

اثر سخت‌کنندگی کششی در اعضای بتنی مسلح به صفحات بسپاری الیافی

سیده حسن پیرایش (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدرضا اصفهانی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر رفتار اعضای بتنی مسلح به صفحات بسپاری الیافی (FRP)، پدیده سخت‌کنندگی کششی^۱ است. این پدیده بر روی عرض و فاصله ترک‌ها و سختی عضو تحت کشش مؤثر است. برای بررسی دقیق اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر رفتار کششی صفحات FRP، نمونه‌های آزمایشگاهی بتنی با مقاومت‌های فشاری استوانه‌ای ۲۵ و ۴۰ مگاپاسکال که به وسیله ۲ یا ۴ لایه صفحات بسپاری مسلح شده با الیاف شیشه (GFRP) یا CFRP میانی با چسب به یکدیگر متصل شدند، تحت کشش خالص قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش آزمایشگاهی مورد استفاده با دقت زیادی اثر سخت‌کنندگی کششی را به نمایش می‌گذارد. مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش این نمونه‌ها با منحنی تنش - کرنش صفحات FRP، نشان می‌دهد که کاهش نسبت سطح مقطع صفحات بسپاری الیافی به سطح مقطع بتن باعث افزایش قابل توجه اثر سخت‌کنندگی کششی بتن در عضو می‌شود. به طوری که اثر سخت‌کنندگی کششی (برحسب اختلاف کرنش بین نمونه بتنی مسلح به صفحات FRP با نمونه صفحات FRP در مرحله ترک خوردگی پایدار) در نمونه‌های دارای دو لایه FRP بین ۲/۵ تا ۳/۷۵ برابر نمونه‌های دارای چهار لایه FRP است. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ مگاپاسکال به ۴۰ مگاپاسکال سبب افزایش نسبی اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر رفتار کششی صفحات FRP می‌شود. از سوی دیگر، میزان اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر رفتار کششی صفحات GFRP از میزان اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر رفتار کششی صفحات CFRP بیشتر است. در مورد فاصله و نحوه توزیع ترک‌های ایجاد شده روی نمونه‌های بتنی نیز بحث شده است.

s.m.pirayesh@gmail.com
esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن مسلح، سخت‌کنندگی کششی، FRP، ترک‌خوردگی.

مقدمه

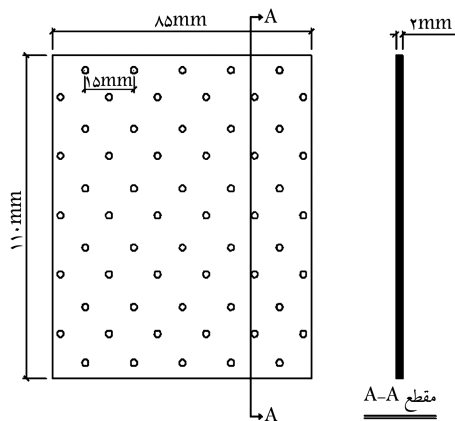
بتن اطراف ماده‌ی مسلح‌کننده، سختی عضو بیشتر از ماده‌ی مسلح‌کننده‌ی عریان است. با ایجاد و افزایش ترک‌ها پاسخ عضو به سمت پاسخ ماده‌ی مسلح‌کننده‌ی عریان میل می‌کند. با پایداری شدن ترک‌های اولیه، بار تحمل‌شده توسط بتن با توسعه‌ی ترک‌های داخلی ثانویه‌ی که بین ترک‌های اولیه ایجاد می‌شوند، کاهش می‌یابد.^[۱-۵] اثرات ترک‌خوردگی و ماده‌ی مسلح‌کننده بر سختی عضو را می‌توان به صورت‌های مختلف در نظر گرفت. بیشترین تأثیر ترک‌خوردگی و ماده‌ی مسلح‌کننده در سختی مؤثر عضو است.^[۳]

آیین‌نامه‌های CEB-FIB و fib^[۶] مدل سخت‌کنندگی کششی اساساً یکسانی پیشنهاد می‌کنند. در مدل ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ی fib^[۷] از رابطه‌ی نیرو - کرنش عضو بتن مسلح به فولاد استفاده شده است (شکل ۱).

در گذشته تحقیقات فراوانی روی اثر سخت‌کنندگی کششی اعضای بتنی مسلح به فولاد کششی انجام شده است؛ نتایج حاصل از این تحقیقات بیان‌گر میزان قابل

با توجه به استفاده‌ی رو به گسترش صفحات بسپاری مسلح‌شده با الیاف (FRP) و افزایش کاربرد این صفحات در مقاوم‌سازی اعضای بتنی، شناخت صحیح رفتار این مواد در اتصال با بتن ضرورت دارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار صفحات FRP متصل به بتن، اثر سخت‌کنندگی کششی است. سخت‌کنندگی کششی پدیده‌ی است که به بحث در مورد تأثیر بتن بر سختی ماده‌ی مسلح‌کننده می‌پردازد.^[۱] این پدیده، تنش‌ها و کرنش‌های ماده‌ی مسلح‌کننده متصل به بتن را کاهش می‌دهد و باعث کم‌تر شدن کرنش میانگین ماده‌ی مسلح‌کننده متصل به بتن در مقایسه با کرنش ماده‌ی مسلح‌کننده‌ی فاقد بتن می‌شود. سخت‌کنندگی کششی بر عرض و فاصله ترک‌ها و سختی عضو تحت کشش یا خمش تأثیر می‌گذارد.^[۱] در عضو تحت کشش بتن مسلح، ابتدا که بتن ترک نخورده است، به دلیل وجود

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۴/۸، اصلاحیه ۱۳۸۸/۱۱/۲۷، پذیرش ۱۳۸۹/۳/۱.



شکل ۳. مشخصات صفحات فولادی انتقال دهنده نیرو.

همچنین ورق‌های فولادی ۲ میلی‌متری که قبلاً بر روی سطح‌شان حفره‌هایی ایجاد شده بود، در بالا و پایین صفحات بسیاری مسلح شده با الیافی که از دو سر قطعه‌های بتنی بیرون آمده بود، قرار گرفت. برای این که صفحات فولادی در راستای صفحات FRP که در میان دو قطعه بتنی محصور شده بود قرار بگیرد، از قطعات چوبی به ضخامت ۳۸ میلی‌متر در زیر آن‌ها استفاده شد. کمینه زمان لازم برای عمل‌آوری چسب و استحکام نمونه‌های ساخته شده، یک هفته در نظر گرفته شد. بنابراین ۱۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی به روش فوق ساخته شد.

همچنین شش نمونه‌ی آزمایشگاهی دیگر مطابق شرایط قبل، اما بدون وجود قطعات بتنی، ساخته شد تا با مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش آن‌ها و منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های بتنی، میزان تأثیر بتن بر رفتار بسپارهای مسلح شده با الیاف تحت کشش یک‌جهته (تأثیر سخت‌کنندگی کششی بین بتن و صفحات بسپاری مسلح شده با الیاف) مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است.

روش آزمایش

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری چسب، به‌کمک دستگاه کشش (شکل ۱) تحت کشش قرار گرفتند. سرعت جابه‌جایی فک‌های دستگاه کشش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. میزان جابه‌جایی فک‌ها و بار وارد بر نمونه در هر لحظه ثبت شد. برای جلوگیری از لغزش در منحنی، مقدار ۲۰۰۰ نیوتن بار اولیه بر نمونه‌ها وارد شد و سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری اصلی مورد آزمایش قرار گرفتند. در لحظات مختلف بارگذاری از نمونه و صفحه‌ی نمایشگر عکس‌برداری شد تا در زمان تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گیرد.

چنان‌که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در نمونه‌ی CA۲۵-۴، در بار ۱۷۲۶۰ نیوتن (شکل ۴ الف) اولین ترک‌ها ایجاد شد و در بار ۹۴۱۰۰ نیوتن، با جدا شدن بخشی از قطعات بتنی از نمونه (شکل ۴ ج)، بارگذاری متوقف شد.

نتایج آزمایش‌ها

نمودارهای تنش - کرنش

در شکل ۵ نمودار تنش - کرنش ۴ نمونه صفحات FRP نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود می‌توان گفت تفاوتی بین شیب منحنی نمونه‌های دارای

جدول ۱. مشخصات مکانیکی الیاف (گزارش شده توسط کارخانه‌ی سازنده).

نام تجاری الیاف	الیاف کربن	الیاف شیشه
	SikaWrap-۲۰۰ C	SikaWrap-۴۳۰ G
مدول کشسانی (MPa)	۲۳۰/۰۰۰	۷۶/۰۰۰
مقاومت کششی (MPa)	۳/۹۰۰	۲/۳۰۰
کرنش نهایی (%)	۱/۵	۲/۸
ضخامت هر لایه (mm)	۰/۱۱	۰/۱۷
جرم واحد سطح (g/m ²)	۲۰۰	۴۴۵
جرم واحد حجم (g/cm ³)	۱/۸	۲/۵۶

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف آزمایش شده.

نام تجاری الیاف	الیاف کربن	الیاف شیشه
	SikaWrap-۲۰۰ C	SikaWrap-۴۳۰ G
مدول کشسانی (MPa)	۲۳۳/۳۰۰	۷۸/۵۰۰
مقاومت کششی (MPa)	۲/۵۶۰	۱/۶۰۰
کرنش نهایی (%)	۱/۱۵	۲/۲

جدول ۳. مشخصات مکانیکی چسب (گزارش شده توسط کارخانه سازنده).

نام تجاری	Sikadur-۳۰۰
مدول کشسانی با شرایط عمل‌آوری ۷ روزه در دمای (MPa) ۲۳ °C	۳۵۰۰
مقاومت کششی (MPa)	۴۵

رزین و سخت‌کننده در ظرف مناسب، این مواد به‌مدت ۵ دقیقه به‌وسیله‌ی دور کم مخلوط‌کننده با یکدیگر مخلوط شدند. مشخصات مکانیکی چسب گزارش شده توسط کارخانه نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

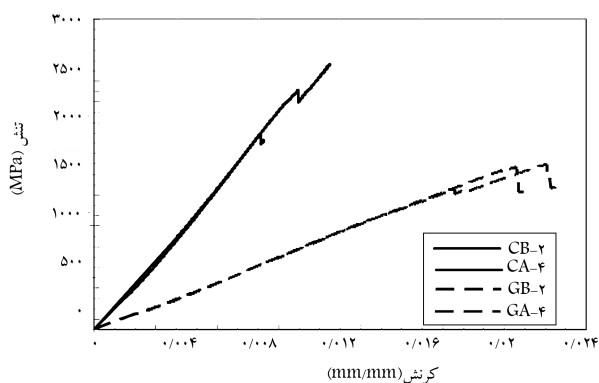
برای انتقال نیروی کششی از فک دستگاه کشش به صفحات بسپاری مسلح شده با الیاف، از ورق‌های فولادی استفاده شد. لذا با توجه به استاندارد ASTM D۳۰۳۹ و ابعاد فک‌های دستگاه کشش، از ورق‌های فولادی به‌طول ۱۱۰، عرض ۸۵ و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد و نیز جهت تأمین اصطکاک کافی بین ورق‌های فولادی و صفحات بسپاری مسلح شده با الیاف، علاوه بر رزین، به‌کمک سوراخ‌کن حفره‌هایی به‌قطر ۲، عمق ۱ و فواصل تقریبی ۱۵ میلی‌متر مطابق شکل ۳ روی سطح داخلی ورق‌های فولادی ایجاد شد. بار از طریق فکین دستگاه و ورق‌های نازک فولادی که توسط رزین محکم به صفحات FRP چسبیده بودند به آن صفحات منتقل شدند.

برای ساخت هر نمونه‌ی آزمایشگاهی (شامل دو قطعه‌ی منشوری بتنی و صفحات FRP)، ابتدا سطح هر دو قطعه بتنی به‌کمک قلم‌مو آغشته به چسب شد. سپس یک لایه الیاف بر روی یکی از قطعات بتنی قرار گرفت و به‌کمک غلتک، هوای محبوس بین الیاف و بتن خارج شد. یک لایه چسب روی الیاف قرار داده شد و لایه‌ی الیاف بعدی روی لایه‌ی قبل قرار گرفت و بعد هوای محبوس بین دو لایه‌ی الیاف خارج شد. همین عمل برای ساخت نمونه‌ی با ۴ لایه‌ی الیاف تکرار شد. سپس قطعه‌ی بتنی دوم که قبلاً آغشته به چسب شده بود، روی لایه‌ی الیاف قرار گرفت.

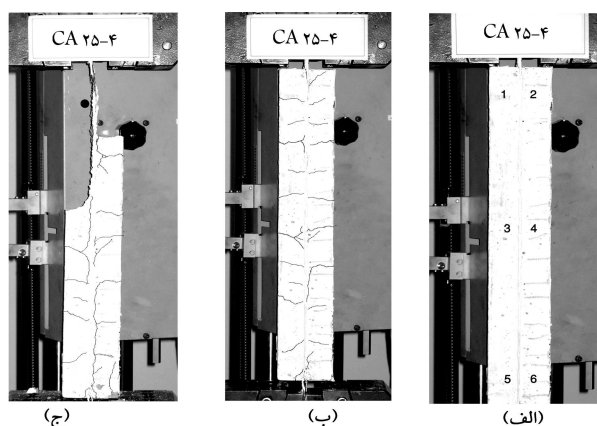
جدول ۴. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.

شماره	نام نمونه	f'_c (MPa)	نوع الیاف	تعداد لایه‌های الیاف	عرض الیاف b_{FRP} (mm)	ضخامت الیاف t_{FRP} (mm)	درصد مسلح‌شدگی ρ_{FRP} نمونه
۱	CA۲۵-۲	۲۵	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	۰٫۲۷۵
۲	CB۲۵-۲	۲۵	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	۰٫۲۷۵
۳	GA۲۵-۲	۲۵	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	۰٫۴۲۵
۴	GB۲۵-۲	۲۵	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	۰٫۴۲۵
۵	CA۲۵-۴	۲۵	کربن	۴	۸۰	۰٫۴۴	۰٫۵۵
۶	CB۲۵-۴	۲۵	کربن	۴	۸۰	۰٫۴۴	۰٫۵۵
۷	GA۲۵-۴	۲۵	شیشه	۴	۸۰	۰٫۶۸	۰٫۸۵
۸	GB۲۵-۴	۲۵	شیشه	۴	۸۰	۰٫۶۸	۰٫۸۵
۹	CA۴۰-۲	۴۰	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	۰٫۲۷۵
۱۰	CB۴۰-۲	۴۰	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	۰٫۲۷۵
۱۱	GA۴۰-۲	۴۰	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	۰٫۴۲۵
۱۲	GB۴۰-۲	۴۰	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	۰٫۴۲۵
۱۳	CA۴۰-۴	۴۰	کربن	۴	۸۰	۰٫۴۴	۰٫۵۵
۱۴	CB۴۰-۴	۴۰	کربن	۴	۸۰	۰٫۴۴	۰٫۵۵
۱۵	GA۴۰-۴	۴۰	شیشه	۴	۸۰	۰٫۶۸	۰٫۸۵
۱۶	GB۴۰-۴	۴۰	شیشه	۴	۸۰	۰٫۶۸	۰٫۸۵
۱۷	CA-۲	-	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	-
۱۸	CB-۲	-	کربن	۲	۸۰	۰٫۲۲	-
۱۹	GA-۲	-	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	-
۲۰	GB-۲	-	شیشه	۲	۸۰	۰٫۳۴	-
۲۱	CA-۴	-	کربن	۴	۸۰	۰٫۴۴	-
۲۲	GA-۴	-	شیشه	۴	۸۰	۰٫۶۸	-

یادآور می‌شود f'_c مقاومت فشاری استوانه‌یی بتن، b_{FRP} عرض صفحات FRP به‌کار رفته در ساخت نمونه‌ها، t_{FRP} ضخامت الیاف، بدون در نظر گرفتن چسب، و ρ_{FRP} نسبت سطح مقطع صفحات FRP به سطح مقطع بتن ($\rho_{FRP} = A_{FRP}/A_c$) است.



شکل ۵. منحنی‌های تنش - کرنش صفحات FRP.



شکل ۴. مراحل بارگذاری نمونه‌ی CA۲۵-۴.

گیگا پاسکال و مدول کشسانی صفحات GFRP برابر با ۷۸٫۵ گیگاپاسکال به دست می‌آید که به مقادیر گزارش شده توسط کارخانه‌ی سازنده بسیار نزدیک است.

در شکل‌های ۶ تا ۹ نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی ارائه شده است. با کمی دقت در نمودارهای مذکور می‌توان به این نکته پی برد که شیب منحنی صفحات FRP داخل بتن در مراحل اولیه‌ی بارگذاری بیشتر از شیب

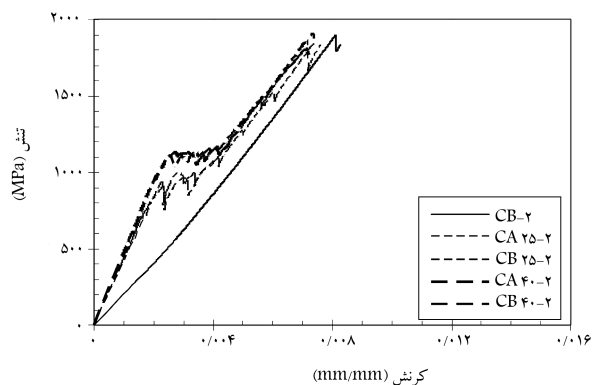
۲ لایه و ۴ لایه صفحات CFRP وجود ندارد. همچنین شیب منحنی در نمونه‌های دارای ۲ لایه و ۴ لایه صفحات GFRP نیز با یکدیگر برابر است؛ بنابراین می‌توان مدول کشسانی صفحات CFRP و GFRP را تعیین کرد. از سوی دیگر، سختی بیشتر صفحات CFRP نسبت به صفحات GFRP در شکل ۵ قابل مشاهده است. با توجه به نمودارها، مدول کشسانی صفحات CFRP برابر با ۲۳۳٫۳

منحنی صفحات FRP است. پس از شکل‌گیری ترک‌های اولیه و ورود به مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار، با وجود این که شیب منحنی تنش - کرنش صفحات FRP داخل بتن تقریباً برابر با شیب منحنی تنش - کرنش صفحات FRP می‌شود، کرنش کم‌تر این نمونه‌ها در یک تنش مشخص نسبت به صفحات FRP نشان‌دهنده‌ی وجود اثرات سخت‌کنندگی کششی است. با توجه به مقایسه‌ی تمام نمونه‌ها در شکل‌های ۶ تا ۹ می‌توان این نکته‌ی عمومی را مطرح کرد که تا قبل از ترک‌خوردگی اولیه، سختی نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده از بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال بیشتر است؛ این موضوع با توجه به شیب بیشتر منحنی تنش - کرنش آن‌ها نسبت به یکدیگر قابل مشاهده است.

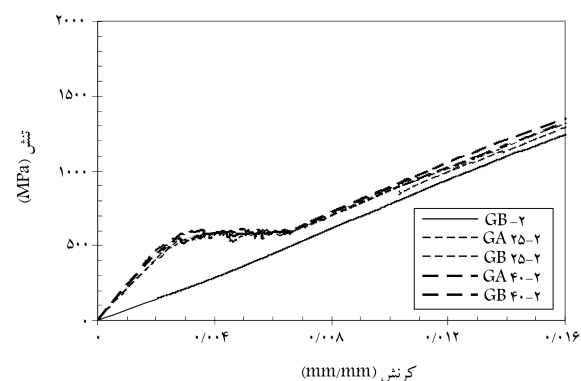
بررسی میزان اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر صفحات FRP

در شکل ۱۰ نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های CA۲۵-۲، CB۲۵-۲ و CB-۲ نشان داده شده است. با کمی دقت در این شکل مشاهده می‌شود که به خوبی می‌توان یک منحنی سه‌خطی را جایگزین منحنی‌های تنش - کرنش صفحات FRP دارای بتن کرد. بنابراین، برای دو نمونه با مشخصات یکسان و با نام XYM-N از یک منحنی سه‌خطی با نام XM-N استفاده می‌شود. برای مثال، منحنی C۲۵-۲ جایگزین منحنی‌های CA۲۵-۲ و CB۲۵-۲ می‌شود.

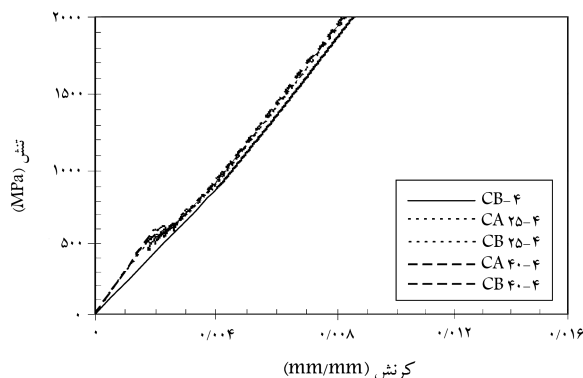
برای رسم هر منحنی سه‌خطی، از چهار نقطه استفاده شده است: نقطه‌ی اول مبدأ مختصات و نقاط دوم، سوم و چهارم به ترتیب میانگین نقاط ابتدای مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها، ابتدای مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار و انتهای مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار در دو منحنی XAM-N و XBM-N هستند. حال به کمک منحنی‌های سه‌خطی جایگزین، بهتر می‌توان اثر سخت‌کنندگی کششی را بررسی کرد. در شکل ۱۱ تمامی منحنی‌های تنش - کرنش سه‌خطی جایگزین نمونه‌های آزمایشگاهی در یک نمودار نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، میزان تنش ترک‌خوردگی در نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال کمی بیشتر از نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال است که به دلیل مقاومت کششی بیشتر بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال نسبت به بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال است. همچنین، تا قبل از مرحله‌ی ترک‌خوردگی بتن، مدول کشسانی منحنی C۲۵-۲ (مربوط به بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و دو لایه CFRP)،



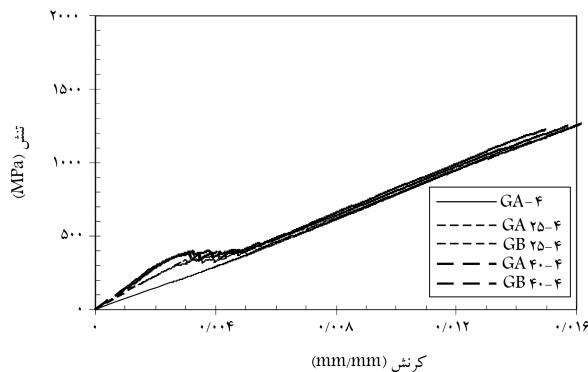
شکل ۶. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های دارای دو لایه CFRP



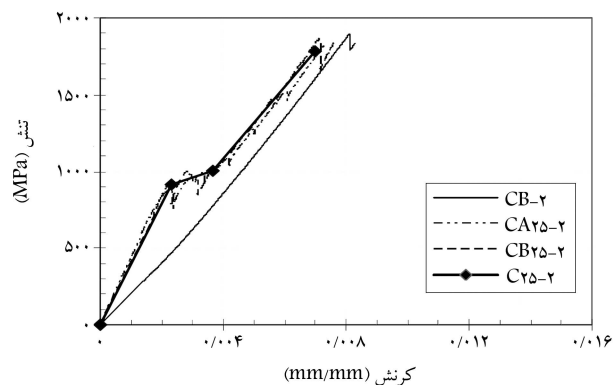
شکل ۷. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های دارای دو لایه GFRP



شکل ۸. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های دارای چهار لایه CFRP



شکل ۹. منحنی تنش - کرنش نمونه‌های دارای چهار لایه GFRP



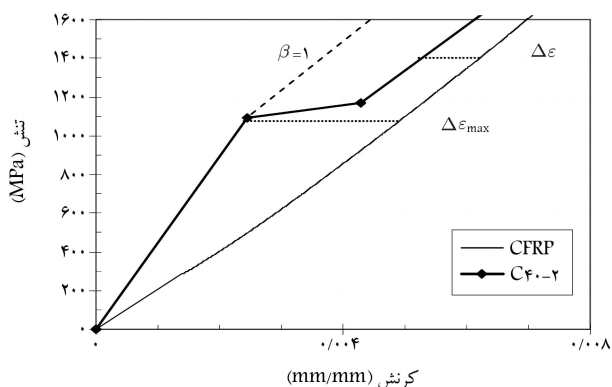
شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی سه‌خطی C۲۵-۲ با منحنی تنش - کرنش نمونه‌های CA۲۵-۲ و CB۲۵-۲.

کرنش نمونه صفحات FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی $\Delta\epsilon_{max}$ بیشترین میزان اختلاف بین کرنش نمونه صفحات FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی، ϵ_{FRP} کرنش نمونه دارای صفحات FRP، و ϵ_m کرنش میانگین نمونه بتنی است. افزایش اختلاف بین کرنش نمونه دارای صفحات FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی ($\Delta\epsilon$)، افزایش سخت‌کنندگی کششی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان نشان دهنده میزان اثر سخت‌کنندگی کششی عضو استفاده کرد.

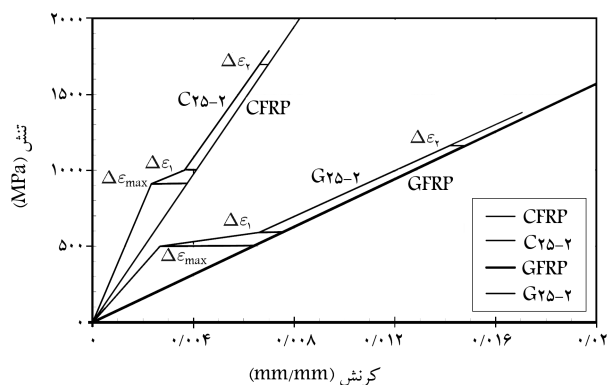
مقدار ضریب سخت‌کنندگی کششی (β) در ابتدای مرحله شکل‌گیری ترک مقدار ضریب سخت‌کنندگی کششی (β) در ابتدای مرحله شکل‌گیری ترک $(\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_{max})$ برابر با ۱ است، و چنانچه اختلاف بین کرنش نمونه دارای صفحات FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی به صفر نزدیک شود، مقدار β برابر با صفر می‌شود ($\beta = 0$). در واقع ضریب سخت‌کنندگی کششی نشان می‌دهد که در هر میزان بارگذاری، چه مقدار از اثر سخت‌کنندگی کششی موجود در ابتدای مرحله شکل‌گیری ترک‌ها در عضو تحت کشش باقی مانده است.

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۶، مقدار ضریب سخت‌کنندگی کششی در ابتدای مرحله ترک‌خوردگی پایدار (β_1) و نیز در تنش 170° مگاپاسکال برای نمونه‌های بتنی مسلح شده با صفحات CFRP و تنش 120° مگاپاسکال برای نمونه‌های بتنی مسلح شده با صفحات GFRP (β_2) به دست آمده است که مقادیر آن در جدول ۵ ملاحظه می‌شود.

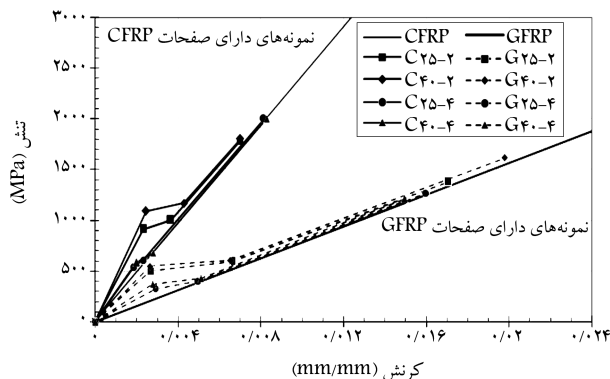
در جدول ۵ مدول کشسانی مؤثر نمونه بتنی مسلح شده با صفحات FRP در مرحله ترک‌خورده، E_{eff} مدول کشسانی صفحات FRP به دست آمده از آزمایش‌های کششی، $\Delta\epsilon_1$ درصد اختلاف بین کرنش نمونه دارای صفحات



شکل ۱۲. معرفی $\Delta\epsilon$ ، $\Delta\epsilon_{max}$ و β .



شکل ۱۳. میزان اثر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های $G25-2$ و $C25-2$ در مرحله ترک‌خوردگی پایدار.



شکل ۱۱. مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش سه خطی جایگزین با منحنی تنش-کرنش صفحات CFRP و GFRP.

390877 مگا پاسکال است که این مقدار $67/5$ درصد بیشتر از مدول کشسانی صفحات CFRP (233300 مگاپاسکال) است. این نکته نشان‌دهنده میزان بالای سخت‌کنندگی کششی تا قبل از مرحله ترک‌خوردگی بتن است. همچنین مدول کشسانی منحنی $C40-2$ (مربوط به بتن با مقاومت 25 مگاپاسکال و دو لایه CFRP) تا قبل از مرحله ترک‌خوردگی بتن، 444902 مگاپاسکال است که $90/6$ درصد از مدول کشسانی صفحات CFRP (233300 مگاپاسکال) بیشتر است. اما مدول کشسانی نمونه‌های بتنی دارای ۴ لایه صفحات CFRP (نمونه‌های $C40-4$ و $C25-4$) در مرحله قبل از ترک‌خوردگی تفاوت کم‌تری با مدول کشسانی صفحات CFRP داشته و تقریباً برابر با 284000 مگاپاسکال است که $21/7$ درصد از مدول کشسانی صفحات CFRP بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت مسلح‌شدگی صفحات CFRP (ρ_{CFRP}) به کاهش اثر سخت‌کنندگی می‌انجامد.

در مورد صفحات GFRP، تا قبل از مرحله ترک‌خوردگی بتن، مدول کشسانی منحنی $G25-2$ ، 187439 مگاپاسکال است که این مقدار $114/2$ درصد بیشتر از مدول کشسانی صفحات GFRP است (شکل ۱۱)؛ این نکته نشان‌دهنده میزان بالای سخت‌کنندگی کششی تا قبل از مرحله ترک‌خوردگی بتن است. همچنین مدول کشسانی منحنی $G40-2$ تا قبل از مرحله ترک‌خوردگی بتن معادل 207598 مگاپاسکال است که $137/2$ درصد از مدول کشسانی صفحات GFRP بیشتر است. اما مدول کشسانی منحنی $G25-4$ در مرحله قبل از ترک‌خوردگی برابر با 111623 مگاپاسکال است که $42/2$ درصد از مدول کشسانی صفحات GFRP بیشتر است؛ مدول کشسانی منحنی $G40-4$ نیز در مرحله قبل از ترک‌خوردگی برابر با 133365 مگاپاسکال است که $69/9$ درصد از مدول کشسانی صفحات GFRP بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت مسلح‌شدگی صفحات GFRP (ρ_{GFRP}) باعث کاهش اثر سخت‌کنندگی می‌شود. از سوی دیگر، تأثیر بیشتر بتن بر روی مدول کشسانی صفحات GFRP نسبت به صفحات CFRP می‌تواند به دلیل مدول کشسانی کم‌تر GFRP نسبت به CFRP باشد که باعث اثرگذاری بیشتر بتن بر روی صفحات GFRP شده است.

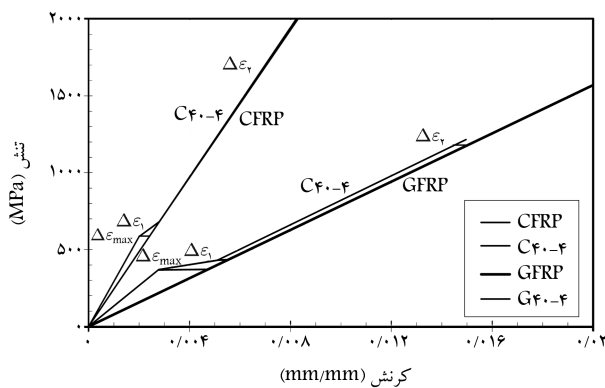
تمام نمونه‌ها پس از گسترش ترک‌خوردگی در طول نمونه وارد مرحله ترک‌خوردگی پایدار می‌شوند. برای بررسی میزان اثر سخت‌کنندگی کششی باقی‌مانده در مرحله ترک‌خوردگی پایدار، از پارامترهای $\Delta\epsilon$ و β و طبق روابط ۱ استفاده می‌شود: [۱]

$$\beta = \Delta\epsilon / \Delta\epsilon_{max}, \quad \Delta\epsilon = \epsilon_{FRP} - \epsilon_m \quad (1)$$

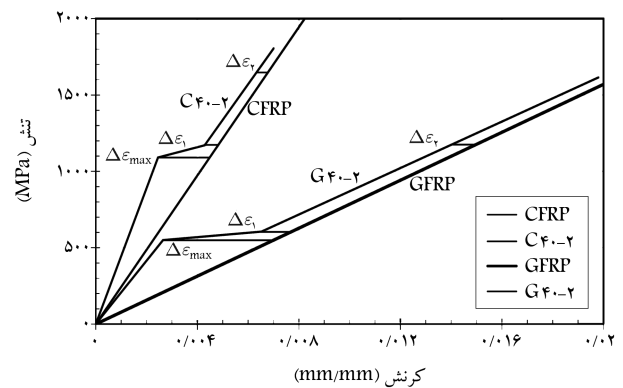
که در آن (با توجه به شکل ۱۲)، β ضریب سخت‌کنندگی کششی، $\Delta\epsilon$ اختلاف بین

جدول ۵. میزان تأثیر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های بتنی.

نام نمونه‌ی جایگزین	E_{eff} (MPa)	E_{FRP} (MPa)	E_{eff}/E_{FRP}	$\Delta\varepsilon_1$ (%)	$\Delta\varepsilon_2$ (%)	$\Delta\varepsilon_{max}$ (%)	(β_1)	(β_2)	ρ_{FRP} (%)
C25-2	390877	232300	1.675	0.45	0.33	0.142	0.316	0.232	0.275
C40-2	444902	232300	1.906	0.64	0.40	0.198	0.323	0.202	0.275
C25-4	284105	232300	1.217	0.12	0.1	0.038	0.315	0.263	0.55
C40-4	284422	232300	1.219	0.17	0.13	0.051	0.323	0.255	0.55
G25-2	187439	78500	2.142	0.85	0.69	0.358	0.237	0.193	0.425
G40-2	207598	78500	2.372	0.119	0.80	0.419	0.284	0.190	0.425
G25-4	111623	78500	1.422	0.25	0.20	0.113	0.221	0.177	0.85
G40-4	133365	78500	1.699	0.43	0.31	0.19	0.236	0.163	0.85



شکل ۱۶. میزان اثر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های C40-4 و G40-4 در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.

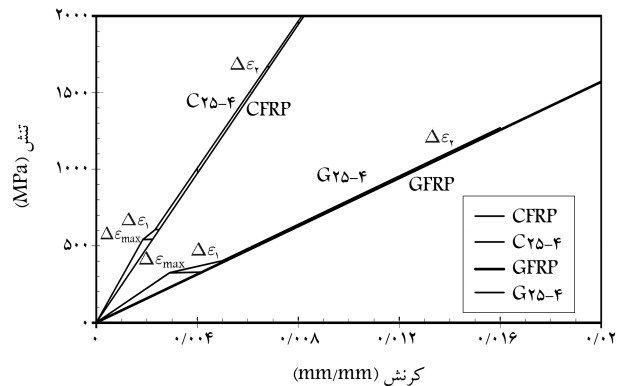


شکل ۱۴. میزان اثر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های C40-2 و G40-2 در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.

الف) در تمامی نمونه‌های بتنی اثر سخت‌کنندگی کششی وجود دارد؛

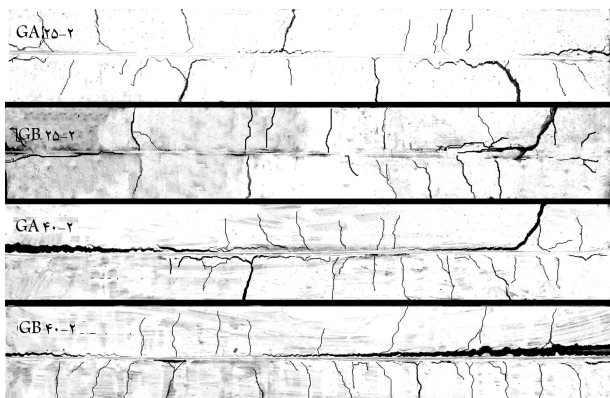
ب) تا قبل از مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها (مرحله‌ی ترک‌نخورده) نسبت E_{eff}/E_{FRP} بیان‌گر میزان اثر سخت‌کنندگی کششی است. چنان‌که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار E_{eff}/E_{FRP} مربوط به نمونه‌ی G40-2، و کم‌ترین آن مربوط به نمونه‌ی C25-4 است. میزان E_{eff}/E_{FRP} در نمونه‌های بتنی دارای صفحات مسلح GFRP بیشتر از نمونه‌های بتنی مشابهی است که با صفحات CFRP مسلح شده‌اند. علت این امر می‌تواند سختی کم‌تر صفحات GFRP نسبت به صفحات CFRP باشد که باعث افزایش تأثیر بتن بر صفحات GFRP شده است. از سوی دیگر میزان E_{eff}/E_{FRP} در نمونه‌های بتنی دارای بتن با مقاومت فشاری 40 مگاپاسکال کمی بیشتر از نمونه‌های ساخته‌شده با بتن معمولی است؛ این میزان تأثیر در افزایش سخت‌کنندگی کششی در مقایسه با سایر عوامل قابل چشم‌پوشی است. همچنین می‌توان گفت E_{eff}/E_{FRP} به میزان قابل توجهی به درصد مسلح‌شدگی نمونه‌های بتنی بستگی دارد و با افزایش ρ_{FRP} ، نسبت E_{eff}/E_{FRP} به میزان زیادی کاهش می‌یابد.

ج) پارامتر $\Delta\varepsilon_{max}$ به‌عنوان بیشترین مقدار اختلاف ایجادشده بین کرنش نمونه‌ی بتنی و نمونه‌ی دارای صفحات FRP نشان‌گر میزان تأثیر سخت‌کنندگی کششی ناشی از پیوستگی بین بتن و صفحات FRP است. در واقع $\Delta\varepsilon_{max}$ زمانی رخ می‌دهد که مقدار تنش کششی تحمل شده در بتن به بیشترین مقدار خود

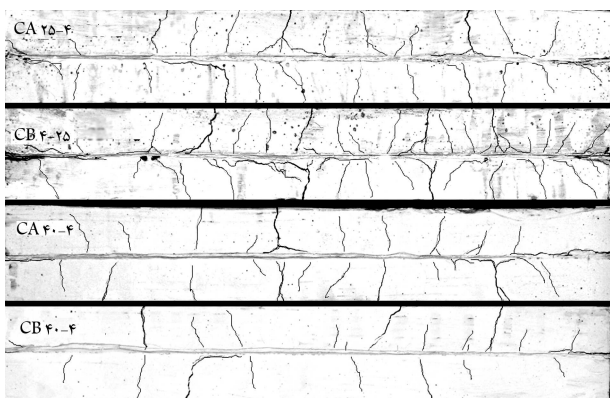


شکل ۱۵. میزان اثر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های C25-4 و G25-4 در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.

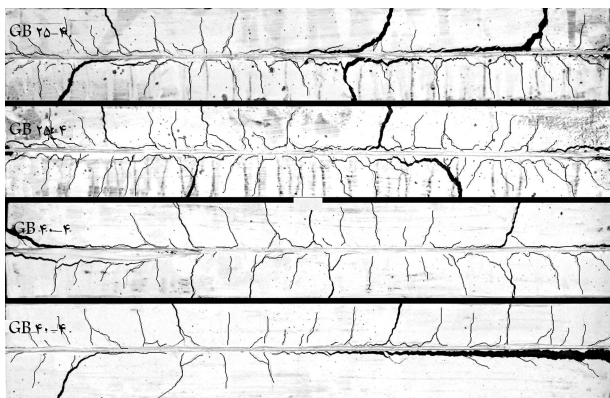
FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی در تنش معادل با شروع مرحله‌ی ترک‌خوردگی، $\Delta\varepsilon_2$ درصد اختلاف بین کرنش نمونه دارای صفحات FRP و کرنش میانگین نمونه بتنی در تنش 170 مگاپاسکال برای نمونه‌های بتنی مسلح شده با صفحات CFRP و در تنش 120 مگاپاسکال برای نمونه‌های بتنی مسلح شده با صفحات GFRP است. با توجه به مقادیر موجود در جدول 5 میزان اثر سخت‌کنندگی کششی در نمونه‌های آزمایشگاهی چنین توصیف می‌شود:



شکل ۱۸. مقایسه‌ی ترک‌های موجود در نمونه‌های بتنی دارای دو لایه از صفحات GFRP در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی ترک‌های موجود در نمونه‌های بتنی دارای ۴ لایه از صفحات CFRP در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی ترک‌های موجود در نمونه‌های بتنی دارای ۴ لایه از صفحات GFRP در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.

عرض ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات CFRP است. به همین صورت تعداد ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات GFRP بیشتر از تعداد ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات CFRP است. بنابراین افزایش تعداد ترک‌ها و به دنبال آن، کاهش فواصل ترک در نمونه‌های دارای صفحات GFRP در مقایسه با نمونه‌های دارای صفحات CFRP باعث افت بیشتر میزان اثر سخت‌کنندگی کششی در این نمونه‌ها، در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار شده است که با مقایسه‌ی مقادیر β_2 موجود در جدول ۵ قابل مشاهده است. البته یادآور می‌شود که در کرنش

رسیده و اولین ترک شکل می‌گیرد. در این حالت، بیشترین مقدار $\Delta\varepsilon_{max}$ و در واقع بیشترین مقدار اثر سخت‌کنندگی کششی مربوط به نمونه‌های بتنی دارای صفحات GFRP است که در این جا نیز، علت، سختی کم تر صفحات GFRP نسبت به صفحات CFRP و در نتیجه تأثیر بیشتر بتن بر روی صفحات GFRP است. همچنین به دلیل سختی کششی بیشتر نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال، این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال، $\Delta\varepsilon_{max}$ بیشتری دارند. با توجه به مقادیر $\Delta\varepsilon_{max}$ دیده می‌شود که افزایش نسبت مسلح‌شدگی باعث کاهش شدید $\Delta\varepsilon_{max}$ شده است.

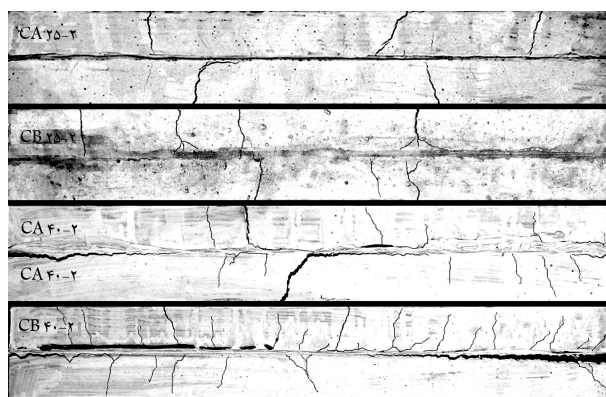
(د) $\Delta\varepsilon_1$ نشان‌گر میزان اثر سخت‌کنندگی کششی باقی‌مانده در ابتدای مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار است. مقادیر $\Delta\varepsilon_1$ نیز در نمونه‌های بتنی مسلح‌شده با صفحات GFRP بیشتر از نمونه‌های مسلح‌شده با صفحات CFRP است. مقاومت بتن تأثیر اندکی بر مقدار $\Delta\varepsilon_1$ دارد؛ همچنین افزایش ρ_{GFRP} باعث کاهش قابل توجه $\Delta\varepsilon_1$ و در نتیجه اثر سخت‌کنندگی کششی در این مرحله شده است.

(ه) $\Delta\varepsilon_2$ نشان‌گر میزان اثر سخت‌کنندگی کششی باقی‌مانده در تنش ۱۷۰۰ مگاپاسکال برای نمونه‌های دارای صفحات CFRP و تنش ۱۲۰۰ مگاپاسکال در نمونه‌های دارای صفحات GFRP است. بنابراین با مقایسه‌ی مقادیر $\Delta\varepsilon_2$ و $\Delta\varepsilon_1$ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد ترک‌ها در طول مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار، مقدار سخت‌کنندگی موجود در نمونه تا حدودی کاهش می‌یابد.

(و) مقایسه‌ی مقادیر β_1 نشان می‌دهد که اگرچه در شروع مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار، اثر سخت‌کنندگی کششی نمونه‌های بتنی دارای صفحات GFRP نسبت به نمونه‌های دارای صفحات CFRP بیشتر است، به دلیل کرنش بیشتر نمونه‌های دارای صفحات GFRP در طول مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها، میزان کاهش اثر سخت‌کنندگی در پایان مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها در نمونه‌های دارای صفحات GFRP، بیشتر از نمونه‌های بتنی مسلح‌شده با صفحات CFRP است.

تحلیل ترک‌ها

در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ ترک‌های موجود در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار، یعنی کرنش میانگین ۰/۰۰۷ برای نمونه‌های دارای صفحات CFRP و کرنش میانگین ۰/۰۱۴ برای نمونه‌های دارای صفحات GFRP، نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود عرض ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات GFRP بیشتر از



شکل ۱۷. مقایسه‌ی ترک‌های موجود در نمونه‌های بتنی دارای دو لایه از صفحات CFRP در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار.

دارای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال کمی بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال است که این میزان افزایش سخت‌کنندگی کششی در مقایسه با سایر عوامل قابل ملاحظه نیست.

- نسبت E_{eff}/E_{FRP} به میزان قابل توجهی وابسته به درصد مسلح‌شدگی نمونه‌های بتنی است و با افزایش ρ_{FRP} ، نسبت E_{eff}/E_{FRP} به شدت کاهش می‌یابد.
- پارامتر $\Delta\varepsilon_{max}$ به عنوان بیشترین مقدار اختلاف ایجاد شده بین کرنش نمونهی بتنی و صفحات FRP به خوبی نشان‌گر میزان تأثیر سخت‌کنندگی کششی ناشی از پیوستگی بین بتن و صفحات FRP است. در این حالت، بیشترین مقدار $\Delta\varepsilon_{max}$ و در واقع بیشترین مقدار اثر سخت‌کنندگی کششی مربوط به نمونه‌های بتنی دارای صفحات GFRP است که در این جا نیز، علت سختی کم تر صفحات GFRP نسبت به صفحات CFRP و در نتیجه تأثیر بیشتر بتن بر روی صفحات GFRP است. به دلیل سختی کششی بیشتر نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال، این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال، $\Delta\varepsilon_{max}$ بیشتری دارند.
- در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار یعنی کرنش میانگین ۰/۰۷ برای نمونه‌های دارای صفحات CFRP و کرنش میانگین ۰/۱۴ برای نمونه‌های دارای صفحات GFRP، تعداد ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات GFRP بیشتر از نمونه‌های دارای صفحات CFRP است. بنابراین افزایش تعداد ترک‌ها و به تبع آن، کاهش فواصل ترک در نمونه‌های دارای صفحات GFRP در مقایسه با نمونه‌های دارای صفحات CFRP باعث افت بیشتر میزان اثر سخت‌کنندگی کششی در این نمونه‌ها، در مرحله‌ی ترک‌خوردگی پایدار شده است که با مقایسه‌ی مقادیر β_1 قابل مشاهده است.
- تعداد ترک‌ها در نمونه‌های دارای ۴ لایه صفحات FRP بیشتر از تعداد ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای ۲ لایه صفحات FRP است و این موضوع نیز علاوه بر آن که باعث کاهش فواصل بین ترک‌ها می‌شود، سبب کاهش چشم‌گیر سخت‌کنندگی کششی در نمونه‌های دارای ۴ لایه صفحات FRP نسبت به نمونه‌های دارای ۲ لایه صفحات FRP نیز می‌شود.

برابر، در نمونه‌های دارای صفحات GFRP تعداد ترک‌های کم تر با عرض بیشتر -- نسبت به ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای صفحات CFRP -- مشاهده شد. از سوی دیگر می‌توان مشاهده کرد که تعداد ترک‌ها در نمونه‌های دارای ۴ لایه صفحات FRP بیشتر از تعداد ترک‌های موجود در نمونه‌های دارای ۲ لایه صفحات FRP است. این موضوع نیز علاوه بر آن که باعث کاهش فواصل بین ترک‌ها می‌شود، سبب کاهش چشم‌گیر سخت‌کنندگی کششی در نمونه‌های دارای ۴ لایه صفحات FRP نسبت به نمونه‌های دارای ۲ لایه صفحات FRP می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر سخت‌کنندگی کششی بتن بر رفتار کششی صفحات بسیاری مسلح شده با الیاف (FRP) مورد مطالعه قرار گرفت. تحقیق شامل آزمایش کششی بر روی ۱۶ نمونه‌ی بتنی مسلح شده با صفحات FRP و ۶ نمونه صفحات FRP بود. سرعت جابه‌جایی فک‌های دستگاه کشش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و میزان جابه‌جایی فک‌ها و بار وارد بر نمونه در هر لحظه ثبت شد. براساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، نتایج زیر به دست آمد:

- با توجه به نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌های مربوط به اثر سخت‌کنندگی کششی می‌توان نتیجه گرفت که روش آزمایشگاهی ارائه شده، مستقیماً اثر سخت‌کنندگی اعضای بتنی تقویت شده با صفحات FRP را ارزیابی می‌کند و نسبت به سایر روش‌های غیر مستقیم مناسب تر است.
- تا قبل از مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها، نسبت E_{eff}/E_{FRP} ، تحلیل خوبی از میزان اثر سخت‌کنندگی کششی ارائه می‌دهد. میزان E_{eff}/E_{FRP} در نمونه‌های بتنی دارای صفحات GFRP بیشتر از نمونه‌های بتنی مشابهی است که با صفحات CFRP مسلح شده‌اند. این امر را می‌توان ناشی از سختی کم تر صفحات GFRP نسبت به صفحات CFRP دانست که باعث افزایش تأثیر بتن بر صفحات GFRP شده است.
- میزان E_{eff}/E_{FRP} تا قبل از مرحله‌ی شکل‌گیری ترک‌ها در نمونه‌های بتنی

پانویس

1. tension stiffening

منابع

1. Kaklauskas, G. and Ghaboussi, J. "Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **127**(1), pp. 64-73 (January 2001).
2. Bischoff, P.H. "Tension stiffening and cracking of steel fiber reinforced concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **15**(2), pp. 174-182 (2003).
3. Bischoff, P.H. "Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars", *Journal of Structural Engineering*, **131**(5), pp. 752-767 (May 2005).
4. Bischoff, P.H. "Effects of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **28**(3), pp. 363-374 (2001).
5. Goto, Y. "Cracks formed in concrete around deformed tension bars", *ACI J.*, **68**(4), pp. 244-251 (1971).
6. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 1990 for Concrete Structures*, Comité Euro- International du Béton and Fédération Internationale de la Précontrainte, Thomas Telford, London (1993).
7. fib1999a, *Structural Concrete, Textbook on Behavior, Design and Performance, Bulletin 1*, Federation interna-

- tionale du beton, Lausanne, Switzerland, p. 224 (1999).
8. Gilbert, R.I. and Warner, R.F. "Tension stiffening in reinforced concrete slabs", *J. Struct. Div., ASCE*, **104**(12), pp. 1885-1900 (1978).
 9. Clark, L.A. and Speirs, D.M. "Tension stiffening in reinforced concrete beams and slabs under short-term load", Tech. Rep. No. 42.521, Cement and Concrete Association, London (1978).
 10. Abrishami, H.H. and Mitchell, D. "Influence of steel fibers on tension stiffening", *ACI Struct. J.*, **94**(6) pp. 769-776 (1997).
 11. Al-Sunna, R.; Pilakoutas, K.; Waldron, P. and Al-Hadeed, T. "Tension stiffening in GFRP reinforced concrete beams", Springer, pp. 711-718 (2006).
 12. Nayal, R. and Rasheed, H.A. "Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars" *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **18** pp. 831-841 (Nov./Dec. 2006).
 13. Ebead, U.A. and Marzouk, H. "Tension-stiffening model for FRP-strengthened RC concrete two-way slabs", *Materials and Structures*, **38**, pp. 193-200 (March 2005).
 14. Saliba Al-Sunna R.A., *Deflection Behavior of FRP Reinforced Concrete Flexural Members*, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Sheffield (June 2006).
 15. Ferracuti, B. and Savoia, M. "Tension-stiffening law for FRP- reinforced concrete elements under service loadings", International Institute for FRP in Construction (2005).
 16. Ceroni, F.; Pecce, M. and Matthys, Y. "Tension stiffening of reinforced concrete ties strengthened with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, **8**(1), pp. 22-32 (Jan./Feb. 2004).
 17. Pecce, M. and Ceroni, F. "Modeling of tension-stiffening behavior of reinforced concrete ties strengthened with fiber reinforced plastic sheets", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, **8**(6), pp. 510-518 (Nov./Dec. 2004).
 18. Sato, Y. and Vecchio, F.J. "Tension stiffening and crack formation in reinforced concrete members with fiber-reinforced polymer sheets", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **129**(6), pp. 717-724 (June 2003).