

بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف شیشه بر چقرمگی شکست و انتشار ترک حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I-II در بتن مسلح الیافی

میترا حاتمی جربت^۱، مهدی حسینی^{۲*}، مهدی مهدی خانی^۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

چکیده

وجود درزه، شکاف و شکستگی‌های اولیه و از پیش موجود در سنگ و دیگر مواد مورد استفاده در علوم مهندسی، امری اجتناب‌ناپذیر بوده و از ویژگی‌های ذاتی هر ماده است. این موضوع باعث می‌شود که سازه‌ها و یا توده‌های سنگی، تحت بارگذاری‌های مکانیکی یا سایر عوامل محیطی، سریع‌تر گسیخته شوند. بتن، به‌عنوان پرکاربردترین مصالح در مهندسی عمران بوده که معمولاً ارزان‌ترین و رایج‌ترین مصالح موجود را در خود دارد. از این رو به سبب بروز ترک و شکستگی می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به بار آورد. به این منظور در سال‌های اخیر با ساخت بتن‌های الیافی مسلح، تا حدود زیادی ضعف‌های مذکور در آن بهبود یافته است. در این پژوهش با استفاده از روش آزمون روی دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم، پیش‌بینی روند انتشار ترک و چقرمگی شکست در نمونه‌های بتن بدون الیاف و نمونه‌های حاوی الیاف شیشه در درصدهای حجمی مختلف ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ بررسی شده است. علاوه بر این، فرآیند گسترش ترک از شکاف‌های از پیش موجود در نمونه‌ها و همچنین چقرمگی شکست در حالت‌های I، II و حالت ترکیبی I-II محاسبه شد. آزمایش دیسک برزیلی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در زوایای ۰، ۱۵، ۲۸/۸۳، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای ترک از پیش موجود انجام شده است. پس از مطالعات آزمایشگاهی مشخص گردید که شروع ترک‌های باله‌ای در زوایای کم‌تر از ۷۵ درجه ($0 < \alpha < 75$) از نوک ترک از پیش موجود اتفاق می‌افتد و با ادامه‌ی بارگذاری مسیر رشد و انتشار ترک به راستای بارگذاری نزدیک می‌گردد. این در حالی است که برای زوایای ۷۵ درجه و بزرگ‌تر از آن، شروع ترک با فاصله d از نوک ترک آغاز می‌گردد. این فاصله در نمونه‌های فاقد الیاف بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف است. همچنین نتایج نشان می‌دهد چقرمگی شکست مود I، II و ترکیبی I-II با استفاده از مقادیر ۰/۲ درصد الیاف شیشه بیش از چقرمگی شکست نمونه‌های فاقد الیاف می‌باشد.

کلید واژه‌ها: انتشار ترک، بتن مسلح الیافی، چقرمگی شکست حالت I، چقرمگی شکست حالت II، چقرمگی شکست حالت

ترکیبی I-II

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

^۲ دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) mahdi_hsseini@ikiu.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

ترک‌ها می‌توانند به‌عنوان هسته‌ای بحرانی برای شکست نمونه سنگی باشند که از به هم پیوستن و رشد متناوب آن‌ها، شکست نهایی سنگ اتفاق می‌افتد؛ بنابراین مطالعه ایجاد، گسترش و به هم پیوستن این ترک‌ها در پیش‌بینی فرآیند شکست سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کنند. مکانیسم رشد ترک‌های از پیش موجود در سنگ برای حالت‌های بارگذاری کششی و برشی متفاوت است و معمولاً به دلیل پایین بودن چقرمگی شکست حالت I سنگ، اغلب به‌صورت کششی اتفاق می‌افتد. غالباً در بارگذاری فشاری تک‌محوری مسیر رشد ترک‌ها به موازات تنش فشاری بیشینه است (حائری و همکاران، ۱۳۹۲).

به‌کارگیری بتن غیرمسلح به علت تردی آن به‌غیراز سازه‌های وزنی عملاً کاربرد چندانی ندارد. این عیب عمده بتن در عمل با مسلح کردن آن به‌وسیله میلگردهای فولادی یا آرماتور برطرف می‌گردد؛ اما از آنجاکه آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع ایزوتروپ و هموزن است چندان صحیح نخواهد بود؛ علاوه بر این، خوردگی میلگرد در بتن مسلح یکی از دلایل خرابی سازه‌های بتن مسلح و شایع‌ترین نوع خرابی بتن در سواحل است. حجم فولاد تسلیح تحت اثر خوردگی افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار داخلی در جسم بتن ایجاد می‌کند. بتن که عموماً دارای مقاومت کششی ضعیف است، تحت اثر این فشار داخلی دچار ترک‌خوردگی می‌شود.

به منظور بهینه کردن عملکرد آرماتور، الیافی هستند که به‌صورت تصادفی در میان مخلوط بتن پراکنده شده‌اند. به‌منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و نیز کاهش ضعف شکنندگی و تردی جسم بتن تا حد ممکن در چند دهه اخیر از رشته‌های نازک که در تمام حجم بتن به‌طور همگن و در

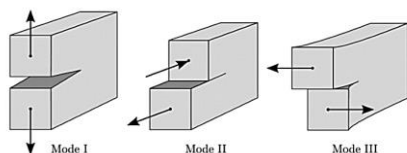
هم پراکنده می‌گردد استفاده می‌شود. خصوصیات فیزیکی بتن مسلح الیافی به‌صورت گسترده از خواص الیاف تأثیر می‌گیرد که شامل: نسبت حجمی الیاف، نوع و آرایش یافتگی الیاف و پیوند بین الیاف و ماتریس می‌باشد (پایرو، ۱۳۹۲).

برخلاف مواد پلیمری که از ساختمانی زنجیره‌ای برخوردارند، شیشه از ساختمان شبکه‌ای برخوردار می‌باشد. باوجوداین، مقاومت الیاف شیشه‌ای بسیار زیاد، حدود دو برابر مقاومت و استحکام دیگر الیاف غیرفلزی است. الیاف شیشه، الیاف ظرفیت انعطاف‌پذیری هستند که از شیشه مذاب به‌صورت رشته‌های نخی شکل می‌باشند. خصوصیات الیاف شیشه شامل مقاومت شیمیایی بالا، مقاومت در برابر رطوبت، عایق الکتریکی، خواص فیزیکی مناسب، استحکام کششی بالا و مقاومت حرارتی خوب می‌شود (اقتداری و قنبری، ۱۳۹۸).

علت انتخاب بتن جهت این تحقیق به این منظور است که بتن به‌عنوان سنگی مصنوعی جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت و ساز، سیستم‌های نگهداری فضاها، زیرزمینی، روسازی‌ها، سازه‌های بتنی پیدا کرده است و ایجاد ترک و شکست در چنین سازه‌هایی چه در اثر عوامل طبیعی مانند زلزله و رانش زمین و چه در اثر عوامل مصنوعی مانند گودبرداری‌های غیراصولی غیرقابل اجتناب می‌باشد. پیش‌بینی روند گسترش ترک در بتن حاوی الیاف مختلف می‌تواند تا حدی اقدامات پیشگیرانه‌ای را قبل از وقوع حادثه به انجام برساند.

به‌عنوان موضوع اصلی در مهندسی معدن و عمران، تغییر شکل و شکست در سنگ، ممکن است باعث ایجاد وقفه در فعالیت‌های معدنی یا ساختمانی شود و یا حتی خسارت‌های ایمنی قابل‌توجهی به بار آورد. با توجه به تقاضای فزاینده برای منابع و افزایش قابل‌توجه فعالیت‌های زیرزمینی، رفتار

همان‌طور که گفته شد سه مود اصلی اعمال نیرو بر ترک وجود دارد. شکل ۱ تصویر شماتیکی از این مودها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مودهای اعمال نیرو در جسم دارای ترک (حسامی و بزرگ نیا، ۱۳۹۷)

برای تعیین چقرمگی شکست سنگ، روش‌ها و آزمایش‌های مختلفی ارائه شده است. از میان روش‌های ذکر شده، نمونه‌ی دیسک برزبلی دارای ترک مرکزی به‌عنوان نمونه‌ی محبوب جهت تعیین چقرمگی شکست در مواد سنگی شناخته می‌شود. به دلیل سهولت این روش، می‌توان آزمایش‌های متعددی روی مواد مختلف سنگی انجام داد؛ به‌علاوه اینکه این آزمایش‌ها از مود یک خالص تا مود دو خالص و حالت‌های مود ترکیبی را شامل می‌شود (Ayatollahi and Aliha, 2008). در این پژوهش از این روش استفاده شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی متعددی برای مطالعه فرآیند شکست در نمونه‌های سنگی و شبه سنگی حاوی ترک‌های از پیش موجود تحت آزمایش‌های فشاری توسط محققین انجام شده است (Park and Bobet, 2010). در این مطالعات آزمایشگاهی اختلاف‌هایی در الگوهای ترک‌های ایجاد شده تحت تنش فشاری دیده شده که بستگی به مواد به‌کاررفته دارند. الگوی ترک‌های ایجاد شده عبارت است از: ترک‌های باله‌ای و ترک‌های ثانویه. ترک‌های باله‌ای، ترک‌های کششی هستند که از مجاور نوک ترک از پیش موجود شروع می‌شوند و به‌صورت منحنی و در امتداد فشار بیشینه گسترش می‌یابند. ترک‌های ثانویه، ترک‌های برشی هستند که در ابتدا از نوک ترک‌ها شروع می‌شوند و به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

مکانیکی سنگ از اهمیت ویژه‌ای در پروژه‌های عمرانی، مهندسی معدن و عملیات مربوط به اکتشاف مواد معدنی برخوردار است. توده سنگ معمولاً تعداد زیادی میکرو ترک دارد. این امر بر لزوم درک بهتر شکست ساختارهای سنگی در اثر گسترش ترک‌ها تأکید می‌کند (Lou et al., 2017).

میزان مقاومت سنگ در برابر رشد ترک یا همان چقرمگی شکست، پارامتر مهمی در جهت طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی با به‌کارگیری نظریه‌های مکانیک شکست می‌باشد. استفاده از روش‌های متداول تحلیل و طراحی سازه‌های فولادی، سنگی و بتنی بر مبنای معیارهای تنش و مقاومت تاکنون مشکلات بسیاری را برای سازه‌ها به وجود آورده است. بارها تجربه شده است که رفتار واقعی سازه را نمی‌توان با روش‌های متداول تعیین کرد. در سال‌های اخیر کوشش شده تا بتوان رفتار واقعی سازه را بر اساس نظریه‌های مکانیک شکست بیان نمود (جباری و حسینی، ۱۳۹۶).

یک ترک در یک جسم در معرض سه نوع بارگذاری مختلف می‌تواند قرار بگیرد که سطح ترک درگیر جابجایی شود. رفتار مکانیکی جسم جامد شامل یک ترک با اندازه و شکل خاص می‌تواند با ارزیابی کردن ضریب شدت تنش (K_I ، K_{II} ، K_{III}) پیشگویی شود (کریم داداشی و همکاران، ۱۳۹۶). ضریب شدت تنش (K) مقدار تنش موضعی را در نوک ترک تعیین می‌کند. این ضریب به میزان بارگذاری، اندازه ترک، شکل ترک و مرزهای هندسی وابسته است (کریم داداشی و همکاران، ۱۳۹۶).

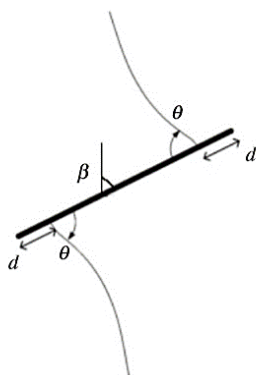
در علم مکانیک شکست شرایط بحرانی یک قطعه ترک‌دار با استفاده از ضرایب شدت تنش تخمین زده می‌شود و برای آگاهی از وضعیت شروع و رشد ترک و درنهایت شکست قطعه، تعیین ضرایب شدت تنش به‌طور کامل ضروری است.

الیاف شیشه به ترتیب، ۰/۸، ۲/۸ و ۶/۵ درصد کاهش یافته است (Taheri Fard et al., 2016). پژوهش های محدودی بر روی چقرمگی شکست و انتشار ترک مود ترکیبی بتن در گذشته انجام شده است که در ادامه ارائه می شود. پژوهش بهنیا و همکاران نشان می دهد در تشکیلات دارای لایه بندی، مدول های الاستیسیته لایه سخت و نرم در انتشار ترک موثر است (Behnia et al., 2014). مطالعه حائری و همکاران نشان می دهد در نمونه های دیسک برزیلی دارای دو ترک کناری (double edge-notches)، طول ترک ها در انتشار ترک موثر است (Haeri et al. 2016). ارارسلان (N. Erarslan) آزمایش دیسک برزیلی را در زوایای ۰، ۳۰، ۴۵ و ۷۰ درجه انجام داده است، نتیجه‌ی حاصل شده از آزمایشات انجام شده این بود که با افزایش زاویه‌ی انحراف ترک ($\beta > 30^\circ$)، محل شروع ترک به سمت مرکز ترک موجود تغییر مکان می‌دهد. در زاویه صفر درجه، ترک، عمود بر تنش کششی ایجاد شده یعنی موازی راستای بارگذاری گسترش می‌یابد. با افزایش زاویه β ، مسیر رشد ترک به صورت منحنی شکل ادامه یافته تا به سمت نقطه بارگذاری گسترش پیدا کند. این ترک‌ها، ترک‌های باله‌ای نامیده می‌شوند (Erarslan, 2019). حسامی و بزرگ نیا در سال ۱۳۹۷ نشان دادند که به‌کارگیری ۰/۴ درصد الیاف فولادی می‌تواند تا ۵۷ درصد چقرمگی شکست بتن با مقاومت بالا را بهبود بخشد؛ این تحقیقات نشان می‌دهد که الیاف، مقاومت‌های کششی و خمشی بتن را به صورت چشمگیری تغییر نمی‌دهد بلکه تأثیر عمده الیاف بر رفتار پس از بار گسیختگی است. افزایش شکل‌پذیری و افزایش طاقت خمشی از مهم‌ترین مزایای افزودن الیاف به بتن است (حسامی و بزرگ نیا، ۱۳۹۷). قزوینیان (Ghazvinian) و همکاران پژوهشی جهت بررسی گسترش ترک در حالت مود ترکیبی (I-II)، در نمونه‌های دیسک برزیلی دارای ترک مرکزی مستقیم ساخته شده از سیمان پوزولانی، پلاستر و

ترک‌های صفحه‌ای یا شبه صفحه‌ای (Coplanar) و ترک‌های مورب (Oblique)، ترک‌های شبه صفحه‌ای تقریباً در راستای صفحه‌ی شکاف موجود ایجاد می‌گردند درحالی‌که ترک‌های مورب در این صفحه قرار ندارند و با زاویه بیشتری نسبت به شکاف موجود تشکیل می‌شوند (Haeri et al., 2014). ترک‌های ثانویه نقش مهمی در فرآیند ترک خوردن سنگ‌های تحت فشار ایفا می‌کنند، به هم پیوستن ترک‌ها نیز در بسیاری از موارد به وسیله ترک‌های ثانویه اتفاق می‌افتد. ترک‌های ثانویه مورب که تقریباً به موازات ترک‌های باله‌ای ایجاد می‌گردند فقط در برخی موارد مشاهده می‌شوند (Park and Bobet, 2009).

مطالعات مختلفی در خصوص اثر نوع الیاف بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن شامل تخلخل، وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، جذب آب، مقاومت تراکمی تک‌محوری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته توسط پژوهشگران مختلف در سرتاسر جهان صورت گرفته است؛ چویی و یوان در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که مقاومت فشاری بتن مسلح به ازای ۱ و ۱/۵ درصد الیاف شیشه، به ترتیب ۲۷/۵ و ۲۹/۳ درصد کاهش یافته است در حالی که مقاومت کششی بتن مسلح به ازای ۱ و ۱/۵ درصد الیاف شیشه، به ترتیب ۱۱ و ۲۱ درصد افزایش یافته است (Choi and Yuan, 2005). یازسی و همکاران در سال ۲۰۰۷ در پژوهشی که بر روی بتن مسلح حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی انجام شد، نشان دادند که سرعت امواج طولی با افزایش مقدار الیاف، ۱ الی ۹ درصد کاهش یافته است؛ مقاومت فشاری با افزایش الیاف، ۴ الی ۱۹ درصد و هم چنین مقاومت کششی با افزایش الیاف، ۱۱ الی ۵۴ درصد افزایش یافته است (Yazici et al., 2007). طاهری فرد و همکاران در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که مقاومت فشاری بتن مسلح به ازای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد

اطراف شکاف از پیش موجود نسبت به نوک شکاف) که در شکل ۲ نشان داده شده است. می‌توان دریافت که برای مقادیر β از ۰ تا ۲۲ درجه، شروع ترک‌های جدید در نوک شکاف از پیش موجود می‌باشد. با این وجود، برای زاویه $90^\circ > \beta > 22^\circ$ ، محل شروع ترک جدید به تدریج از نوک شکاف از پیش موجود، به سمت وسط آن منتقل می‌شود و با افزایش مقادیر β ، مقدار d نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۲. موقعیت شروع ترک در اطراف شکاف از پیش

موجود نسبت به نوک شکاف (Xiankai et al., 2017) این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که تأثیر شکست کششی هنگامی که β در این محدوده قرار دارد، بیشتر است. به عبارت دیگر، زاویه شکاف از پیش موجود در مقادیر کم (به عنوان مثال $22^\circ < \beta$) می‌تواند از وقوع شکست به صورت کششی جلوگیری کند. زاویه شروع ترک (θ) برای $\beta = 0$ ، صفر درجه بود (ترک به موازات زاویه شکاف از پیش موجود بود). سپس با افزایش β ، زاویه شروع ترک به تدریج افزایش می‌یابد. هنگامی که $\beta = 90^\circ$ درجه باشد، زاویه شروع ترک، به حداکثر مقدار یعنی 90° درجه رسیده است (Xiankai et al., 2017).

در این پژوهش به منظور بررسی اثر الیاف شیشه بر روی انتشار ترک حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I-II در بتن مسلح الیافی، نمونه‌های بتن الیافی حاوی الیاف شیشه به

آب در زاویه‌های انحراف ترک 0° ، 15° ، 30° ، 45° ، 60° و 75° و 90° درجه انجام داده اند. شعاع، ضخامت و طول ترک دیسک‌های برزلی ساخته شده به ترتیب 50 ، 32 و 30 میلی‌متر بوده است. از نتایج حاصل از آزمایشات مشخص گردید که زاویه بارگذاری و K_{II} با یکدیگر رابطه معکوس دارند و این در حالی است که K_{II} در زوایای 0° تا 45° درجه افزایش و سپس با افزایش زاویه بارگذاری یعنی زوایای 45° تا 90° درجه کاهش خواهد یافت. در زاویه 75° درجه ترک‌های باله‌ای با فاصله‌ای از نوک ترک شروع به رشد می‌نمایند؛ با افزایش زاویه بارگذاری یعنی در زاویه 90° درجه این فاصله افزایش و ترک‌های باله‌ای تقریباً از مرکز دیسک شروع به رشد می‌نمایند (Ghazvinian et al., 2013). شیانکایی (Xiankai) و همکاران مسیرهای انتشار ترک را در نمونه‌های دیسک برزلی ساخته شده از سنگ گچ با زاویه مختلف انحراف ترک برابر با 0° ، 7° ، 15° ، 22° ، 30° ، 45° ، 60° و 75° و 90° درجه بررسی کرده اند. وقتی $\beta = 0^\circ$ باشد، سطح ترک بسته نمی‌شود. از این رو ضریب اصطکاک نادیده گرفته می‌شود. هنگامی که $\beta = 90^\circ$ درجه باشد، نمونه در حالت کششی می‌شکند در این زاویه شکست از نوک ترک از پیش موجود گسترش نمی‌یابد، بلکه از مرکز شکاف شروع می‌شود که شبیه به شکستگی نمونه ساده برزلی است؛ نیروی شکست در زاویه قرارگیری ترک به صورت افقی ($\beta = 90^\circ$) بیشتر از حالت قائم ($\beta = 0^\circ$) است. ترک‌های جدید از نوک شکاف از پیش موجود شروع شده و در یک مسیر منحنی به سمت نقطه بارگذاری گسترش می‌یابند. ترک‌های کششی خالص فقط در حالتی که زاویه شکاف از پیش موجود (β)، برابر با 0° و 90° درجه باشد، به وجود می‌آیند که راستای آن‌ها تقریباً هم سو با جهت بارمحموری اعمال شده به نمونه‌ها بودند. با توجه به مطالعه الشایعه، شروع ترک شامل دو بخش است: زاویه شروع ترک (θ) و محل شروع ترک (d) (موقعیت شروع ترک در



شکل ۳. قالب‌های مخصوص ساخته شده با طرح دیسک
برزیلی دارای ترک مستقیم



شکل ۴. نمونه‌های دیسک برزیلی آماده شده داخل استخر
آب با شرایط استاندارد

نمونه‌های دیسک برزیلی پس از رسیدن به سن ۲۸ روز توسط مرکز یاب و نقاله، به اندازه‌ی زوایای موردنظر (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) اندازه‌گذاری شده و برای آزمایش تعیین چقرمگی شکست آماده می‌شوند. لوله‌هایی از جنس PVC (شکل ۵) تهیه و نمونه‌های استوانه‌ای که به کمک آن‌ها آماده گردیده بود (شکل ۶)، پس از رسیدن به سن ۲۸ روز توسط دستگاه برش به طول‌های موردنظر برش داده شده و جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه محوری، اولتراسونیک و تخلخل آماده می‌شوند.

میزان ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد حجم بتن برای انجام آزمایش روی دیسک برزیلی دارای ترک مرکزی برای تعیین چقرمگی شکست مود یک، دو و ترکیبی آماده شده است. علاوه بر این، فرآیند گسترش ترک از ترک‌های از پیش موجود در نمونه‌ها و همچنین چقرمگی شکست در حالت‌های I، II و حالت ترکیبی I-II بررسی شد. آزمایش دیسک برزیلی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای ترک از پیش موجود انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون پژوهشی در ایران روی چقرمگی شکست و انتشار ترک در بتن مسلح دارای الیاف شیشه انجام نشده است این مورد جزو نوآوری این پژوهش محسوب می‌شود.

۲. آماده سازی نمونه‌ها

۲۱ عدد دیسک برزیلی بتنی حاوی ۰/۲ درصد حجمی الیاف شیشه، ۲۱ عدد دیسک برزیلی بتنی حاوی ۰/۳۵ درصد حجمی الیاف شیشه و ۲۱ عدد دیسک برزیلی بتنی حاوی ۰/۵ درصد حجمی الیاف شیشه با طرح اختلاط مشابه به ضخامت متوسط ۲۵ و قطر ۷۵ میلی‌متر آماده شده است؛ در مرکز دیسک‌ها ترکی مصنوعی به طول متوسط ۱۵ میلی‌متر ایجاد شده است؛ در شکل ۳ و ۴ قالب‌های آماده سازی و نمونه‌های آماده شده دیسک برزیلی نشان داده شده است. چقرمگی شکست نمونه‌ها برای زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه ترک مرکزی نسبت به راستای بارگذاری محاسبه گردید. علاوه بر این، آزمایش‌های دیگری نیز جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و سه محوری، سرعت امواج اولتراسونیک و تخلخل روی نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده انجام شده است. نمونه‌های آماده شده در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است.

الیاف شیشه مورد استفاده در این تحقیق و ویژگی‌های این الیاف در جدول ۲ آورده شده است.

۳. آزمایش‌های انجام شده

جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی از دستگاه بارگذاری فشاری با قابلیت ثبت تنش و کرنش و فک‌های مخصوص آزمایش برزیلی استفاده شده است.

جدول ۲. ویژگی‌های الیاف شیشه مورد استفاده (کاتالوگ شرکت ایران برس، ۱۳۹۷).

Specifications of the PP fibers	Value
Diameter (μm)	15-30
Density (g/cm^3)	2.75
Modulus of elasticity (GPa)	70
Tensile strength (GPa)	3
Softening point ($^{\circ}\text{C}$)	530-540
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	550-560

برای تعیین تخلخل مؤثر نمونه‌ها روش اشباع نمونه در خلأ و غوطه‌وری و برای سرعت امواج طولی از دستگاه اولتراسونیک استفاده شده است. برای تعیین هر یک از خواص، ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و میانگین نتایج در جدول ذکر شده است. جهت تعیین چقرمگی شکست از آزمایش روی دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم استفاده شده است؛ این آزمایش توسط آواجی و ساتو در سال ۱۹۷۸ برای شکست مود ترکیبی در نمونه‌های گرافیت، گچ و سنگ مرمر توسعه داده شده است. اتکینسون در سال ۱۹۸۲ رابطه ضریب شدت تنش را برای این روش معرفی



شکل ۵. لوله‌های از جنس PVC برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی



شکل ۶. نمونه‌های استوانه‌ای حاوی بتن جهت آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی بتن

در جدول ۱ طرح اختلاط بتن الیافی که مشابه طرح اختلاط بتن ساده می‌باشد آورده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن مسلح به الیاف شیشه

Components	Weight per cubic meter of concrete (kg)
Type 2 Portland cement	350
Sand	1150
Gravel	700
Fibers	5.5, 9.625, 13.75
Fibers (vol% of concrete)	0.2, 0.35, 0.5
Superplasticizer (wt% of the cement)	0.8
Water/cement ratio	0.4

صفر می‌باشد؛ همچنین برای به دست آوردن زاویه مود دو خالص از رابطه (۵)، N_I را برابر با صفر قرار داده و زاویه محاسبه می‌شود (Krishnan et al., 1998).

$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (5)$$

که در آن مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی I-II می‌باشد (Funatsu et al., 2014).

۴. نتایج آزمایش

خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های بتن ساده و بتن حاوی الیاف شیشه در جدول ۳ و ۴ آورده شده است؛ برای تعیین هر یک از خواص، ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و میانگین نتایج در جدول ذکر شده است. در پژوهش حاضر استفاده از ۰/۲ درصد الیاف شیشه ۱/۱۹ درصد کاهش در مقاومت فشاری و ۱/۳ درصد افزایش در مقاومت کششی را باعث می‌شود؛ استفاده از ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد حجمی از این الیاف به ترتیب باعث ۷/۲ و ۴/۷ درصد افزایش در مقاومت فشاری و ۱۲/۷ و ۴/۲ درصد افزایش در مقاومت کششی نسبت به بتن بدون الیاف می‌شود. نتایج آزمایش چقرمگی شکست نمونه های بتن بدون الیاف در جدول ۵ و نمونه های حاوی الیاف شیشه در جدول ۶ آورده شده است.

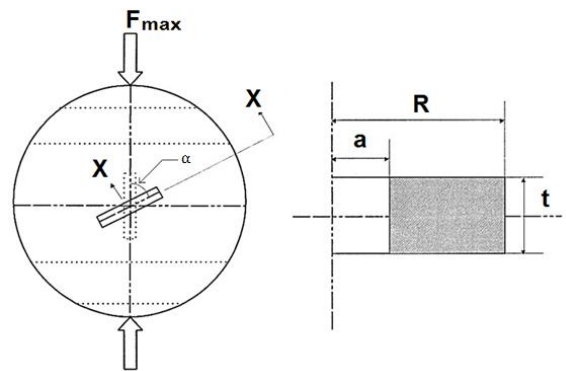
۵. تحلیل نتایج چقرمگی شکست و انتشار ترک

در این پژوهش به منظور بررسی روند انتشار ترک و چقرمگی شکست در حالت های مختلف، نمودارهای مربوطه رسم و با استفاده از عکس های گرفته شده نحوه شکست بررسی و نتایج ارائه شده است.

کرد. از این روش می‌توان در تعیین چقرمگی شکست مود، دو و ترکیبی استفاده کرد (Krishnan et al., 1998). در شکل ۷ هندسه نمونه دیسک برزیلی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

برای محاسبه چقرمگی شکست حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I-II از روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) استفاده می‌شود (Krishnan et al., 1998).

$$K_{IC} = \frac{F_{max}\sqrt{a}}{\sqrt{\pi R t}} N_I \quad (1)$$



شکل ۷. هندسه نمونه دیسک برزیلی (Krishnan et al., 1998)

$$N_I = 1 - 4 \sin^2 \alpha + 4 \sin^2 \alpha (1 - 4 \cos^2 \alpha) \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (2)$$

$$K_{IIC} = \frac{F_{max}\sqrt{a}}{\sqrt{\pi R t}} N_{II} \quad (3)$$

$$N_{II} = [2 + (8 \cos^2 \alpha - 5) \left(\frac{a}{R}\right)^2] \sin 2\alpha \quad (4)$$

که در آن K_{IC} و K_{IIC} به ترتیب چقرمگی شکست حالت I و حالت II، F_{max} بار در لحظه شکست، R شعاع دیسک، t ضخامت دیسک، a نصف طول ترک، α زاویه ترک نسبت به راستای بارگذاری و N_I و N_{II} ضریب بی‌بعد برای حالت I و حالت II در حالتی که نسبت a/R کوچک تر و یا مساوی با ۰/۳ باشد. برای محاسبه مود یک خالص زاویه α

جدول ۳. خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی ساده و نمونه‌های حاوی الیاف شیشه

Fiber percentage	Fiber type	Brazilian tensile strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)
conventional concrete	---	5.42	35.29
0.2	glass	5.49	34.87
0.35	glass	6.11	37.82
0.5	glass	5.65	36.95

جدول ۴. خواص فیزیکی نمونه‌های بتنی ساده و نمونه‌های حاوی الیاف شیشه

Fiber percentage	Fiber type	Dry specific weight (kN/m ³)	Longitudinal waves velocity (m/s)	Effective porosity (%)
conventional concrete	---	22.760	4892	6.37
0.2	glass	23.034	4876	6.39
0.35	glass	23.253	4802	6.42
0.5	glass	23.273	4791	6.59

جدول ۵. نتایج آزمایش چقرمگی شکست در نمونه‌های بدون الیاف

Specimen code	Loading angle (°)	Fracture mode	Crack initiation angle (°)	d (mm)	K _{IC} (MPa.m ^{1/2})	K _{IIIC} (MPa.m ^{1/2})	K _{eff} (MPa.m ^{1/2})
1-1	0	I	0	0	0.48	0	0.48
2-1	0	I	0	0	0.51	0	0.51
3-1	0	I	0	0	0.39	0	0.39
4-1	15	Mixed	21.1	0	0.31	0.46	0.55
5-1	15	Mixed	21.6	0	0.31	0.47	0.56
6-1	15	Mixed	23	0	0.31	0.47	0.56
7-1	28.83	II	25.1	0	0	0.59	0.59
8-1	28.83	II	32.4	0	0	0.74	0.74
9-1	28.83	II	28.5	0	0	0.71	0.71
10-1	45	Mixed	37.7	0	-0.43	0.78	0.89
11-1	45	Mixed	41.2	0	-0.42	0.77	0.88
12-1	45	Mixed	37.7	0	-0.42	0.75	0.86
13-1	60	Mixed	76.8	0	-0.73	0.59	0.94
14-1	60	Mixed	73.6	0	-0.83	0.68	1.07
15-1	60	Mixed	75.1	0	-0.79	0.65	1.02
16-1	75	Mixed	86.7	2.44	-1.17	0.41	1.24
17-1	75	Mixed	87	3.54	-1.24	0.43	1.31
18-1	75	Mixed	85	2.77	-1.25	0.43	1.32
19-1	90	I	90	6.25	-1.39	0	1.39

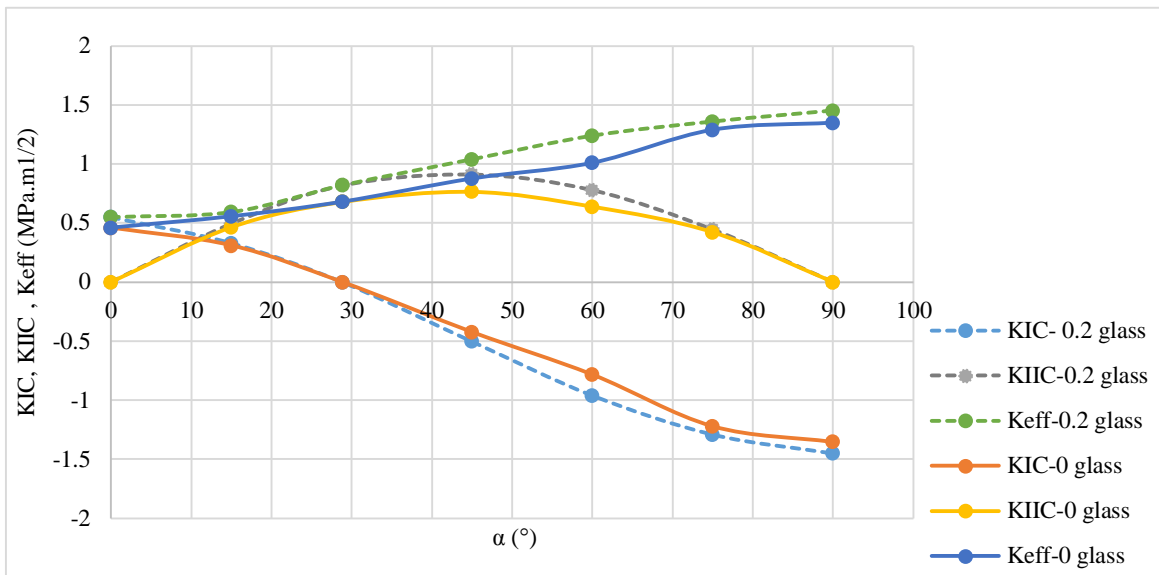
جدول ۶. نتایج آزمایش چقرمگی شکست در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف شیشه

Specimen code	Loading angle(°)	Fiber content (vol% of concrete)	Fracture mode	Crack initiation angle(°)	d (mm)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	K_{IIC} (MPa.m ^{1/2})	K_{eff} (MPa.m ^{1/2})
A4	0	0.2	I	0	0	0.58	0	0.58
A5	0	0.2	I	0	0	0.53	0	0.53
A6	0	0.2	I	0	0	0.54	0	0.54
G1	15	0.2	Mixed	39	0	0.31	0.47	0.56
G2	15	0.2	Mixed	29	0	0.37	0.56	0.67
G3	15	0.2	Mixed	34.5	0	0.31	0.46	0.55
B4	28.83	0.2	II	48.6	0	0	0.71	0.71
B5	28.83	0.2	II	45	0	0	0.88	0.88
B6	28.83	0.2	II	44.7	0	0	0.87	0.87
G4	45	0.2	Mixed	61.6	0	-0.49	0.90	1.02
G5	45	0.2	Mixed	62	0	-0.55	0.99	1.13
G6	45	0.2	Mixed	58.8	0	-0.47	0.85	0.97
E1	60	0.2	Mixed	79.4	0	-0.95	0.77	1.22
E2	60	0.2	Mixed	80.1	0	-1.04	0.84	1.34
E3	60	0.2	Mixed	76.4	0	-0.90	0.74	1.16
E4	75	0.2	Mixed	89	2.31	-1.27	0.44	1.34
E5	75	0.2	Mixed	86.8	2.25	-1.20	0.42	1.27
E6	75	0.2	Mixed	86.3	2.14	-1.39	0.48	1.47
I1	90	0.2	I	90	3.84	-1.45	0	1.45
I2	90	0.2	I	90	4.36	-1.43	0	1.43
I3	90	0.2	I	90	4.27	-1.48	0	1.48
g-B-1	0	0.35	I	0	0	0.55	0	0.55
g-B-2	0	0.35	I	0	0	0.55	0	0.55
o-g-B-1	0	0.35	I	0	0	0.43	0	0.43
g-B-3	15	0.35	Mixed	33.2	0	0.30	0.45	0.54
g-B-4	15	0.35	Mixed	24.3	0	0.30	0.45	0.54
o-g-B-2	15	0.35	Mixed	29.4	0	0.35	0.53	0.63
g-B-5	28.83	0.35	II	40	0	0	0.79	0.79
g-B-6	28.83	0.35	II	37.8	0	0	0.75	0.75
g-B-7	28.83	0.35	II	48.8	0	0	0.77	0.77
g-B-8	45	0.35	Mixed	68.9	0	-0.48	0.88	1
g-B-9	45	0.35	Mixed	58.3	0	-0.49	0.88	1.01
g-B-10	45	0.35	Mixed	53.2	0	-0.47	0.85	0.97
g-B-11	60	0.35	Mixed	75.1	0	-0.96	0.78	1.24
g-B-12	60	0.35	Mixed	78.5	0	-0.95	0.77	1.22
o-g-B-3	60	0.35	Mixed	78.1	0	-0.94	0.77	1.21
g-B-13	75	0.35	Mixed	81.6	3.03	-1.19	0.41	1.26

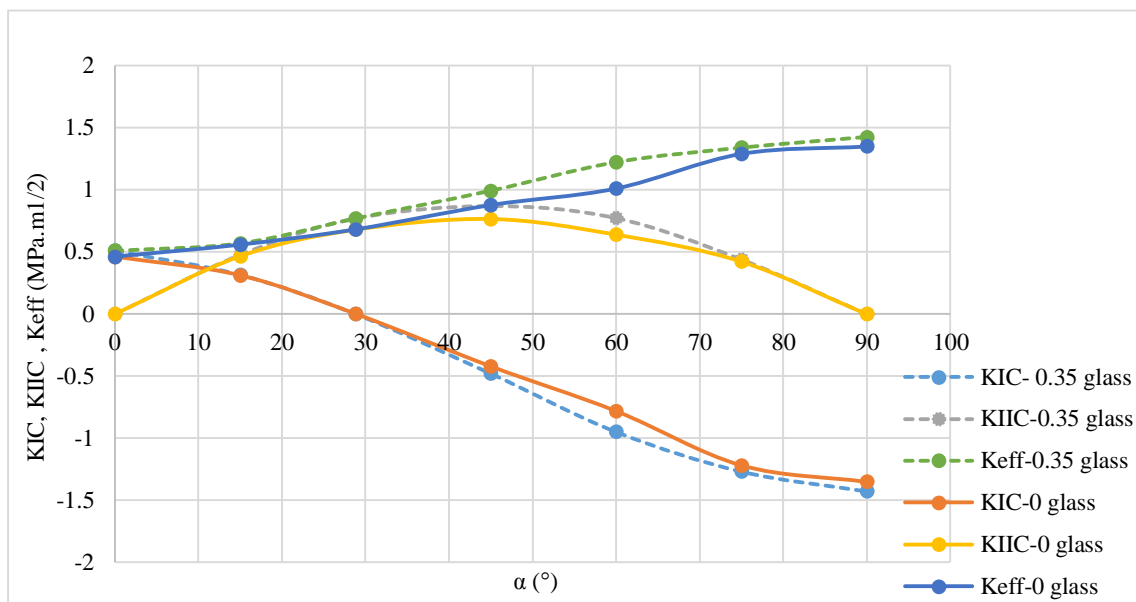
g-B-14	75	0.35	Mixed	83	2.54	-1.23	0.43	1.30
o-g-B-4	75	0.35	Mixed	87	2.48	-1.38	0.48	1.46
g-B-15	90	0.35	I	90	4.58	-1.39	0	1.39
g-B-16	90	0.35	I	90	4.38	-1.49	0	1.49
o-g-B-5	90	0.35	I	90	5.04	-1.40	0	1.40
G1B1	0	0.5	I	0	0	0.48	0	0.48
D-G1-B1	0	0.5	I	0	0	0.48	0	0.48
D-G3-B3	0	0.5	I	0	0	0.49	0	0.49
G2-B2	15	0.5	Mixed	28.1	0	0.31	0.46	0.55
D-G2-B2	15	0.5	Mixed	29.8	0	0.32	0.48	0.58
D-G4-B4	15	0.5	Mixed	31	0	0.31	0.47	0.56
G3-B3	28.83	0.5	II	40	0	0	0.77	0.77
D-G5-B5	28.83	0.5	II	44.6	0	0	0.77	0.77
D-G6-B6	28.83	0.5	II	45	0	0	0.74	0.74
D4B4	45	0.5	Mixed	57.6	0	-0.47	0.85	0.97
D-G7-B7	45	0.5	Mixed	60	0	-0.46	0.84	0.96
D-G8-B8	45	0.5	Mixed	56.9	0	-0.46	0.84	0.96
G5B5	60	0.5	Mixed	71.6	0	-0.85	0.69	1.09
D-G9-B9	60	0.5	Mixed	69.2	0	-0.83	0.67	1.07
D-G10-B10	60	0.5	Mixed	67.2	0	-1.02	0.70	1.24
G6B6	75	0.5	Mixed	85.9	2.22	-1.34	0.46	1.42
D-G11-B11	75	0.5	Mixed	87.9	2.65	-1.21	0.42	1.28
D-G12-B12	75	0.5	Mixed	85.8	3.25	-1.18	0.41	1.25
G7B7	90	0.5	I	90	4.11	-1.35	0	1.35
D-G13-B13	90	0.5	I	90	3.84	-1.42	0	1.42
D-G14-B14	90	0.5	I	90	4.95	-1.39	0	1.39

در زاویه ۲۸/۸۳ درجه اتفاق می‌افتد در بتن مسلح ۲۰/۶ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش می‌یابد. مقدار موثر چقرمگی شکست حالت ترکیبی I-II بتن مسلح حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه در زوایای ۰، ۱۵، ۲۸/۸۳، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ به ترتیب، ۱۹/۶، ۶/۶، ۲۰/۶، ۱۸/۶، ۲۲/۸، ۵/۴ و ۷/۶ درصد بیشتر از بتن بدون الیاف می‌باشد.

منحنی $K_{IC-\alpha}$ ، $K_{IIc-\alpha}$ و $K_{eff-\alpha}$ برای بتن الیافی دارای ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد الیاف شیشه به ترتیب در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج ارائه در شکل ۸ نشان می‌دهد که چقرمگی شکست حالت I برای ۰/۲ درصد مصرف الیاف در بتن مسلح ۱۹/۶ درصد در زاویه ۰ درجه و ۷/۲ درصد در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بتن بدون الیاف افزایش می‌یابد. چقرمگی شکست حالت برشی خالص که



شکل ۸. منحنی $K_{IIC-\alpha}$ ، $K_{IC-\alpha}$ و $K_{eff-\alpha}$ برای بتن الیافی دارای ۰/۲ درصد الیاف شیشه

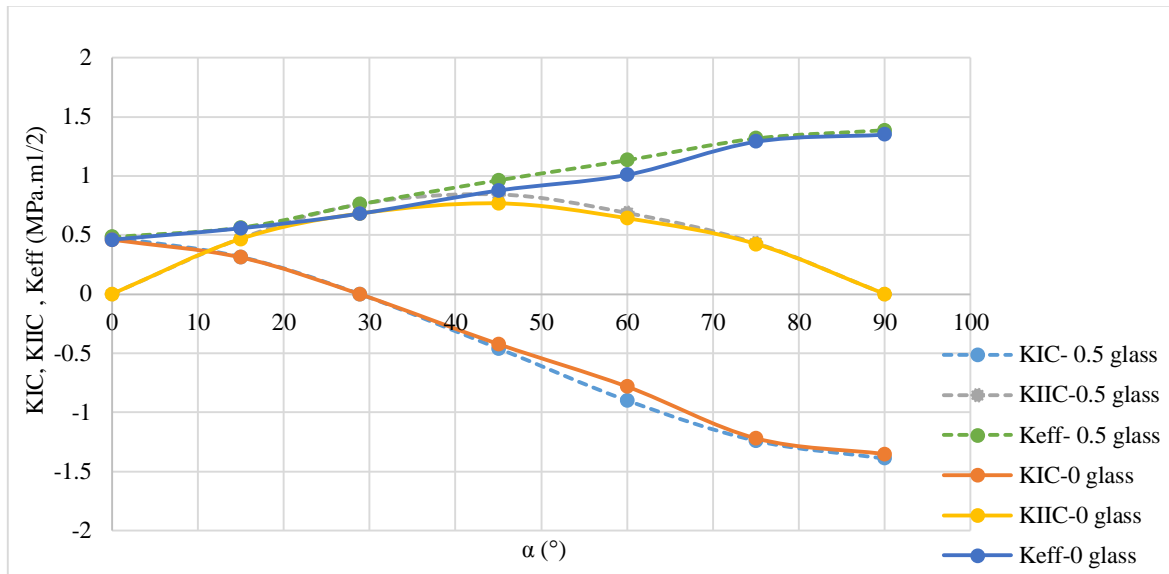


شکل ۹. منحنی $K_{IIC-\alpha}$ ، $K_{IC-\alpha}$ و $K_{eff-\alpha}$ برای بتن الیافی دارای ۰/۳۵ درصد الیاف شیشه

است. چقرمگی شکست حالت برشی خالص که در زاویه ۲۸/۸۳ درجه اتفاق می‌افتد در بتن مسلح ۱۳/۲ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش می‌یابد. مقدار موثر چقرمگی شکست حالت ترکیبی I-II بتن مسلح حاوی ۰/۳۵

نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که چقرمگی شکست حالت I برای بتن الیافی دارای ۰/۳۵ درصد الیاف شیشه در بتن مسلح ۱۰/۹ درصد در زاویه ۰ درجه و ۵/۷ درصد در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بتن بدون الیاف بیشتر

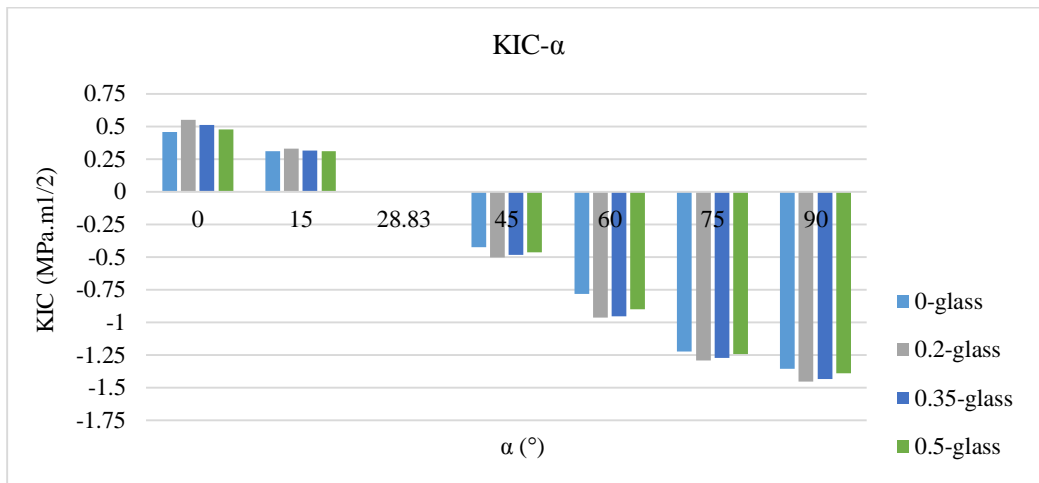
درصد الیاف شیشه در تمامی زوایا بیشتر از بتن بدون الیاف می باشد.



شکل ۱۰. منحنی $K_{IC}-\alpha$ ، $K_{IIC}-\alpha$ و $K_{eff}-\alpha$ برای بتن الیافی دارای ۰/۵ درصد الیاف شیشه

می شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجاکه الیاف در جسم بتن به طور سه بعدی و به بیانی بهتر چندبعدی پراکنده می شود در صورت تشکیل یک ترک، الیاف در جهات مختلف اتصالاتی را به وجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می نماید (حسامی و بزرگ نیا، ۱۳۹۷). نمودار ستونی چقرمگی شکست برای حالت های مختلف، برای بتن مسلح الیافی با درصدهای مختلف الیاف شیشه در مقایسه با بتن بدون الیاف به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

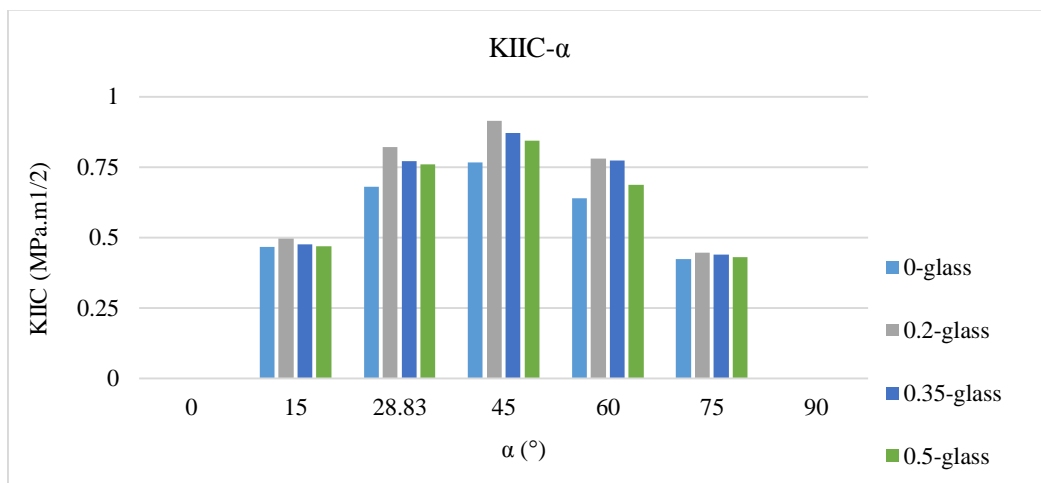
نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می دهد که چقرمگی شکست حالت I برای بتن الیافی دارای ۰/۵ درصد الیاف شیشه ۴/۳ درصد در زاویه ۰ درجه و ۲/۷ درصد در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بتن بدون الیاف افزایش می یابد. چقرمگی شکست حالت برشی خالص که در زاویه ۲۸/۸۳ درجه اتفاق می افتد در بتن مسلح ۱۱/۸ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش می یابد. مقدار موثر چقرمگی شکست حالت ترکیبی I-II بتن مسلح حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه در تمامی زوایا بیشتر از بتن بدون الیاف می باشد. چقرمگی بالای بتن الیافی نسبت به بتن فاقد الیاف باعث



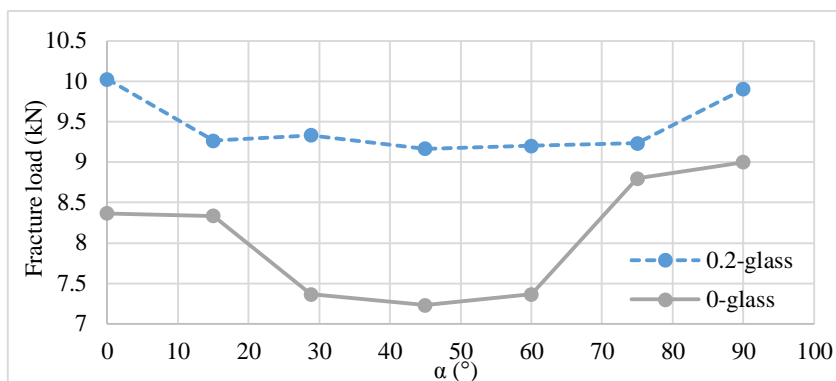
شکل ۱۱. نمودار ستونی چقرمگی شکست، برای بتن مسلح الیافی با درصدهای مختلف الیاف مصرفی شیشه

شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ رابطه بین بار لحظه شکست و زاویه بین راستای ترک و راستای بارگذاری (α) در بتن حاوی ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد الیاف شیشه نشان داده شده است.

از نمودار ستونی شکل ۱۱ مشخص است که افزودن الیاف با هر مقدار سبب افزایش چقرمگی شکست خواهد شد؛ حال آنکه بیشترین افزایش مربوط به چقرمگی شکست در نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف در نمونه های بتن می‌باشد. از نمودار ستونی شکل ۱۲ مشخص است که بیشترین میزان افزایش در چقرمگی شکست حالت II مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف می‌باشد. در

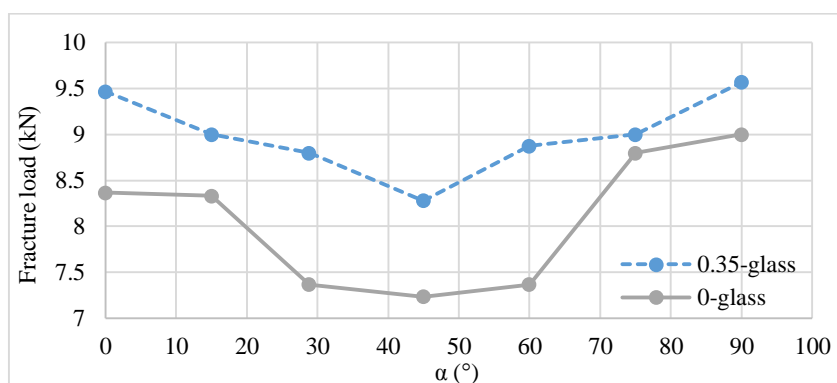


شکل ۱۲. نمودار ستونی چقرمگی شکست، برای بتن مسلح الیافی با درصدهای مختلف الیاف مصرفی شیشه

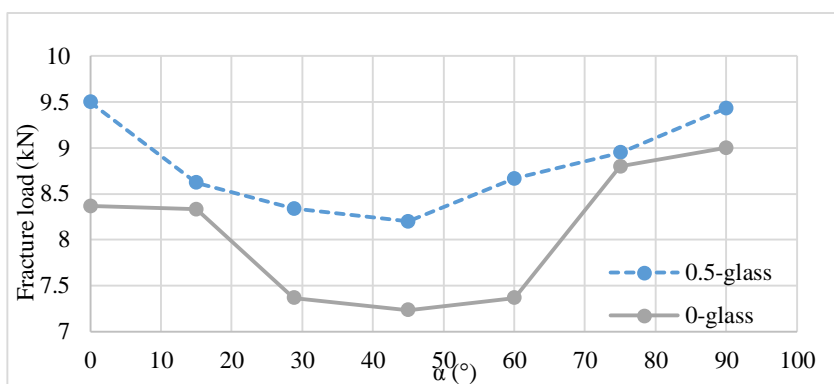


شکل ۱۳. رابطه بین بار لحظه شکست و زاویه بین راستای ترک و راستای بارگذاری (α) در بتن حاوی ۰/۲ درصد الیاف

شیشه



شکل ۱۴. رابطه بین بار لحظه شکست و زاویه بین راستای ترک و راستای بارگذاری (α) در بتن حاوی ۰/۳۵ درصد الیاف

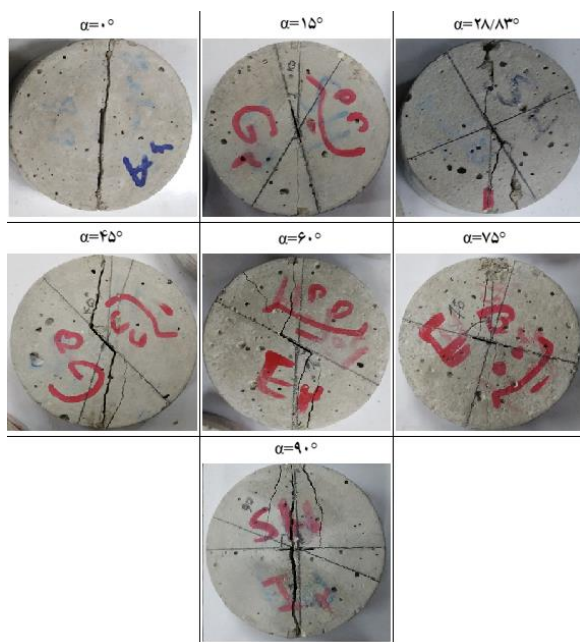


شکل ۱۵. رابطه بین بار لحظه شکست و زاویه بین راستای ترک و راستای بارگذاری (α) در بتن حاوی ۰/۵ درصد الیاف

شیشه

نمونه‌های فاقد الیاف می‌باشد. با توجه به نمودارهای بار شکست، ملاحظه می‌گردد شیب تغییرات نمودار، با افزایش

نمودارهای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد که بار لحظه‌ی شکست در تمامی نمونه‌های بتن حاوی الیاف بیش از

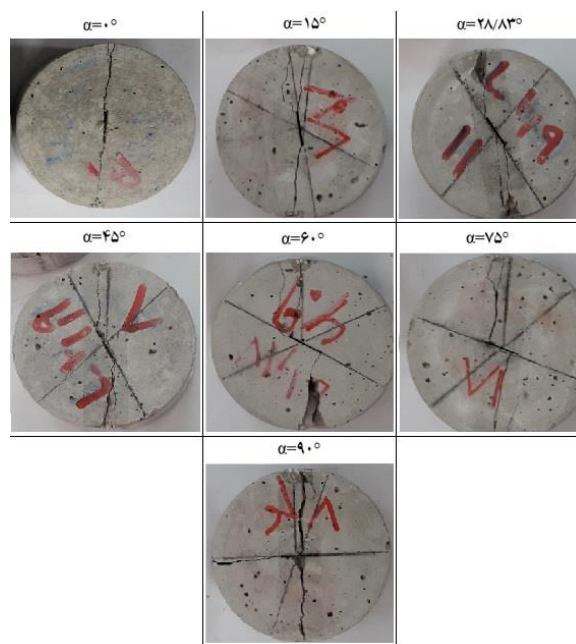


شکل ۱۷. نحوه شکست نمونه‌های بتنی حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه

در شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ رابطه بین زاویه راستای بارگذاری و ترک از پیش موجود (α) با زاویه شروع ترک به ترتیب برای بتن حاوی ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد حجمی الیاف شیشه در بتن مسلح الیافی نشان داده شده است. با بررسی روند تغییرات زاویه شروع گسترش ترک نسبت به زاویه انحراف پیش‌ترک در شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود با بیشتر شدن زاویه‌ی ترک نسبت به راستای بارگذاری، زاویه شروع ترک نیز افزایش می‌یابد. گسترش ترک در زوایای ۶۰ و کمتر از آن از نوک پیش‌ترک آغاز می‌شود، این در حالی است که برای زوایای ۷۵ درجه و بزرگ‌تر از آن ترک‌های باله‌ای با فاصله d از نوک ترک شروع و به سمت محل بارگذاری گسترش می‌یابند. با افزایش زاویه بارگذاری و در نهایت قرار گرفتن ترک به حالت افقی این زاویه نیز به ۹۰ درجه می‌رسد. این روند با نتایج تحقیقات پیشین مطابقت دارد. در پژوهش حال

زاویه‌ی انحراف پیش‌ترک در زوایای بین ۰ تا ۴۵ درجه منفی و سپس با افزایش زاویه از ۴۵ تا ۹۰ درجه مثبت می‌باشد مشخص می‌شود هنگامی که زاویه انحراف ترک ۴۵ درجه باشد، حداقل نیرو برای شکست سنگ لازم است. با توجه به نتایج حاصله مشخص می‌شود که استفاده از ۰/۲ درصد از الیاف شیشه در بتن تا ۲۶/۷ درصد بار لحظه شکست را در زاویه ۴۵ درجه نسبت به بتن فاقد الیاف بهبود می‌بخشد.

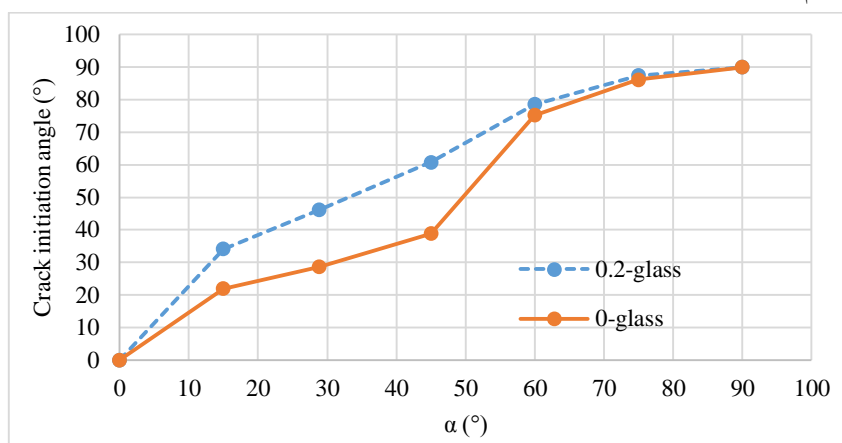
در شکل ۱۶ نحوه شکست نمونه‌های بتنی فاقد الیاف و در شکل ۱۷ نحوه شکست نمونه‌های بتنی حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه نشان داده شده است.



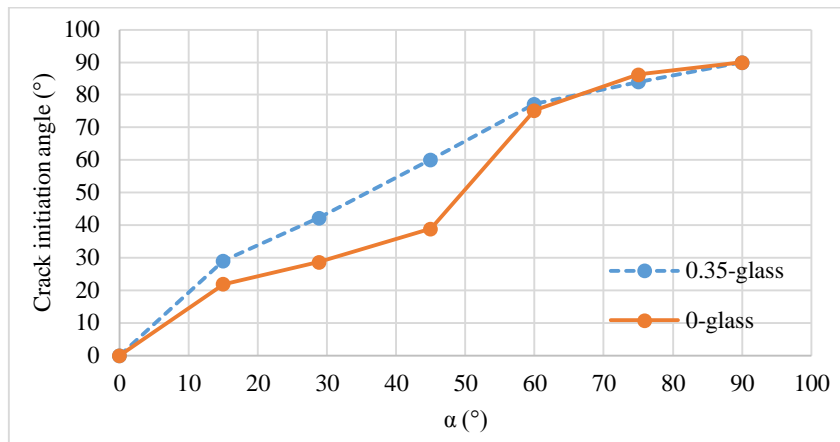
شکل ۱۶. نحوه شکست نمونه‌های بتنی فاقد الیاف

نمونه های بتن حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه دارای بیشترین مقدار موثر چقرمگی شکست مود ترکیبی I-II نسبت به بتن بدون الیاف و بتن مسلح حاوی ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد الیاف شیشه بوده است. در نتیجه در ادامه فقط نحوه شکست نمونه های بتن مسلح حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه شکست این نمونه ها به گونه ای است که در حالت زاویه انحراف صفر درجه، همانند نمونه های بدون ترک با مکانیزم کشش غیر مستقیم در راستای قائم می شکند. در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۱۵ درجه تحت بارگذاری، از دو نوک ترک، ترک های کششی با زاویه ۳۴ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند.

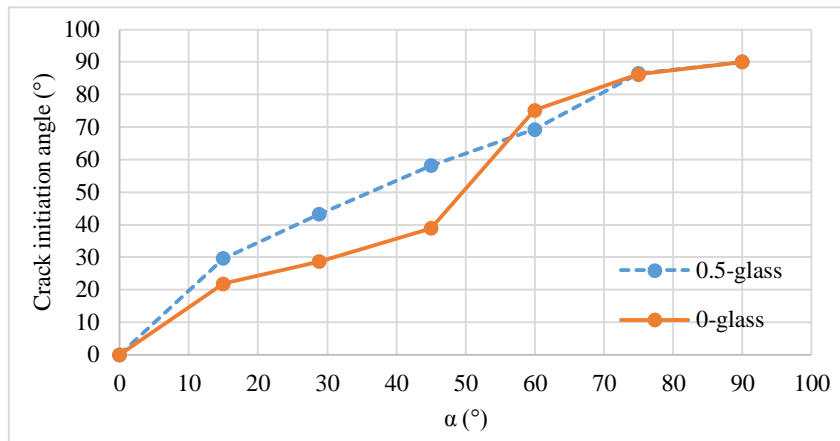
حاضر، نکته جالب توجه این است که در نمونه های مورد مطالعه با هر میزان الیاف شیشه، ترک های باله ای با انحنای بیشتری رشد پیدا کرده و پس از آن با راستای بارگذاری هم سو می شوند. به همین دلیل زاویه شروع ترک در نمونه های حاوی الیاف بیش از زاویه شروع ترک در نمونه های فاقد الیاف می باشد. این تأثیر در میزان الیاف مصرفی ۰/۲ درصد در تمامی زوایا قابل مشاهده می باشد. در زاویه ۴۵ درجه، در بتن مسلح حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه ۵۶/۴ درصد افزایش در زاویه شروع ترک را نسبت به بتن بدون الیاف شاهد بوده ایم. چنانچه پیش تر گفته شد در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه، ترک های باله ای با فاصله d از نوک پیش ترک شروع به رشد می نمایند؛ نکته جالب توجه این است که برای بتن مسلح حاوی الیاف شیشه این فاصله به مراتب کم تر از بتن فاقد الیاف می باشد. در نمونه های بتن حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه بیشترین کاهش در مقدار فاصله d یعنی ۲۰/۲ درصد و ۲۴/۵ درصد به ترتیب در زوایای ۷۵ و ۹۰ را نسبت به بتن بدون الیاف شاهد هستیم.



شکل ۱۸. رابطه بین زاویه راستای بارگذاری و ترک از پیش موجود (α) با زاویه شروع گسترش ترک در بتن حاوی ۰/۲ درصد الیاف شیشه



شکل ۱۹. رابطه بین زاویه راستای بارگذاری و ترک از پیش موجود (α) با زاویه شروع گسترش ترک در بتن حاوی ۰/۳۵ درصد الیاف شیشه



شکل ۲۰. رابطه بین زاویه راستای بارگذاری و ترک از پیش موجود (α) با زاویه شروع گسترش ترک در بتن حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه

ترک، ترک های باله ای با زاویه ۷۹ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۷۵ درجه تحت بارگذاری، از نزدیکی دو نوک ترک (نه نوک ترک)، ترک های باله ای با زاویه ۸۷ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۹۰ درجه (ترک افقی)، ابتدا یک ترک با فاصله d از نوک ترک در نیم دایره ی پایینی دیسک

در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۲۸/۸۳ درجه تحت بارگذاری، از دو نوک ترک، ترک های باله ای با زاویه ۴۶ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۴۵ درجه تحت بارگذاری، از دو نوک ترک، ترک های باله ای با زاویه ۶۱ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های با زاویه انحراف ترک ۶۰ درجه تحت بارگذاری، از دو نوک

دیسک و به موازات راستای بارگذاری منتشر می‌شود. نکته جالب توجه در تحقیق حاضر این مساله است که افزودن الیاف سبب افزایش زاویه شروع ترک گردید. بنابراین در نمونه‌های حاوی الیاف، ترک با زاویه‌ی بیشتری شروع و سپس به سمت نقطه بارگذاری در لبه دیسک گسترش می‌یابد.

- شروع ترک در زوایای انحراف ترک ۶۰ درجه و کم‌تر از آن، با رشد ترک‌های باله‌ای از نوک شکاف موجود انجام می‌شود ولی با افزایش زاویه انحراف ترک و رسیدن به زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه، شروع ترک با فاصله d از نوک پیش‌ترک رخ می‌دهد. با افزودن الیاف، نحوه شکست در زوایای انحراف ترک ۷۵ و ۹۰ درجه به گونه‌ای است که فاصله‌ی d نسبت به نمونه‌های فاقد هرگونه الیاف کم‌تر شده است. این بدان معنی است که در این زوایا نمونه‌های بتن مسلح برخلاف نمونه‌های فاقد الیاف از مرکز دیسک شروع به شکستن نمی‌نماید.
- نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها، با تغییرات زاویه انحراف ترک از ۰ به ۴۵ کاهش و با تغییر از ۴۵ به ۹۰ افزایش یافته است.

منشعب شده به مرز پایینی می‌رسد و سپس یک ترک دیگر در همان نقطه در نیم دایره بالایی دیسک منشعب شده به مرز بالایی می‌رسد. سپس دو ترک ثانویه دقیقاً از نوک ترک اصلی منشعب شده و به مرز بالایی می‌رسند.

۶. نتیجه گیری

- در تحقیق حاضر تاثیر الیاف شیشه بر چقرمگی شکست و انتشار ترک حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I-II در بتن مسلح الیافی بررسی گردید. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های دیسک برزلی دارای ترک مرکزی حاوی ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ درصد الیاف شیشه و در زوایای انحراف ترک ۰، ۱۵، ۲۸/۸۳، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه انجام گردید. در هر زاویه سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج این تحقیق به شرح ذیل است:
- نمونه‌های دارای ۰/۲ درصد الیاف شیشه بالاترین چقرمگی شکست را در بین نمونه‌های موجود داشت.
- در تمامی نمونه‌های مورد آزمون، با افزایش زاویه انحراف ترک، زاویه شروع ترک نیز افزایش می‌یابد. با ادامه بارگذاری ترک‌های باله‌ای ایجاد شده در مسیری منحنی شکل به سمت لبه‌ی

منابع

- اقتداری، م.، قنبری، ا.، ۱۳۹۸. مطالعه آزمایشگاهی اثرات الیاف شیشه بر مقاومت مکانیکی بتن و مقایسه با بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، سومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، تهران، انجمن بتن ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- پایرو، پ.، ۱۳۹۲. بتن مسلح الیافی، انتشارات فرهنگ و دانش.
- جباری، الف. و حسینی، م. ۱۳۹۶. مروری بر متداول‌ترین آزمایشات چقرمگی شکست مود دوم اجرا شده بر روی نمونه‌های سنگ، دهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۳۰-۳۱ فروردین، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

حائری، ه.؛ شهریار، ک.، فاتحی مرچی، م.، معارف وند، پ.، ۱۳۹۲. استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی در تحلیل مکانیسم انتشار ترک‌ها در مواد شبه سنگی، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۳(۵): ۳۸-۴۹.

حسامی، س.، بزرگ نیا، ا.، ۱۳۹۷. رفتار شکست روسازی‌های بتنی حاوی الیاف، سومین کنفرانس بین‌المللی و چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران و طراحی شهری، تبریز.

کریم داداشی، ر.؛ مهدی بناب، م.، قایدی، ح.، ۱۳۹۶. مکانیک شکست، نشر عطران.

کاتالوگ شرکت ایران برس، ۱۳۹۷.

- Anderson, T.L., 1994., Fracture mechanics, fundamentals and application.
- Ayatollahi, M.R. and Aliha, M.R.M., 2008. On the use of Brazilian disk specimen for calculating mixed mode I-II fracture toughness of rock materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 75:4631-4641.
- Behnia, M., Goshtasbi, K., Marji, M.F., Golshani, A., 2014. Numerical simulation of crack propagation in layered formations, *Arabian Journal of Geosciences* 7 (7): 2729-2737.
- Choi, Y. and Yuan, R., 2005. Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC, *Cement and Concrete Research*, 35: 1587-1591.
- Erarslan, N., 2019. Analysing mixed mode (I-II) fracturing of concrete discs including chevron and straight through notch cracks, *International Journal of Solids and Structures*, 167: 79-92.
- Funatsu, T., Kuruppu, M., Matsui, K. 2014. Effect of temperature and confining pressure on mixed mode (I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67:1-8.
- Ghazvinian, A., Nejati, H., Sarfarazi, V., Hadei, M., 2013. Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials, *Arab J Geosci* 6: 4435-4444.
- Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P., 2014. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67: 20-28.
- Haeri, H., Sarfarazi, V., Fatehi Marji, M., & Hedayat, A., 2016. Experimental and Numerical Study of Shear Fracture in Brittle Materials with Interference of Initial Double Cracks. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29 (5): 555-566.
- Krishnan, G.R.; Zhao, X.L.; Zaman, M. and Roegiers, J.C., 1998. Fracture Toughness of a Soft Sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35(6): 695-710.
- Lou, L., Li, X., Qiu, J., Zhu, Q., 2017. Study on Fracture Initiation and Propagation in a Brazilian Disc with a Preexisting Crack by Digital Image Correlation Method, *Materials Science and Engineering*, Article id 2493921, 13 pages.
- Park, C.H., Bobet A., 2010. Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression, *Engin. Fract. Mech.*, 77: 2727-2748.
- Park, C.H. & Bobet, A., 2009. Crack Coalescence in Specimens with open and closed flaws: A Comparison". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (46)5: 819-829.
- Taheri Fard, A., Soheili, H., Ramzani, S., Ahmadi, P., 2016. Combined Effect of Glass Fiber and Polypropylene Fiber on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, *Magazine of Civil Engineering*, Issue 2:26-31.
- Xiankai, B., Meng, T., Jinchang, Z., 2017. Study of mixed mode fracture toughness and fracture trajectories in gypsum interlayers in corrosive environment, *Royal Society Open Science*, 5(1): 171374.
- Yazici, S., Inan, G., Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21: 1250-1253.