارد.

جهت بدست آوردن مدل مناسب برای رفتار سخت شدگی کششی بتن فوق توانمند در ناحیه دوم در ابتدا منحنی تنش-کرنش کششی سهم بتن بدست آمده در بخش قبل را نرمالیزه شده است. برای این منظور در تمامی منحنی ها داده های محور کرنش را بر کرنش ترک خوردگی نمونه مورد نظر و محور تنش کششی را بر تنش ترک خوردگی نمونه تقسیم شده است تا نمودارهای بدون بعد حاصل شوند. تا قبل از مرحله ترک خوردگی یک رابطه خطی بین نسبت تنش ها و کرنش ها ارائه می شود. از آنجایی که رفتار کلیه نمونه ها پس از مرحله ترک خوردگی به صورت یک شاخه نزولی غیرخطی می باشد برای بدست آوردن بهترین رابطه متناسب با این رفتار از جعبه ابزار Fitting curve در نرم افزار متلب (MATLAB) استفاده شده است. تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش توسط جعبه ابزار معرفی شده در نرم افزار متلب، رابطه (۵) را به عنوان بهترین رابطه برای رفتار ناحیه بعد از ترک خوردگی در بتن فوق توانمند ارائه داده است.

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_t^{cr}} = \alpha \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^{cr}} \right)^{-\beta} \quad (5)$$

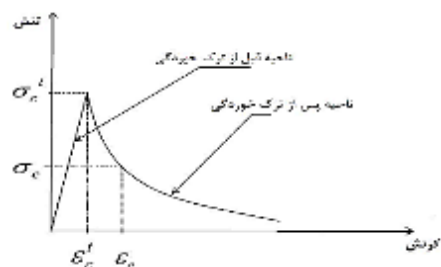
در این رابطه  $\sigma_t$  تنش کششی سهم بتن بعد از مرحله آغاز ترک خوردگی،  $\sigma_t^{cr}$  تنش کششی ترک خوردگی بتن،  $\varepsilon_t$  کرنش متناظر با  $\sigma_t$  و  $\varepsilon_t^{cr}$  کرنش ترک خوردگی می باشد. پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  متناسب با ویژگی های هندسی نمونه قابل محاسبه می باشند که در مورد شیوه بدست آوردن این پارامترها در بخش بعدی به تفصیل بحث می شود.

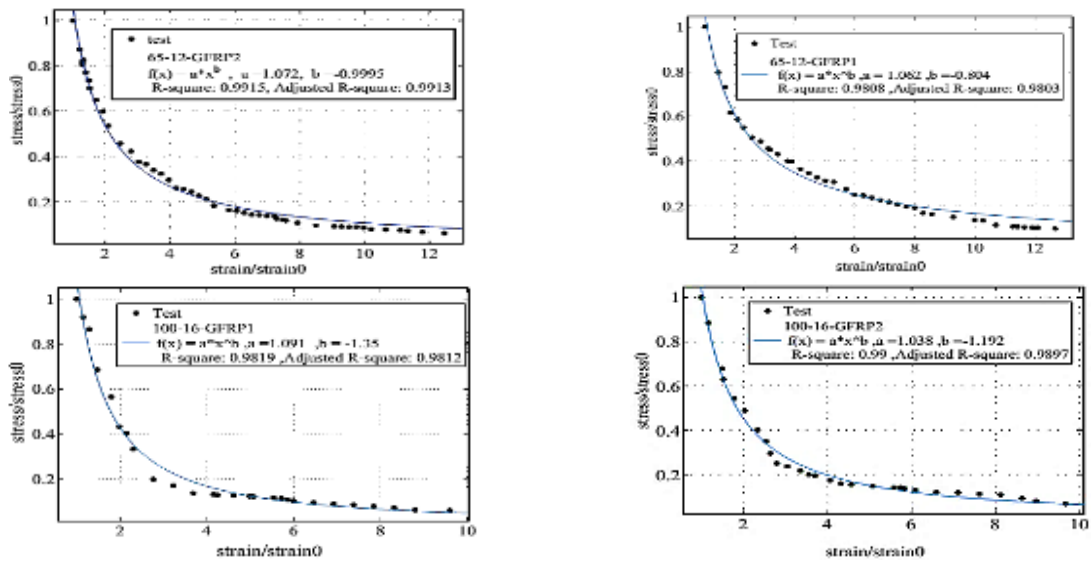
در شکل (۱۳) میزان همخوانی مدل بدست آمده توسط نرم افزار و نتایج حاصل از آزمایش برای تعدادی از نمونه ها آورده شده است. همچنین مقادیر پارامترهای بدست آمده در جدول (۵) ارائه شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود مجذور R (ضریب همپوشانی) داده ها با نمودار ارائه شده در تمامی نمونه ها بالای ۰/۹۷ می باشد که این معرف آن است که همپوشانی و نزدیکی بسیار خوبی بین مدل ارائه شده و نتایج حاصل از آزمایش وجود دارد.

اساس روابط (۱ - ۴) به دست آمده است. این منحنی ها نشان می دهد که برای تمامی نمونه ها تا قبل از پیدایش ترک تنش با یک رابطه خطی با کرنش افزایش می یابد و پس از مرحله ترک خوردگی به صورت یک شاخه غیرخطی نزولی کاهش می یابد، ناحیه خطی سهم بتن در تحمل کشش تا قبل از ترک خوردگی را نشان می دهد که حداکثر مقدار در این ناحیه در منحنی های شکل (۱۱) برای هر نمونه متناظر نقطه آغاز تغییر شیب در منحنی همان نمونه در شکل (۸) می باشد. مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه های مسلح شده با میلگرد GFRP نشان می دهد که میزان کاهش در شاخه نزولی برای نمونه های مسلح شده با میلگرد GFRP با شیب تندتر و به میزان بیشتری می باشد. در نمونه های مسلح شده با هر دو نوع تسلیح GFRP، افزایش قطر خارجی نمونه سبب شده است تا میزان سهم تنش کششی ترک خوردگی در نمونه ها کاهش یابد که دلیل این امر را می توان در افزایش سطح مقطع بتن که در تحمل نیروی کششی مؤثر است، دانست.

## ۶- ارائه مدل برای رفتار سخت شدگی کششی بتن فوق-توانمند

جهت تعیین سهم بتن اطراف میلگرد در تحمل کشش برای نمونه های مورد آزمایش با مشخص بودن رفتار میلگرد تسلیح به تنهایی، در کرنش های متناظر با کسر سهم نیروی قابل تحمل توسط میلگرد از مقدار نیروی قابل تحمل توسط نمونه کششی مسلح، مقدار نیروی کششی تحمل شده توسط بتن اطراف میلگرد بدست می آید. از تقسیم این نیرو بر سطح مقطع خالص بتن دور میلگرد، میزان تنش کششی تحمل شده بتن حاصل می شود. برای بدست آوردن سهم بتن در تحمل کشش باید اختلاف مقادیر منحنی نمونه و میلگرد تسلیح در نسبت  $A_{GFRP\ rebar}/A_{concrete}$  ضرب شود تا مقادیر متناظر برای منحنی سخت شدگی کششی حاصل شود. محاسبه تنش کششی قابل تحمل توسط بتن اطراف میلگرد برای نمونه های مختلف نشان می دهد که منحنی رفتار کششی بتن مطابق شکل (۱۲) شامل دو بخش می باشد که قسمت اول ناحیه قبل از ترک خوردگی و قسمت دوم آن ناحیه پس از ترک خوردگی معرفی می شود.





شکل (۱۳): میزان همخوانی مدل و نتایج آزمایش برای تعدادی از نمونه‌ها

سهم کششی بتن ( $\alpha, \beta$ )

بررسی عوامل مؤثر بر پارامترهای مدل ارائه شده برای رفتار سخت-شدگی کششی بتن فوق‌توانمند نشان می‌دهد که پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  با تغییر مشخصات هندسی نمونه‌ها و تغییر نوع میلگرد در آن‌ها تغییر کرده‌است. مقادیر موجود در جدول (۵) نشان می‌دهد که عوامل متعددی نظیر جنس میلگرد تسلیح، نسبت  $C/d$  و  $np$  بر مقادیر پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  تأثیرگذار است. از این رو برای بدست آوردن بهترین رابطه برای هر یک از پارامترهای شاخه نزولی (رابطه ۵) با توجه به عوامل مؤثر بر آنها از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شده‌است. با استفاده از نرم افزار SAS<sup>۶</sup> که یک نرم‌افزار تحلیل آماری می‌باشد برای پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  بهترین روابط (روابط ۶ و ۷) بر اساس پارامترهای تأثیرگذار بر آنها ارائه گردیده‌است.

$$\alpha = 0.65 - 12.65np + 0.035d - 0.017 \frac{C}{d} + 147.32 \frac{np}{d} \quad (۶)$$

$$\beta = 3.63 + 36.52np + 0.00035C^2 - 0.264d - 0.58 \frac{C}{d} - 285.37 \frac{np}{C} - 354.73 \frac{np}{d} \quad (۷)$$

روابط (۶ و ۷) بهترین روابط برای بدست آوردن پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  می‌باشد که میزان مجذور  $R^2$  برای این روابط به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۹ است.

۸- مقایسه مدل ارائه شده در این پژوهش با مدل‌های ارائه

جدول (۵): مقادیر پارامترهای  $\alpha, \beta$  و ضریب همپوشانی شاخه نزولی

نام نمونه	ضریب همپوشانی (R-square)	پارامتر $\beta$	پارامتر $\alpha$
۶۵-۱۲-GFRP۱	۰/۹۸۰۸	-۰/۸۰۴	۱/۰۶۲
۶۵-۱۲-GFRP۲	۰/۹۹۱۵	-۰/۹۹۹	۱/۰۷۲
۶۵-۱۶-GFRP۱	۰/۹۷۵۱	-۱/۱۲۵	۰/۹۰۳
۶۵-۱۶-GFRP۲	۰/۹۷۰۱	-۰/۸۷۸	۰/۸۹۷
۱۰۰-۱۲-GFRP۱	۰/۹۷۸۳	-۱/۱۳۳	۰/۹۳۹
۱۰۰-۱۲-GFRP۲	۰/۹۷۷۷	-۱/۰۵۱	۱/۱۵۷
۱۰۰-۱۶-GFRP۱	۰/۹۸۱۹	-۱/۳۵	۱/۰۹۱
۱۰۰-۱۶-GFRP۲	۰/۹۹۰۰	-۱/۱۹۲	۱/۰۳۸
۱۵۰-۱۲-GFRP۱	۰/۹۷۷۲	-۱/۰۲۵	۱/۰۱۷
۱۵۰-۱۲-GFRP۲	۰/۹۸۲۷	-۱/۲۶۷	۰/۹۹۶
۱۵۰-۱۶-GFRP۱	۰/۹۷۲۸	-۱/۱۶۴	۱/۱۰۱
۱۵۰-۱۶-GFRP۲	۰/۹۸۳۳	-۱/۱۹۴	۱/۰۶۵

۷- روابط پیشنهادی برای پارامترهای شاخه نزولی منحنی

شده توسط سایر محققان

برای مقایسه با مدل ارائه شده در این پژوهش ضرایب مربوط به بتن مقاومت بالا که تا مقاومت ۸۰MPa می باشد در نظر گرفته شده است.

کولینز و وکیبو برای ناحیه بعد از ترک خوردگی در بتن تحت کشش در نمونه های بتن مسلح رابطه زیر را ارائه داده اند که با مدل پیشنهادی در این پژوهش مقایسه می شود [۳۰]، [۳۱].

$$\sigma_c = \frac{f_t}{1 + \sqrt{500\varepsilon}} \quad (9)$$

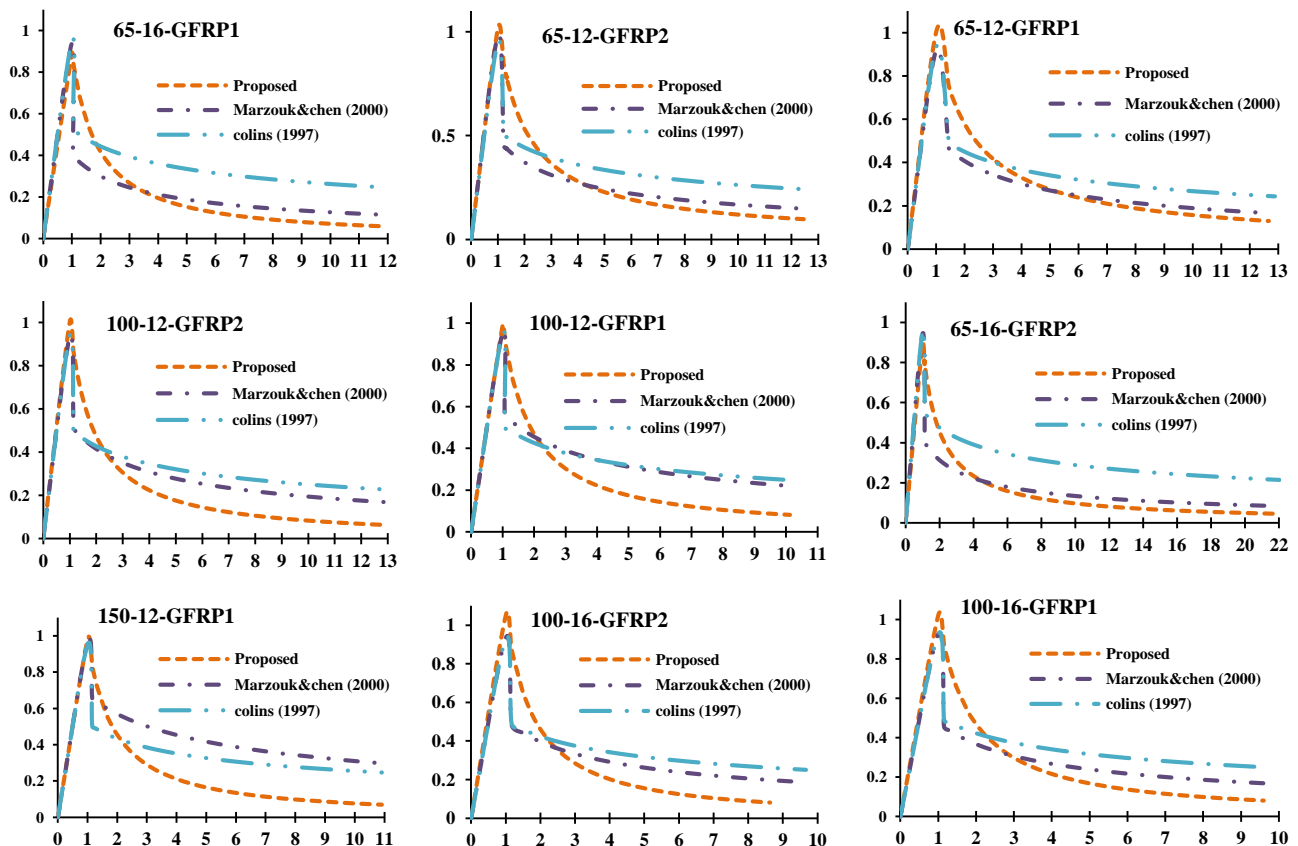
در این رابطه  $f_t$  تنش ترک خوردگی بتن و  $\varepsilon$  کرنش بتن بعد از ترک خوردگی می باشد.

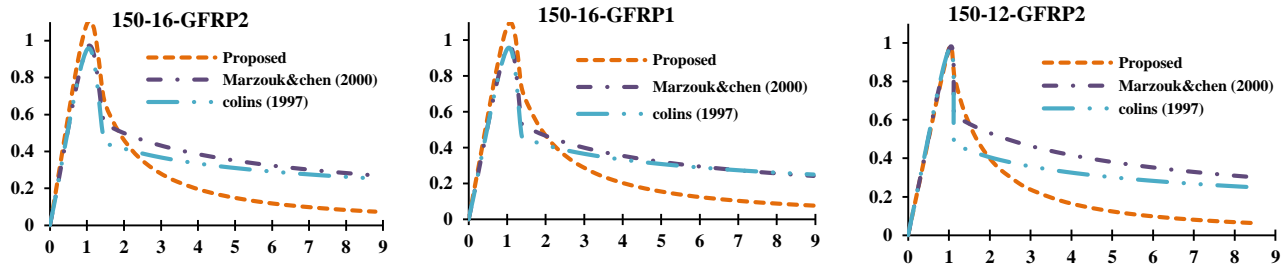
در شکل (۱۴) برای تمام نمونه های مورد بررسی در این پژوهش مدل پیشنهادی با مدل ارائه شده توسط مرزوک و چن و همچنین مدل کولینز و وکیبو بررسی و مقایسه شده است.

تاکنون برای پدیده سخت شدگی کششی بتن فوق توانمند هیچ مدلی ارائه نشده است اما محققان متعددی برای سخت شدگی کششی بتن با مقاومت معمولی و بتن با مقاومت بالا مدل های متعددی ارائه داده اند که به منظور مقایسه با مدل ارائه شده در این بخش از پژوهش به آن ها اشاره می شود.

مرزوک و چن [۲۰] برای ناحیه بعد از ترک برای بتن معمولی و بتن مقاومت بالا رابطه زیر را ارائه داده اند. در این رابطه  $\varepsilon_t$  کرنش کششی بتن،  $\varepsilon_{t0}$  کرنش کششی بتن در تنش ماکزیمم،  $\sigma_t^u$  تنش کششی حداکثر و ثابت های  $C_3$  و  $\beta$  برای بتن های معمولی ۰/۳۱، ۱/۷ و برای بتن مقاومت بالا ۰/۲۸ و ۱/۶۷ است.

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_t^u} = \left( \frac{\varepsilon_t / \varepsilon_{t0}}{\alpha \left( \varepsilon_t / \varepsilon_{t0} \right)^\beta + \varepsilon_t / \varepsilon_{t0}} \right) \quad \text{and} \quad \alpha = C_3 \sigma_t^u \quad (8)$$





شکل (۱۴): مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش و مدل های ارائه شده توسط سایر محققین

(در کلیه نمودارهای بالا محور قائم  $\sigma/\sigma_{cr}$  و نمودار افقی  $\epsilon/\epsilon_{cr}$  است.)

الیاف شیشه سبب شده است پس از مرحله ترک خوردگی پایداری ترک و بازشدگی ترک‌ها به خوبی اتفاق بیفتد. بررسی رفتار نمونه‌ها پس از پیدایش ترک‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌ها با ضخامت پوشش کاور کمتر با پیدایش ترک-های متوالی میزان روند کاهش سختی در نمودار تنش-کرنش کششی نمونه‌ها ملایم‌تر و کمتر است در حالی که در نمونه-هایی که ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد زیاد می‌باشد (این میزان شدت کاهش سختی به میزان ۲ تا ۲/۵ برابر بیشتر می‌باشد) مانند نمونه‌ها با قطر خارجی ۱۵۰ mm ایجاد ترک-های متوالی در نمونه‌ها سبب شده است تا روند کاهش سختی در نمودار تنش-کرنش نمونه با سرعت و شیب زیادی اتفاق افتد.

در نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP در کلیه نمونه‌ها در لحظه گسیختگی، کرنش نمونه برای هر دو نوع میلگرد ۱ و ۲ GFRP به هم نزدیک است اما تنش در لحظه گسیختگی در نمونه‌هایی که با میلگرد ۱ GFRP مسلح شده-اند به میزان ۸ تا ۱۰ درصد از تنش در لحظه گسیختگی در نمونه‌های مسلح شده با میلگرد ۲ GFRP بیشتر است.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش، رفتار کششی بتن فوق توانمند در اعضای بتن مسلح به دو مرحله قبل و بعد از ترک خوردگی تقسیم می‌شود که در مرحله قبل از ترک خوردگی رابطه خطی برقرار است ولی برای مرحله پس از ترک خوردگی رفتار به صورت یک شاخه نزولی غیرخطی است که در این پژوهش برای این شاخه رابطه مناسبی پیشنهاد شده است. برای بدست آوردن پارامترهای این رابطه نیز با توجه به عوامل مؤثر بر آنها با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره روابط مناسبی ارائه شده است.

در نمونه‌های مشابه افزایش درصد تسلیح باعث کاهش در میزان سختی اولیه نمونه شده است، هر چند میزان این کاهش ناچیز و حدود ۳ تا ۵ درصد است.

برای نمونه‌ها با قطر ۶۵ mm مسلح شده با میلگرد به قطر ۱۲ mm و ۱۶ mm از هر دو نوع میلگرد ۱ و ۲ GFRP

برای نمونه‌ها با قطر خارجی کم مثلاً قطر خارجی ۶۵ mm نزدیکی بسیار خوبی بین مدل ارائه شده و مدل سایر محققان می‌باشد ولی برای نمونه-های که قطر خارجی آنها ۱۵۰ mm است برای نمونه‌های مسلح شده با هر دو نوع میلگرد الیاف شیشه برای نسبت‌های کرنش بزرگتر از مدل ارائه شده توسط مرزوک و چن همچنین مدل کولینز و وکیو مقادیر دست بالا ارائه می‌دهند، دلیل این امر آن است که مدل‌های این محققان برای بتن با مقاومت معمولی یا مقاومت بالا ارائه شده است در حالی که این مدل برای بتن‌های فوق توانمند ارائه شده است و در نمونه‌ها با قطر خارجی ۱۵۰ mm تأثیر بتن بیشتر است و این امر سبب می‌شود تا به دلیل مقاومت بالای بتن با ایجاد ترک در بتن اطراف میلگرد افت و کاهش بیشتری در سهم کشش بتن ایجاد می‌کند.

به طور کلی از بررسی نمودارهای مقایسه‌ای مدل‌های مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده در این پژوهش به خوبی رفتار واقعی مصالح را ارائه می‌دهد.

## ۹- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر سخت‌شدگی کششی بتن فوق توانمند بر رفتار اعضای بتن مسلح با میلگرد GFRP مورد مطالعه قرار گرفته است. 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 در مرکز نمونه مسلح شده، انجام گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها سرعت جابجایی جک کششی ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده و میزان جابجایی‌ها و نیروهای وارد شده بر نمونه در هر لحظه ثبت شده است. بر اساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل شده است.

- با توجه به نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌های مربوط به اثر سخت‌شدگی کششی می‌توان نتیجه گرفت که روش آزمایشگاهی ارائه شده، مستقیماً اثر سخت‌شدگی کششی بتن فوق توانمند بر اعضای بتنی مسلح با میلگرد GFRP را ارزیابی می‌کند و نسبت به سایر روش‌های غیرمستقیم مناسب‌تر است.
- با توجه به مدول کشسانی پایین و مقاومت بالای میلگردهای



- University, Dept. of Civil Engineering, us. ۲۰۰۲
- [۳۱] Vecchio, F.; "The response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses", University of Toronto, Dept. of Civil Engineering, Toronto, ۱۹۸۲.
- [۳۲] Vecchio, F.J., Collins, M.P.; "Compression response of cracked reinforced concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. ۱۱۹(۱۲): p.p. ۳۵۹۰-۳۶۱۰, ۱۹۹۳.
- [۳۳] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "طراحی و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه - میثت نهم مقررات ملی ساختمان" مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۲
- [۲۸] soltanMohammadi, M.; "stiffening behavior modeling elements reinforced with FRP reinforced concrete in pure tension", Journal Sharif Civil Engineering, vol. ۲-۲۶(۲), p.p. ۱۱-۱۹, ۲۰۱۰.
- [۲۹] Stramandinoli, R.S.B., La Rovere, H.L.; "An efficient tension-stiffening model for nonlinear analysis of reinforced concrete members", Engineering Structures, vol. ۳۰(۷), p.p. ۲۰۶۹-۲۰۸۰, ۲۰۰۸.
- [۳۰] Tripathi, V.K.; "Standardization of Test Methods for Property Evaluation of FRP Bars", West Virginia

---

Tension-stiffening <sup>\</sup>  
 Glass Fiber Reinforced Polymer <sup>۲</sup>  
 Fiber Reinforced Polymer <sup>۲</sup>  
 Ultra high performance concrete <sup>ε</sup>  
 chemically pre stressed concrete <sup>°</sup>  
 Statistical Analysis System <sup>\</sup>  
 R-square <sup>۷</sup>