

بررسی اثر الیاف میکرو و ماکرو بر پارامتر چقرمگی شکست بتن در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار در وضعیت‌های بارگذاری متقارن، پادمقارن و ترکیبی

مقاله علمی - پژوهشی

بهروز شیرگیر*، استادیار، گروه راه و ترابری- عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
حمید گرجی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
حامد روح الامینی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shirgir@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۲۵۶-۲۴۳

چکیده

در طول چند دهه‌ی گذشته، انواع مختلفی از الیاف به صورت وسیع، جهت مسلح کردن بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به خواص بتن مسلح شده الیافی، تولید و کاربرد الیاف در کشورهای صنعتی جهان از طیف وسیعی برخوردار شده و در حال حاضر انواع الیاف با مشخصات فنی و موارد کاربرد گوناگون به صورت صنعتی تولید انبوه می‌گردد. با در نظر گیری ضرورت توسعه تولید و استفاده از تکنولوژی بتن الیافی، در این مطالعه، با توجه به تنوع الیاف از لحاظ جنس، شکل، اندازه و ... به بررسی تاثیر الیاف فلزی و مصنوعی (پلی پروپیلن) به صورت میکرو و ماکرو، به یکی از مهم‌ترین پارامترهای شکست بتن یعنی چقرمگی شکست در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار در ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر در ۵۰۰ میلی‌متر در وضعیت‌های بارگذاری به صورت متقارن (I)، پادمقارن (II) و نیز حالت ترکیبی (I/II) به صورت متقارن-پادمقارن پرداخته شد. همچنین با توجه به عملکرد مطلوب الیاف میکرو بر افزایش مدول کشیدگی بتن و همچنین عملکرد مطلوب الیاف ماکرو در بهبود شکل پذیری و افزایش قدرت باربری بتن در ناحیه پس-ترک خوردگی بتن، با استفاده به صورت همزمان از این دو نوع الیاف، اثر برهم‌نهی آنها بر مشخصات شکست بتن در مودهای مختلف بارگذاری (مود کششی، مود برشی و مود ترکیبی) مورد ارزیابی قرار گرفت. از این رو با استفاده از الیاف‌های فلزی و مصنوعی به صورت میکرو و ماکرو با درصد‌های حجمی به ترتیب ۰/۲ درصد و ۰/۵ درصد، به بررسی احتمال شکست نمونه‌ها پرداخته شد. با استفاده از توزیع آماری دوپارامتری ویبول مشاهده گردید که استفاده از الیاف هم به صورت میکرو و هم به صورت ماکرو اثر مطلوبی در احتمال شکست نمونه‌ها بر اساس چقرمگی شکست بدست آمده حاصل از نتایج آزمایشگاهی آنها دارد.

واژه‌های کلیدی: الیاف پلی پروپیلن، الیاف فلزی، الیاف مصنوعی، توزیع آماری دوپارامتری ویبول، مکانیک شکست

۱-مقدمه

پژوهش‌های انجام شده در مورد رویه‌های بتنی نشان می‌دهد که مکانیک شکست یک ابزار مناسب و توانا برای بررسی رفتار شکست بتن و همچنین تحلیل شرایط شروع رشد ترک در آن

معمولاً ترک‌های مختلفی در بتن و به خصوص در روسازی‌های بتنی ایجاد می‌شود که از متداول‌ترین آنها ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی و ترک‌های انعکاسی است.

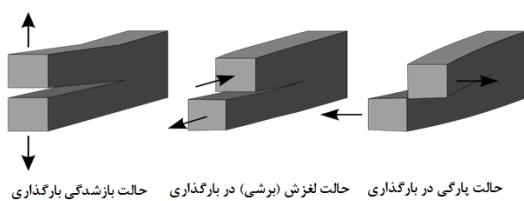
(Huang, 2004)

(ج) مود III بارگذاری یا مود پارگی (لغزش و جوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است) بروز می‌کنند. (شکل ۱)

در مکانیک شکست، ضریب شدت تنش به عنوان پارامتر اساسی در تشریح رفتار شکست و معیار شروع و گسترش ترک در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$k_i = \sigma \sqrt{\pi a} Y_i \quad i=I, II, III \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، K_i ضریب شدت تنش در هر یک از مودهای I، II و III بر حسب $(MPa\sqrt{m})$ ، σ تنش اعمال شده روی نمونه بر حسب (MPa)، Y_i ضریب هندسی (بی بعد)، a طول ترک برای ترک‌های لبه‌ای و یا نصف طول ترک برای ترک‌های داخلی (برحسب متر) است. ضریب شدت تنش به ازای تنشی که منجر به شکست نمونه شود، ضریب شکست بحرانی یا اصطلاحاً چقرمگی شکست نامیده می‌شود. با توجه به این‌که چقرمگی شکست یک خاصیت وابسته به جنس ماده است، بنابراین در یک مخلوط بتن غلتکی هرچه مقدار آن بیشتر باشد، قابلیت آن در برابر رشد ترک افزایش یافته و بهتر می‌تواند در برابر بارهای وارده مقاومت کند. (Anderson, 2005)



شکل ۱. انواع حالت‌های شکست بر اساس مبانی مکانیک شکست

است. (Mojiri, 2010). علم مکانیک شکست یکی از مباحث مهم مهندسی است. هدف از تبیین و بسط مبانی مکانیک شکست، تخمین برخی خصوصیات ماده و سازه نظیر مقاومت باقی‌مانده، حداکثر عمق ترک قابل تحمل (عمق بحرانی ترک) در بار بهره‌برداری، زمان حداقل برای رسیدن عمق ترک به عمق بحرانی، بازه‌های زمانی حداکثر که سازه باید در آنها بررسی شود و مواردی از این قبیل است. مکانیک شکست علم رفتار قطعات ترک‌دار است و مقاومت قطعات ترک‌دار را بررسی می‌کند. بنابراین مکانیک شکست، ابزاری قدرتمند برای مطالعه ایجاد ترک و انتشار آن در مواد مختلف است. استفاده از این روش برای بررسی مکانیزم شکست در مخلوط‌های آسفالتی از اوایل دهه ۱۹۶۰ شروع شد و از دهه ۱۹۹۰ به نحو گسترده‌تری در تحقیقات محققین مورد استفاده قرار گرفته است.

(Mojiri, 2010)

به طور کلی در اجسام، بسته به نوع بارگذاری به صورت:

(الف) مود I بارگذاری یا مود کششی (جسم ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار می‌گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند)

(ب) مود II بارگذاری یا مود برشی (لغزش و جوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و عمود بر جبهه ترک است)

۲- استفاده از الیاف

تحقیقات بسیاری بر روی اثر استفاده از انواع مختلف الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن، انجام شده است. بیش‌ترین اثر استفاده از الیاف ماکرو را می‌توان بر روی چقرمگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن بیان کرد.

(Brandt, 2008)

با افزایش میزان الیاف مصرفی در بتن، کارایی بتن به دلیل ایجاد یک شبکه الیافی در مخلوط بتن و جلوگیری از حرکت و روانی

بتن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به دلیل سطح مخصوص بالای الیاف، مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از ملات سیمان به آن چسبیده که باعث افزایش ویسکوزیته بتن می‌گردد. (Yin, 2015) بنابراین کارایی به‌عنوان یک عامل مؤثر در تعیین میزان مصرف الیاف با توجه به نوع و مشخصات ظاهری الیاف است. بدین منظور از افزودنی‌های کاهنده آب و روان‌کننده می‌توان جهت بهبود کارایی بتن الیافی استفاده نمود. (Hasan, 2011)

به صورت مختلط هر دو ی آنها ظرفیت‌های فردی خود را در مقاومت و چقرمگی حفظ نمودند.

۳-الیاف مختلط

مطالعات بسیاری در رابطه با استفاده از الیاف فلزی و مصنوعی در بتن صورت گرفته‌است. کاربرد قابل توجه دیگر وقتی است که این دو الیاف در بتن ترکیب می‌شوند که تحت عنوان بتن مسلح شده به الیاف ترکیبی^۴ (HFRC) عنوان می‌شود. هدف از ترکیب انواع مختلف الیاف می‌تواند بهبود عملکرد بتن و یا جنبه‌های اقتصادی باشد. (Bentur, 2007)

برخی از این مزایا عبارتند از:

۱. بهبود مقاومت ترک اولیه و بنابراین مقاومت نهایی بتن با بکارگیری الیاف سخت و پرمقاومت (الیاف نازک کوتاه) به منظور اتصال میکرو-ترک‌ها مطابق با شکل (۳الف).
۲. بهبود ظرفیت کرنش و چقرمگی در ارتباط با رفتار پس-ترک‌خوردگی با بکارگیری الیاف انعطاف پذیر و شکل‌پذیر (الیاف ضخیم بلند) به منظور اتصال و پل زدن ماکرو-ترک‌ها مطابق با شکل (۳ب).
۳. تهیه بتنی که هر دو عملکرد را تامین نماید. در حقیقت یک الیاف می‌تواند در حفظ مقاومت و نیز چقرمگی بتن در بعد از شکست و دیگری در عملکرد انتقال بار کارساز باشد.
۴. رسیدن به سطح بالایی از هم‌افزایی بین الیاف میکرو و ماکرو. در حقیقت ترکیب دو الیاف مختلف به طور هم‌زمان در یک بتن نهایتاً منجر به رفتار کششی بهتر بعد از ترک در مقایسه با بتنی است که فقط حاوی یک الیاف است. همچنین با بکارگیری الیاف ماکرو در آن به چقرمگی و مقاومت پس از ترک خوردگی کمک می‌کند.
۵. کاهش هزینه نگهداری بتن با استفاده از بهبود مشخصه‌های مکانیکی و دوام به دلیل تاثیر هم‌زمان الیاف میکرو و ماکرو در مقایسه با بتن مسلح معمولی یا با الیاف منفرد.

در حین آزمایش مقاومت فشاری، بتن غیرمسلح به صورت ناگهانی شکسته می‌شود درحالی‌که در بتن الیافی مسلح شده با الیاف ماکرو در پایان آزمایش، ترک‌های ریز در سطح نمونه استوانه‌ای ایجاد شده و حضور الیاف مانع از شکست ناگهانی نمونه می‌گردد. (Brandt, 2008) همچنین مطابق بررسی‌های صورت گرفته، استفاده از انواع مختلف الیاف باعث بهبود مقاومت کششی بتن غلتکی می‌گردد.

(Soroushian P, 2003) هسی و همکاران، با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بصورت تک‌رشته‌ای^۱ و منگنه‌ای^۲، مشاهده کردند که مدول گسیختگی^۳ (MOR)، مقاومت کششی و خصوصیات خمشی بتن تقویت شده با الیاف ترکیبی بهتر از خواص الیاف منفرد در بتن مسلح الیافی است. (Hsie, 2008).

تحقیقات نشان داده است که الیاف ماکرو اثرگذاری متفاوتی بر روی مقاومت خمشی دارند که غالباً وابسته به مشخصات مخلوط سیمانی است. (Soroushian P, 2003) مهم‌ترین اثرگذاری الیاف ماکرو بهبود شکل‌پذیری در ناحیه پس ترک‌خوردگی و چقرمگی خمشی بتن است. (De Oliveira LAP, 2011). با توجه به اینکه در علم مواد، چقرمگی شکست، ضریب شدت تنش بحرانی یک ترک است که در آن، انتشار ترک به‌طور ناگهانی سریع و نامحدود می‌شود. مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در حالت اول بارگذاری که تحت شرایط کرنش صفحه‌ای اندازه‌گیری می‌شود، عنوان چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای شناخته شده و با نشان داده می‌شود. چقرمگی شکست یک روش کمی برای بیان مقاومت یک ماده نسبت به انتشار ترک برای یک ماده‌ی خاص است. طبق مطالعه بانثیا و همکاران، الیاف میکرو فلزی ($25 \mu\text{m}$) در قطر و ۳ میلی‌متر طول) و الیاف میکرو کربنی ($18 \mu\text{m}$) در قطر و ۶ میلی‌متر طول)، به صورت منفرد و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفتند. (Banthia, 1990)

در حالت منفرد الیاف‌های فلزی مقاومت بهتری نسبت به الیاف‌های کربنی داشتند و الیاف‌های کربنی چقرمگی بهتری نسبت به نمونه‌های فلزی داشتند. در حالت استفاده آنها

۴- مشخصات نمونه بتنی حاوی الیاف نمونه‌های تیر خمشی شیاردار تحت حالت‌های بارگذاری به صورت

مقارن، پادمقارن و ترکیبی

شکل ۴ هندسه و شرایط بارگذاری آزمایش را نشان می‌دهد که به این نمونه، نمونه‌ی تیرچه‌شکل شیاردار (SENB) گفته می‌شود. همانطور که در شکل ۴ الف، ب و ج مشاهده می‌شود، این نمونه، یک تیرچه به ابعاد t و w است که دارای یک شیار به عمق a می‌باشد. در این تحقیق ۱۰۸ نمونه تیرچه خمشی $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر با استفاده از قالب مستطیلی تهیه شد.

شکل ۴ هندسه و شرایط بارگذاری آزمایش را نشان می‌دهد که به این نمونه، نمونه‌ی تیرچه‌شکل شیاردار (SENB) گفته می‌شود. همانطور که در شکل ۴ الف، ب و ج مشاهده می‌شود، این نمونه، یک تیرچه به ابعاد t و w است که دارای یک شیار به عمق a می‌باشد. در این تحقیق ۱۰۸ نمونه تیرچه خمشی $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر با استفاده از قالب مستطیلی تهیه شد.

هندسی مربوط به موده‌های I و II و III هستند. این دو ضریب Y_{III} و Y_{II} و Y_I بار اعمالی در لحظه شکست، P_c ضرایب

تابع α ، $\frac{L}{R}$ و $\frac{a}{t}$ می‌باشند. (Aliha, 2015)

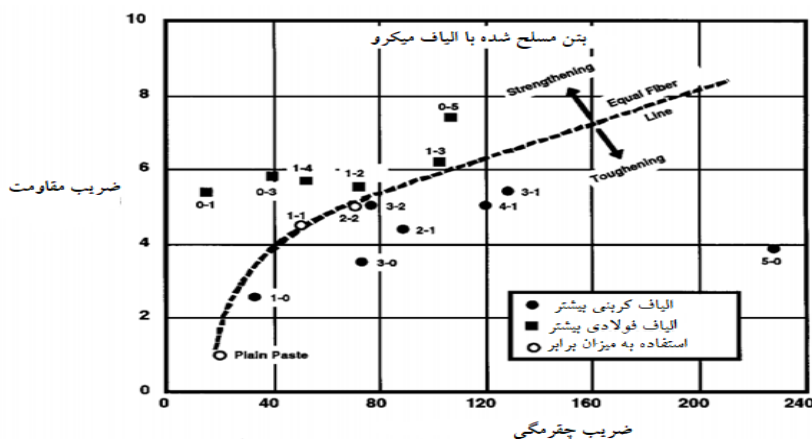
مقدار چقرمگی شکست در نمونه‌ی SENB با توجه به مود بارگذاری مطابق با معادلات ۲ تا ۴ در زیر بدست می‌آید.

همچنین مقدار ضرایب هندسی از آنالیز عددی که روح‌الامینی و همکاران برای نمونه SENB در مود I و II و III انجام دادند بدست آمد. (Rooholamini, 2022)(Aliha 2015)

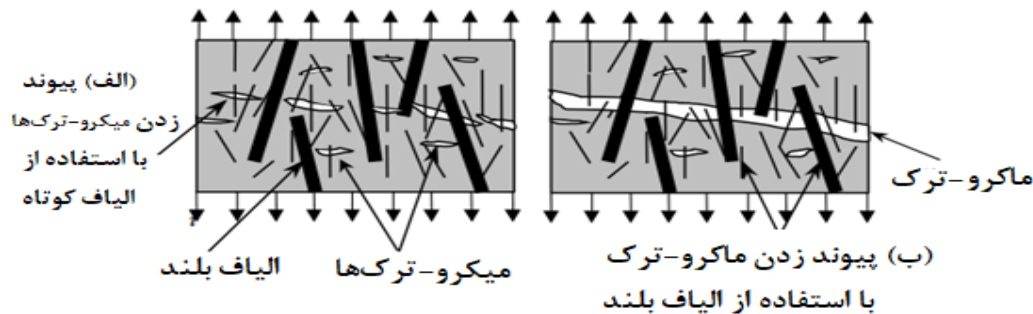
$$K_I = \frac{P}{2at} \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{a}{w} \cdot \frac{L}{w} \right) \quad (2)$$

$$K_{II} = \frac{P}{2at} \sqrt{\pi a} Y_{II} \left(\frac{a}{w} \cdot \frac{L}{w} \cdot \frac{L_0}{L} \right) \quad (3)$$

$$K_{I/II} = \frac{P}{2at} \sqrt{\pi a} Y_{I/II} \left(\frac{a}{w} \cdot \frac{L}{w} \cdot \frac{L_0}{L} \right) \quad (4)$$

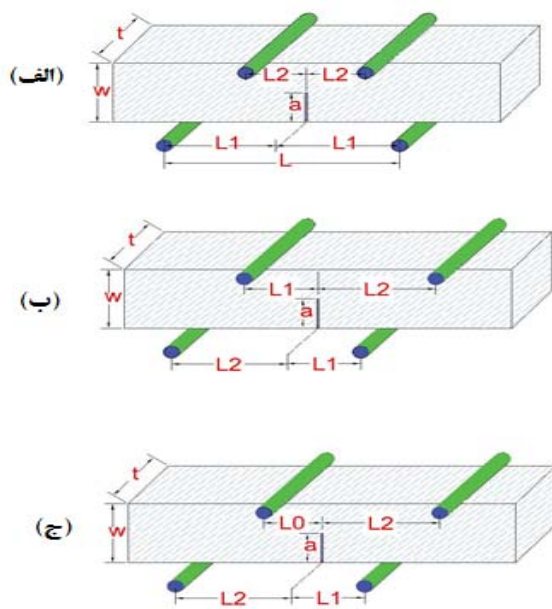


شکل ۲. استفاده از الیاف به صورت منفرد و ترکیبی توسط بانیا و همکاران و اثر آن بر چقرمگی شکست بتن



شکل ۳. مزایای استفاده از الیاف مختلط الف) تاثیر استفاده از الیاف‌های نازک کوتاه در اتصال میکرو-ترک‌ها

ب) تاثیر استفاده از الیاف‌های ضخیم بلند در اتصال ماکرو-ترک‌ها



شکل ۴. وضعیت‌های بارگذاری در آزمایش خمش چهارنقطه‌ای برای نمونه‌های تیرچه‌شکل شیاردار در حالت‌های بارگذاری به صورت متقارن، پادمقارن و ترکیبی

مصالح

معمولی می‌باشد. با توجه به اینکه در این پروژه از دو نوع الیاف فلزی و سنتتیک در دو اندازه میکرو و ماکرو استفاده شد، ترکیب درصد حجمی الیاف‌های مورد استفاده و مشخصات این دو الیاف مطابق با جداول ۲ و ۳ می‌باشد: (cons-tech.com, n.d.) همچنین تصاویر الیاف‌های استفاده شده در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده شده است.

مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: سنگدانه‌های طبیعی (شامل هر دو گروه درشت دانه و ریز دانه)، سیمان، آب، الیاف فلزی و الیاف مصنوعی. در ادامه ویژگی هریک از این مصالح بیان گردیده است. مشخصات فیزیکی، دوام و مکانیکی مصالح درشت دانه و ریزدانه مصرفی در بتن در جدول ۱ آورده شده است. سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان تیپ ۲ پرتلند



شکل ۵. تصاویر الیاف‌های مورد استفاده به ترتیب از بالا سمت راست: الیاف میکرو فلزی، سمت چپ: ماکرو فلزی و از پایین سمت راست: میکرو سنتتیک، سمت چپ: ماکرو سنتتیک

جدول ۲. میزان درصد حجمی الیافها

نمونه	ترکیب	درصد حجمی الیاف فولادی ماکرو	درصد حجمی الیاف فولادی میکرو	درصد حجمی الیاف سنتتیک ماکرو	درصد حجمی الیاف سنتتیک میکرو
۱	N	۰	۰	۰	۰
۲	SS	۰	۰/۲	۰	۰
۳	SL	۰/۵	۰	۰	۰
۴	PS	۰	۰	۰/۲	۰
۵	PL	۰	۰	۰/۵	۰
۶	SS-PL	۰	۰/۲	۰	۰/۲
۷	SL-PS	۰/۵	۰	۰/۵	۰
۸	SS-SL	۰/۵	۰/۲	۰	۰
۹	PS-PL	۰	۰	۰/۵	۰/۲

جدول ۱. مشخصات فیزیکی، دوام و مکانیکی مصالح درشت دانه و ریزدانه مصرفی در بتن

مشخصات سنگدانه‌ها	استاندارد مربوطه	درشت دانه طبیعی	ریزدانه طبیعی
حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (میلی‌متر)	ASTM C136	۱۲/۵	-
وزن حجمی (کیلومتر بر متر مکعب)	ASTM C127	۱۶۴۸	-
درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک (%)	ASTM C127	۲/۱	۲/۴
مدول نرمی	ASTM C136	-	۲/۸۸
درصد ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D2419	-	-
وزن مخصوص	ASTM C127,128	۲,۲۷	۲/۶۵
کلوخه‌های رسی و ذرات سست (%)	ASTM C142	۰/۰۷	۰/۱
درصد سایش (%)	ASTM C131	۱۱/۳	-
سلامت سنگدانه‌ها (درصد افت وزنی در سولفات سدیم) (%)	ASTM C88	۵/۲	-
ضریب تورق (%)	ASTM D4791	۱۶/۶	-
ضریب تطویل (%)	ASTM D4791	۱۷/۸	-

جدول ۳. مشخصات الیافهای مصرفی

الیاف فولادی ماکرو	الیاف فولادی میکرو	الیاف سنتتیک ماکرو (فورتا)	الیاف سنتتیک میکرو (پروپیلن-۱۲)
وزن مخصوص	۷/۸ g/cm ²	۷/۸ g/cm ²	۰/۹۱ g/cm ²
مقاومت کششی	۱۱۶۰ MPa<	۳۰۰۰ MPa	۳۴۵ MPa
مدول الاستیسیته	۲۱۰ GPa	۲۰۰ GPa	۳/۵ GPa<
طول	۶۰ mm	۱۳ mm	۱۲ mm
قطر	۰/۷۵ - ۰/۹ mm	۰/۱۶ mm	۰/۰۳ mm

طرح مخلوط

اختلاط الیاف در چهار مرتبه تکرار مورد آزمون قرار گرفت. مشخصات بارگذاری شامل فواصل تکیه‌گاه‌ها، نرخ بارگذاری و مشخصات نمونه در جدول ۴ ذکر شده‌است. همچنین نحوه بارگذاری در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

طرح مخلوط استفاده شده در این تحقیق بر اساس ACI.211 و به روش حجمی و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری استوانه‌ای ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. با آماده بودن طرح مخلوط بتن، دانه بندی شن و ماسه و میزان الیاف مصرفی می‌توان شروع به ساخت نمونه‌ها کرد. در این پروژه ۲۷ نمونه‌ی استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری، ۱۰۸ نمونه تیرچه خمشی ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر با استفاده از قالب مستطیلی برای آزمون‌های شکست ساخته شد.

تحلیل آماری با استفاده از توزیع دو پارامتری

ویبول

توزیع ویبول به عنوان یک روش آماری قابل اطمینان و ابزاری قوی برای پیش‌بینی شکست ترک در مصالح ترد معرفی شده‌است. (Wallin, 1984)

در این پروژه برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها از این توزیع استفاده شده است که در ادامه آورده شده‌است. از آنجایی که در این پروژه برای نتایج بدست آمده آزمایشات به جهت توصیف احتمال شکست در آن می‌توان یک نمودار گرافیکی ترسیم کرد، احتمال شکست در مدل توزیع ویبول، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$P_f = 1 - \text{Exp} \left(- \left[\frac{G_f \text{ or } K_c}{\beta} \right]^\alpha \right) \quad (5)$$

که در آن P_f ، احتمال شکست ترک، G_f انرژی شکست، K_c ضریب شدت تنش، β ضریب مقیاس، α ضریب شکل هستند. برای تعیین ضرایب مقیاس و شکل از روش حداقل مربعات با استفاده از رگرسیون رابطه‌ی ۵ برای داده‌های آزمایش استفاده شده‌است.



شکل ۶. نمونه تیر خمشی شیاردار تحت آزمایش شکست در وضعیت‌های بارگذاری به ترتیب بالا متقارن، سمت راست پایین پادمقارن و پایین سمت چپ ترکیبی

جدول ۴. مشخصات بارگذاری شامل فاصله تکیه‌گاهی و شیار در نمونه تیرخمش‌ی شیاردار

سرعت بارگذاری (mm/min)	عرض درز شیار (mm)	طول شیار (mm)	L ₂ (mm)	L ₁ (mm)	L ₀ (mm)	ابعاد نمونه تیر خمش‌ی شیاردار (میلی‌متر)	مود شکست
۰/۵	۲	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	---	۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰	حالت I (بازشدگی)
۰/۵	۲	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	---	۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰	حالت II (لغزشی)
۰/۵	۲	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰	حالت I/II (ترکیبی)

نتایج آزمایشات

آزمون مقاومت فشاری

با توجه به آزمایش مقاومت فشاری در این تحقیق، اثر الیاف‌های مختلف بر بتن در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه بدون الیاف ۳۱/۳۶ مگا پاسکال بدست آمد. استفاده از ترکیب الیاف‌های فلزی و پلی‌پروپیلن بیشترین اثر را در افزایش مقاومت فشاری الیاف داشت به طوری که در ترکیب بتن با الیاف‌های میکروپلی‌پروپیلن-ماکروفلزی (PSSL)، ماکروپلی‌پروپیلن-میکروپلی‌پروپیلن (PSPL) و میکروفلزی-ماکروفلزی (SSSL) به ترتیب ۱۵/۰۹، ۱۶/۰۴ و ۱۴/۹۸ درصد افزایش مقاومت حاصل شد. همچنین استفاده ۰/۰۲ درصدی از الیاف فلزی میکرو (SS) و ۰/۰۵ درصدی از الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن (PL) به ترتیب باعث افزایش مقاومت ۱۱/۷۹ و ۸/۳۹ درصدی مقاومت فشاری شد. در سایر موارد اثر الیاف بر مقاومت فشاری ناچیز بوده و در مورد استفاده از الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن (PL) شاهد کاهش ۳/۰۸ درصدی مقاومت بودیم. در شکل ۷ تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری نمونه‌ها قابل مشاهده است.

نتایج آزمایش شکست با استفاده از نمونه‌های تیر خمش‌ی

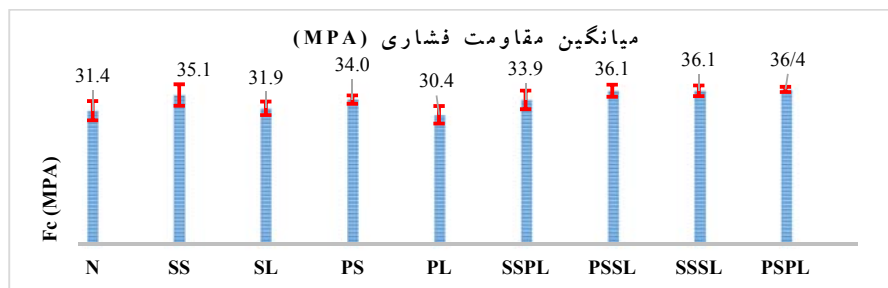
شیاردار

با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت I بارگذاری که به صورت متقارن انجام شد، نتایج بدست آمده نشان داد بیشترین میزان افزایش K_{IC-ave} در نمونه‌های با الیاف‌های

میکروپلی‌پروپیلن-ماکروفلزی (PSSL) و میکروفلزی-ماکروفلزی (SSSL) به ترتیب ۹/۰۳ و ۹/۹۱ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف بدست آمد. در نمونه‌های میکروفلزی-ماکروپلی‌پروپیلن (SSPL) و میکروپلی‌پروپیلن-ماکروپلی‌پروپیلن (PSPL) درصد افزایش K_{IC-ave} نسبت به دو ترکیب قبل کمتر بود. در نمونه‌های با الیاف منفرد، بیشترین تاثیر در استفاده از الیاف میکروفلزی (SS) و نیز ماکروفلزی (SL) ایجاد شد. جایی که میزان K_{IC-ave} از ۲/۴۹۰ به ترتیب به میزان ۲/۷۵۵ و ۲/۸۲۱ افزایش یافت یعنی به ترتیب ۱۰ درصد و ۱۳/۲۹ درصد افزایش بدست آمد. تاثیر استفاده منفرد الیاف میکروپلی‌پروپیلن و نیز الیاف ماکروپلی‌پروپیلن نامحسوس بود. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت II بارگذاری که به صورت پادمقارن انجام شد، با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین میزان افزایش K_{IC-ave} در نمونه‌های با الیاف‌های میکرو پلی‌پروپیلن-ماکروفلزی (PSSL) به میزان ۱۰ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف بدست آمد. در نمونه‌های میکروفلزی-ماکروفلزی (SSSL)، میکروفلزی-ماکرو پلی‌پروپیلن (SSPL) و میکروپلی‌پروپیلن-ماکروپلی‌پروپیلن (PSPL) درصد افزایش K_{IC-ave} بسیار ناچیز بود. در نمونه‌های با الیاف منفرد، بیشترین تاثیر در استفاده از الیاف میکروفلزی (SS) و نیز ماکروفلزی (SL) ایجاد شد جایی که میزان K_{IC-ave} از ۱/۵۴۳ به ترتیب به میزان ۱/۶۷۶ و ۱/۶۶۰ افزایش یافت یعنی به ترتیب ۸/۶ درصد و ۷/۵۸ درصد افزایش. تاثیر استفاده منفرد الیاف میکروپلی‌پروپیلن ۴/۰۸ درصد افزایشی و الیاف ماکروپلی‌پروپیلن نامحسوس بود. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت ترکیبی I/II بارگذاری، با توجه به نتایج بدست آمده، میزان افزایش K_{IC-ave} در نمونه‌های مختلط با الیاف‌های میکروپلی‌پروپیلن-ماکروفلزی (PSSL)،

(SL) و میکروفلزی (SS) ایجاد شد جایگاه میزان K_{IC-ave} از ۲/۱۲۲ به ترتیب به میزان ۲/۸۵۹ و ۲/۳۴۰ افزایش یافت یعنی به ترتیب ۳۴/۷ درصد و ۱۰ درصد افزایش. تاثیر استفاده منفرد الیاف میکروپلی پرویلن ۵/۵۱ درصد افزایشی و الیاف ماکروپلی پرویلن ۴/۴۲ درصد افزایشی بدست آمد.

میکروفلزی-ماکرو فلزی (SSSL)، میکروپلی پرویلن-ماکروپلی پرویلن (PSPL) به ترتیب به میزان ۲۸/۴۱، ۲۲/۰۵ و ۱۶/۳۹ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش یافت. در نمونه میکروفلزی-ماکرو پلی پرویلن (SSPL) درصد افزایش K_{IC-ave} بسیار ناچیز بود. در نمونه‌های با الیاف منفرد، بیشترین تاثیر در استفاده از الیاف ماکروفلزی



شکل ۷. مقایسه تاثیر الیاف و ترکیب آنها بر مقاومت فشاری در نمونه‌ها و انحراف معیار میانگین‌ها

تحلیل آماری با استفاده از توزیع ویبول در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار

با استفاده از روش حداقل مربعات ضرایب α و β می‌توان تاثیر الیاف‌های به‌کارگرفته شده در نمونه‌ها را با توجه به مقادیر ضریب شدت تنش و احتمال شکست نمونه‌ها در حالات مختلف نشان داد. در جدول ۵ ضرایب α و β حاصل از توزیع ویبول آورده شده‌است.

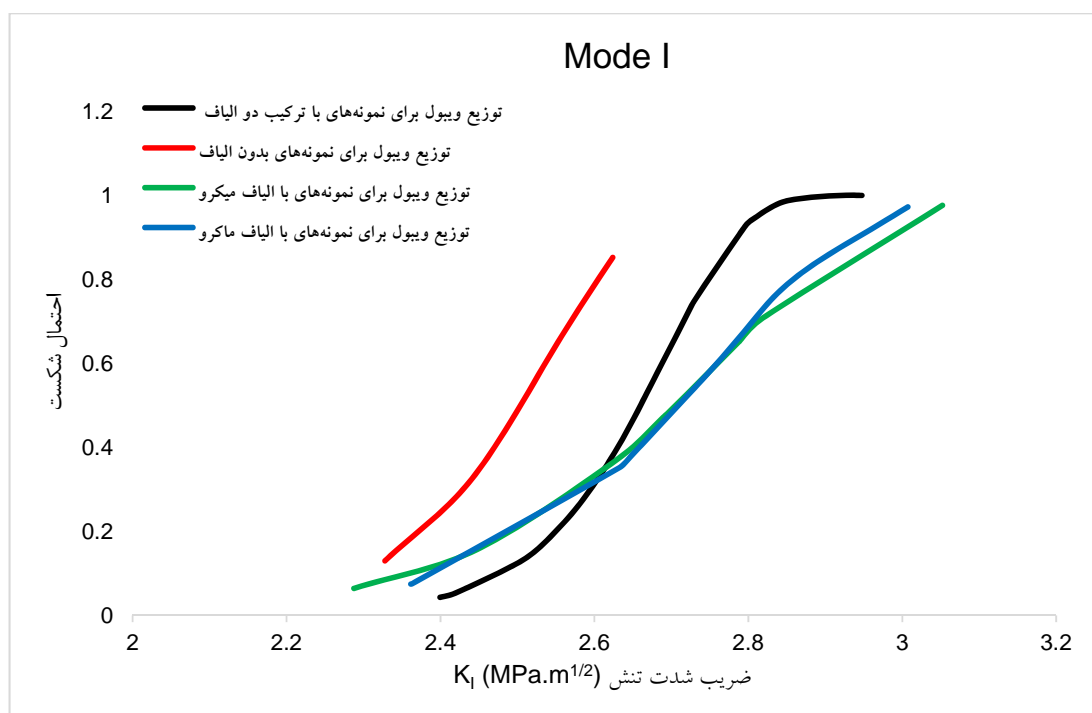
جدول ۵. ضرایب α و β در توزیع ویبول با توجه به متغیرهای آزمایش برای نمونه‌های تیر خمشی شیاردار

حالت آزمایش	طرح مخلوط الیاف	SIF		
		α	β	SQD
I	نمونه‌های N	۲۱/۹۰	۲/۵۴	۰/۰۲۳
I	نمونه‌های با الیاف میکرو	۱۳/۹۷	۲/۷۷	۰/۰۸۴
I	نمونه‌های با الیاف ماکرو	۱۵/۸۷	۲/۷۷	۰/۴۳۴
I	نمونه‌های با ترکیب دو الیاف	۲۶/۷۰	۲/۶۹	۰/۶۷۸
II	نمونه‌های N	۱۴/۴۲	۱/۵۵	۰/۰۲۰
II	نمونه‌های با الیاف میکرو	۹/۵۸	۱/۷۳	۰/۱۵۴
II	نمونه‌های با الیاف ماکرو	۸/۱۶	۱/۷۱	۰/۱۵۶
II	نمونه‌های با ترکیب دو الیاف	۱۹/۳۹	۱/۶۴	۰/۹۹۶
I/II	نمونه‌های N	۳۲/۱۲	۲/۱۶	۰/۰۱۰
I/II	نمونه‌های با الیاف میکرو	۳۲/۵۷	۲/۲۸	۰/۵۰۷
I/II	نمونه‌های با الیاف ماکرو	۱۴/۳۳	۲/۴۶	۰/۲۵۶
I/II	نمونه‌های با ترکیب دو الیاف	۸/۵۸	۲/۶۲	۰/۳۰۸

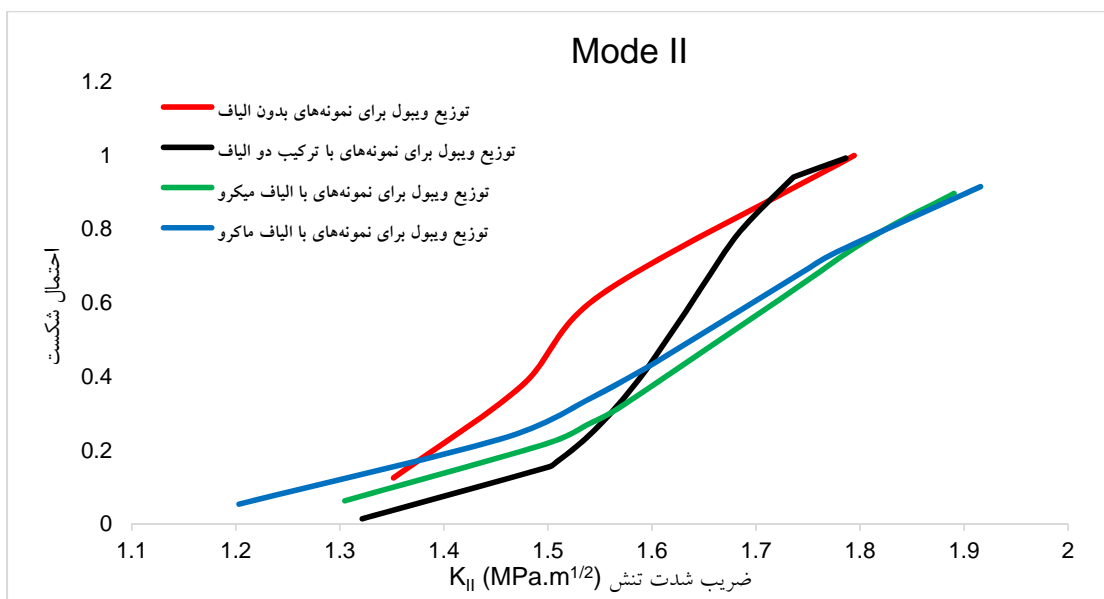
نمونه‌ها نشان داده شده‌است. استفاده از الیاف میکرو و ماکرو منجر به بهبود احتمال شکست گردیده و در یک ضریب شدت تنش، احتمال شکست نمونه‌ی بدون الیاف بیشتر است. در استفاده از الیاف ماکرو منفرد نیز، کاهش احتمال شکست نمونه‌ها مشاهده شد. در نمونه‌های حاوی ترکیب دو الیاف، احتمال شکست نمونه‌ها کاهش و سپس افزایشی است. با توجه به نتایج نمونه‌های تیر خمشی شیاردار و نیز تحلیل آماری ویبول، با توجه به بررسی حالت‌های آزمایش در وضعیت ترکیبی I/II بارگذاری، مطابق با شکل ۱۰ تاثیر الیاف میکرو، ماکرو و نیز ترکیب دو الیاف بر احتمال شکست نمونه‌ها نشان داده شده‌است. استفاده از الیاف میکرو منجر به بهبود احتمال شکست گردیده و در یک ضریب شدت تنش احتمال شکست نمونه‌ی بدون الیاف بیشتر است. در این وضعیت بارگذاری، استفاده از حالت ترکیبی مطلوب‌ترین اثر را بر کاهش شکست در پی دارد و استفاده از حالت ماکرو به صورت منفرد وضعیت بهتری نسبت به استفاده از الیاف میکرو به صورت منفرد خواهد داشت.

با توجه به نتایج نمونه‌های تیر خمشی شیاردار و نیز تحلیل آماری ویبول، با توجه به بررسی حالت‌های آزمایش، در حالت I بارگذاری، مطابق با شکل ۸ تاثیر الیاف میکرو و ماکرو به صورت منفرد و نیز ترکیبی بر احتمال شکست نمونه‌ها نشان داده شده‌است. استفاده از الیاف میکرو به صورت منفرد منجر به بهبود احتمال شکست گردیده و در یک ضریب شدت تنش، احتمال شکست نمونه‌ی بدون الیاف بیشتر است. این نکته در استفاده از الیاف ماکرو منفرد همانند استفاده از الیاف میکرو منجر به کاهش احتمال شکست خواهد شد.

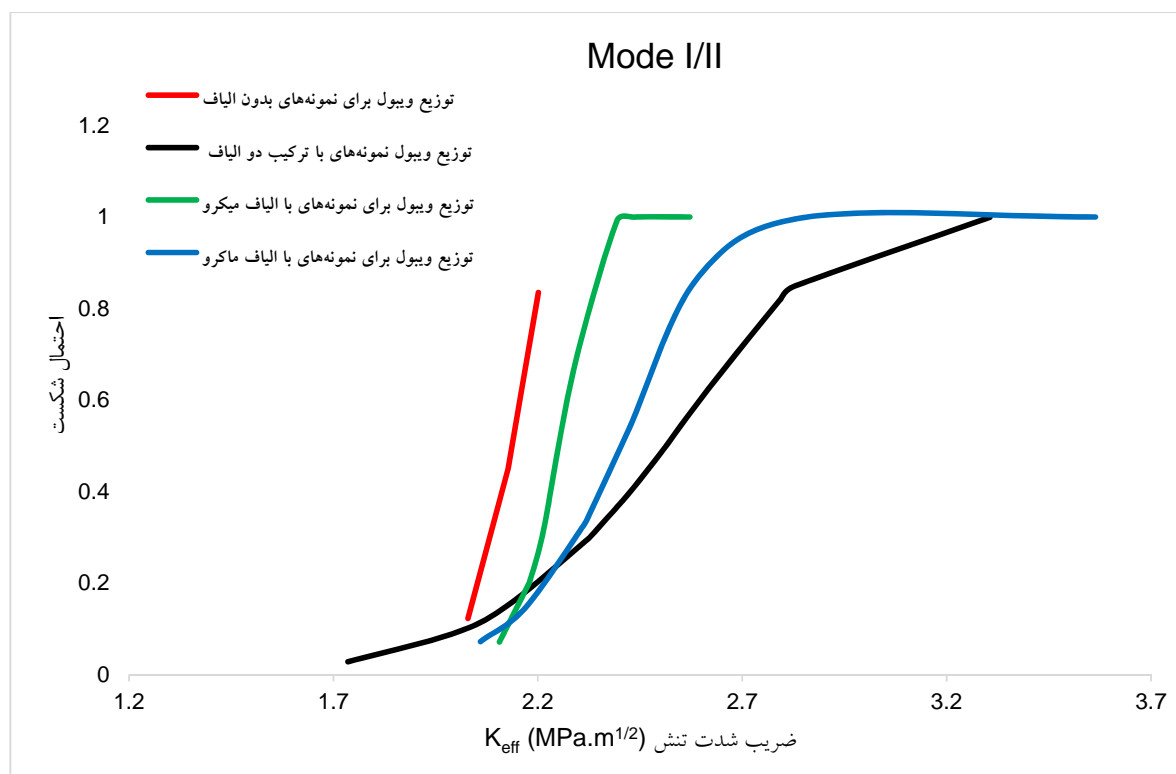
در استفاده همزمان از ترکیب دو الیاف نیز تا ضریب شدت تنش حدود $2/6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ وضعیت شکست مطلوب می‌باشد و سپس نتیجه نامساعدتری نسبت به استفاده از الیاف‌ها به صورت منفرد خواهد داشت. با توجه به نتایج نمونه‌های تیر خمشی شیاردار و نیز تحلیل آماری ویبول، با بررسی حالت‌های آزمایش در وضعیت II بارگذاری، مطابق با شکل ۹ تاثیر الیاف میکرو، ماکرو به صورت منفرد و نیز ترکیبی بر احتمال شکست



شکل ۸. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش (K_I) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های تیر خمشی شیاردار بدون الیاف، با الیاف میکرو، ماکرو و ترکیب دو الیاف در مود I بارگذاری



شکل ۹. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش (K_{II}) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های تیر خمشی شیاردار بدون الیاف، با الیاف میکرو، ماکرو و ترکیب دو الیاف در مود II بارگذاری



شکل ۱۰. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش موثر (K_{eff}) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های تیر خمشی شیاردار بدون الیاف، با الیاف میکرو، ماکرو و ترکیب دو الیاف در مود I/II بارگذاری

۵- نتیجه گیری

-در مود I/III بارگذاری و در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار تاثیر الیاف میکرو، ماکرو و نیز ترکیب دو الیاف بر احتمال شکست قابل توجه است و شرایط شکست نمونه‌های ترکیبی نسبت به نمونه‌های با الیاف ماکرو بهتر است.

-پیشنهاد می‌شود رفتار شکست نمونه در ناحیه پس‌ترک‌خوردگی^۵ مورد بررسی قرارگیرد.

- با توجه به هندسه‌ی انتخابی نمونه‌ها و تمرکز بر روی ضریب شدت تنش این پروژه در مقیاس آزمایشگاهی صورت پذیرفت، که تحت بارگذاری‌های رایج در روسازی‌های بتنی و در مقیاس بزرگ آزمایش‌ها در مودهای مختلف بارگذاری انجام شود.

- با توجه به اهمیت و ضرورت مسائل زیست‌محیطی، استفاده از الیاف‌های بازیافتی پیشنهاد می‌گردد. اثر استفاده از الیاف مختلط بازیافتی با بررسی ویژگی‌های آنها بر چقرمگی بتن مورد بررسی قرارگیرد.

با توجه به آزمایشات و تحلیل‌هایی که در مورد استفاده منفرد و ترکیبی از چهار نوع الیاف فلزی میکرو، فلزی ماکرو، پلی‌پروپیلن میکرو، پلی‌پروپیلن ماکرو صورت گرفت نتایجی به شرح ادامه بدست آمد.

-در مود I بارگذاری و در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار تاثیر الیاف میکرو، ماکرو و نیز ترکیب دو الیاف بر احتمال شکست قابل توجه است و در یک ضریب شدت تنش مطابق با تحلیل‌های صورت گرفته، شرایط نمونه‌های با الیاف میکرو و ماکرو نسبت به حالت ترکیبی دو الیاف بهتر است.

- در مود II بارگذاری و در نمونه‌های تیر خمشی شیاردار تاثیر الیاف میکرو، ماکرو و نیز ترکیب دو الیاف بر احتمال شکست قابل توجه است و از ضریب شدت تنش در حدود $1/6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ شرایط نمونه‌های با الیاف میکرو و ماکرو نسبت به حالت ترکیبی دو الیاف بهتر است.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Monofilament Polypropylene Fibers
2. Staple Polypropylene Fibers
3. Modulus of Rupture
4. Hybrid Fiber Reinforced Concrete
5. Post-Cracking

۷- مراجع

-Aliha, (2015). Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen.

-Aliha, (2018). Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen. *Construction and Building Materials*.

-Anderson, (2005). Fracture mechanics: fundamentals and applications. International Standard Book No.13. 978-1-4200-5821-5.

-Bentur, (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Modern Concrete Technology Series*, Department of Civil Engineering.

-Al. B. e., (1990). Micro-Reinforced Cementitious Materials, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 211, Boston.

-Al. S. e., (1997). Optimization of fracture mechanical behavior of low content hybrid fibre reinforced concrete, Technical Report. (Faculty of Civil Engineering, *Section of Mechanics and Structures*, Delft University of Technology).

-Aliha, (2015). Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration.

- Mojiri, (2010). Numerical Analysis of CohesiveCrack Growth Using ExtendedFinite Element Method (X-FEM). *Engineering Fracture Machines*.
- Rooholamini, H., (2022). Numerical and experimental study on the fracture properties of concrete in mode I/II using four point bending specimen.
- Soroushian P, P. J., (2003). Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. *ACI Mater J*. 100(3), 203–207.
- Wallin, (1984). The scatter in KIC-results. *Eng. Fract. Mech*. 19, 1085–1093.
- Yin, S. e., (2015). Use of macro plastic fibres in concrete. a review. *Construction and Building Materials*, 93, 180-188.
- Brandt, A., (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1), 3-9.
- De Oliveira LAP, C. G. J., (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Constr Build Mater*; 25(4), 1712–1717.
- Hasan, M., (2011). An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fibre reinforced concrete. *Int J Civil Environ Eng IJCEE-IJENS*, 11(03),18–23.
- Hsie, e. a. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete.
- Huang, Y. H., (2004). Pavement Analysis and Design.

Investigating the Effect of Micro and Macro Fibers on the Fracture toughness of Concrete in Notched Bending Beam Specimens under Symmetric, Ant Symmetric and Combined Loading Conditions

Behroz Shirgir, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Kharazmi, Tehran, Iran.

Hamid Gorji, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Kharazmi, Tehran, Iran.

Hamed Rooholamini, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hormozghan University, Hormozghan, Iran.

E-mail: shirgir@khu.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

During the last few decades, various types of fibers have been widely used to reinforce concrete. Considering the properties of fiber-reinforced concrete, the production and use of fibers in the industrialized countries of the world has a wide range, and currently all types of fibers with technical specifications and various applications are mass-produced industrially. Considering the need to develop the production and use of fiber concrete technology .in this research, considering the variety of fibers in terms of material, shape, size, etc., to investigate the effect of metal and synthetic fibers (polypropylene) in micro and macro form, to one of the most important fracture parameters of concrete, i.e., fracture toughness, was studied in 100 mm x 100 mm x 500 mm Single-Edge Notched Bending (SENB) beam samples under symmetrical (I), antisymmetric (II) and combined (I/II) loading conditions. Also, considering the favorable performance of micro fibers on increasing the modulus of rupture of concrete and also the desired performance of macro fibers in improving the concrete rupture module and increasing the bearing capacity of concrete in the post-cracking area of concrete, by using these two types of fibers simultaneously, their superposition effect on the characteristics concrete failure was evaluated in different loading modes (tensile mode, shear mode and combined mode). Hence, Metal and synthetic fibers in micro and macro forms with volume percentages of 0.2% and 0.5% respectively were used to investigate the failure probability of the samples. Using two-parameter Weibull statistical distribution, it was observed that the use of fibers in both micro and macro form has a agreeable effect on the probability of failure of the samples based on the fracture toughness of the samples obtained in the laboratory.

Keywords: Polypropylene Fibers, Steel Fibers, Synthetic Fibers, Two-Parameter Weibull Statistical Distribution, Fracture Mechanics