



بررسی آزمایشگاهی اثر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر چقرمگی شکست بتن

دانیال فخری، مهدی حسینی*، مهدی مهدی خانی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

کلمات کلیدی:

میکروسیلیس
پودر سنگ آهک
چقرمگی شکست
بتن، دیسک برزیلی

خلاصه: چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین خواص بتن است که شرایط گسترش ترک و در نهایت شکست بتن را کنترل می‌کند. در این تحقیق با استفاده از آزمون روی دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم، پیش‌بینی روند انتشار ترک و چقرمگی شکست در نمونه‌های بتن معمولی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و نمونه‌های بتن معمولی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بررسی شده است. میکروسیلیس جایگزین ۱۰ درصد وزنی سیمان و پودر سنگ آهک جایگزین ۵ درصد وزنی سیمان شده است. فرآیند گسترش ترک از شکاف‌های از پیش موجود در نمونه‌ها و همچنین چقرمگی شکست در حالت‌های I، II و حالت ترکیبی I-II بررسی شد. آزمایش چقرمگی شکست روی نمونه‌های دیسک برزیلی در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، 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 ۶۰ درجه ($\alpha < 60^\circ$)، از نوک ترک از پیش موجود اتفاق می‌افتد و با ادامه‌ی بارگذاری مسیر رشد و انتشار ترک به راستای بارگذاری نزدیک می‌شود. این در حالی است که برای زوایای ۶۰ درجه و بزرگ‌تر از آن، شروع ترک با فاصله d از نوک ترک آغاز می‌گردد. این فاصله در نمونه‌های بتن معمولی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بیشتر از نمونه‌های بتن معمولی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک است. نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک چقرمگی شکست حالت I، II و ترکیبی I-II بالاتری را نسبت به نمونه‌های فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک دارد.

۱- مقدمه

بتن در مفهوم وسیع به هر ماده یا ترکیبی که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد گفته می‌شود. بتن یکی از مهم‌ترین مواد ساختمانی است و مصرف آن در همه کشورها و مناطق جهان، به دلایل متعدد در حال افزایش است. مطالعه تولید، گسترش و به هم پیوستن این ترک‌ها در پیش‌بینی فرآیند شکست سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کنند؛ زیرا ترک‌ها به‌عنوان هسته‌ای بحرانی می‌توانند برای شکست نمونه سنگی باشند که از به هم پیوستن و رشد متناوب آن‌ها، شکست نهایی سنگ یا بتن اتفاق می‌افتد [۱]. چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی است که شرایط گسترش ترک و در نهایت شکست سنگ را کنترل می‌کند؛ شرایط بحرانی یک قطعه ترک‌دار در علم مکانیک شکست با استفاده از شدت تنش موجود در نوک ترک تخمین زده می‌شود. ضریب شدت تنش (K) مقدار تنش موضعی را در نوک ترک تعیین می‌کند [۲]. امروزه از مواد افزودنی

همچون پودر سیلیس در ابعاد مختلف و افزودنی‌های دیگر همچون پودر سنگ آهک برای افزایش مقاومت بتن و کاهش فضای خالی بین دانه‌ها برای تحمل بیشتر در مقابل فشار و زودگیری ملات بتن استفاده می‌شود. بنابراین ضروری است که تأثیر این مواد روی روند انتشار ترک و چقرمگی شکست بررسی گردد تا بتوان از نتیجه آن در طراحی سازه‌های بتنی بهره‌جست و آسیب‌های ناشی از این فرایند را تا حد امکان کاهش داد. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر چقرمگی شکست حالت I، حالت II و حالت ترکیبی I-II بتن تحت زاویه بارگذاری مختلف پرداخته شده است.

با استفاده از میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در مخلوط بتن، مقاومت کششی، خمشی، ضربه، خستگی و مقاومت در برابر سایش، قابلیت تغییر شکل، ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی به طور قابل توجهی تغییر و افزایش پیدا می‌کند [۳].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir



استفاده از میکروسیلیس و پودرسنگ آهک در بتن منجر به تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن می‌شود. از این رو پژوهش‌هایی در خصوص تأثیر مواد افزودنی همچون میکروسیلیس و دیگر افزودنی‌ها بر روی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و چقرمگی شکست بتن توسط محققان مختلف صورت گرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

نتایج پژوهش قاسم زاده و همکاران نشان می‌دهد با جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش آن برای ۱۰٪ میکروسیلیس و ۳٪ نانوسیلیس به ترتیب ۳۲٪ و ۴۳٪ می‌باشد. افزایش مقاومت کششی با جایگزینی میکروسیلیس تنها و ترکیبی با ۳٪ نانوسیلیس به جای سیمان به ترتیب در حدود ۲۵٪ و ۳۳٪ می‌باشد [۴].

در پژوهش کو و ژانگ که از پودر شیشه و میکروسیلیس استفاده شده است، مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد برای بتن دارای پودر شیشه، ۲۰ الی ۲۸ درصد برای بتن حاوی میکروسیلیس و ۲۰ الی ۳۸ درصد برای بتن حاوی پودر شیشه و میکروسیلیس؛ مقاومت خمشی بین ۱۱ الی ۱۶ درصد برای بتن دارای پودر شیشه، ۱۱ الی ۱۵ درصد برای بتن حاوی میکروسیلیس و ۱۱ الی ۲۰ درصد برای بتن حاوی پودر شیشه و میکروسیلیس؛ و انرژای شکست بین ۱۵ تا ۱۷ درصد برای بتن دارای پودر شیشه، ۱۵ الی ۲۴ درصد برای بتن حاوی میکروسیلیس و ۱۵ الی ۱۹ درصد برای بتن حاوی پودر شیشه و میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی افزایش می‌یابد. (تمامی نمونه‌ها دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس است و در طرح‌های مختلف حاوی ۱۰-۳۰ درصد حجمی پودر شیشه و ۱۵-۵۰ درصد حجمی میکروسیلیس ساخته شده‌اند) [۵].

در پژوهش خوش کالمیان و قریشی که از سیلیس، میکروسیلیس و نانوسیلیس استفاده شده است، نتیجه‌های به دست آمده نشان از بهبود خصوصیت‌های مکانیکی بتن سبک به ازای استفاده از نانوسیلیس تا ۴٪ وزن سیمان می‌دهد. در اثر ترکیب نانو با میکروسیلیس و تأثیر آن در خصوصیت مکانیکی بتن‌ها مشخص شد که بالاترین مقاومت فشاری در استفاده از ۲٪ نانوسیلیس و ۸٪ میکروسیلیس حاصل می‌شود. ولی ترکیب نانوسیلیس با درصد‌های بیشتر از ۸٪ میکروسیلیس باعث کاهش خواص مکانیکی نمونه می‌شود. همچنین اختلاط میکروسیلیس در بتن تا ۲۵٪ باعث افزایش مقدار مقاومت‌های کششی و فشاری می‌شود [۶].

در خصوص چقرمگی شکست نیز پژوهش‌هایی صورت گرفته که روی بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک است که می‌توان به پژوهش قزوینیان و همکاران اشاره کرد. این پژوهش جهت بررسی گسترش ترک در

حالت مود ترکیبی (II-I) در نمونه‌های دیسک برزیلی دارای ترک مرکزی مستقیم (CSNBD) ساخته شده از سیمان پوزولانی، پلاستر و آب انجام شده 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 ۰ تا ۴۵ درجه افزایش و سپس با افزایش زاویه بارگذاری یعنی زوایای ۴۵ تا ۹۰ درجه کاهش خواهد یافت. در زاویه ۷۵ درجه ترک‌های باله‌ای با فاصله ای از نوک ترک شروع به رشد می‌نمایند؛ با افزایش زاویه بارگذاری یعنی در زاویه ۹۰ درجه این فاصله افزایش و ترک‌های باله‌ای تقریباً از مرکز دیسک شروع به رشد می‌نمایند [۷]. در پژوهشی گلوسکی و گیل به این نتیجه دست یافتند که استفاده از میکروسیلیس و خاکستر بادی در بتن به افزایش قابل توجه چقرمگی شکست در سنین پایین کمک می‌کند [۸].

در پژوهش حاتمی و همکاران با استفاده از روش آزمون روی دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم، پیش بینی روند انتشار ترک و شروع ترک بررسی شد که در زوایای انحراف ترک ۶۰ درجه و کم تر از آن، 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 پیش ترک رخ می‌دهد [۹].

دهستانی و همکاران در پژوهشی اثر تعداد سیکل‌های تر شدن خشک شدن را بر روی چقرمگی شکست حالت I و II ماسه سنگ در محیط دارای پی اچ ۷ و محیط دارای پی اچ ۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن چقرمگی شکست کاهش یافت و کاهش چقرمگی شکست در محیط اسیدی بیش از کاهش چقرمگی شکست در محیط دارای پی اچ ۷ است [۱۰]. در مقاله دیگری دهستانی و همکاران به بررسی اثر تعداد سیکل‌های تر شدن خشک شدن بر روی چقرمگی شکست حالت I و II ملات سیمان و بتن پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن چقرمگی شکست ملات سیمان و بتن کاهش یافت [۱۱].

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در گذشته و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت در اکثر این پژوهش‌ها چقرمگی شکست موادی غیر از بتن مورد بررسی قرار گرفته است، و یا بتن مطالعه شده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک است اما در این پژوهش که به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است علاوه بر بررسی اثر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر چقرمگی شکست حالت‌های I، II و حالت ترکیبی I-II در بتن، از تعداد نمونه‌ی مورد آزمایش بیشتری در زوایای مختلف (۴ نمونه برای هر زاویه و ۷ زاویه متفاوت) برای بررسی چقرمگی شکست استفاده شده است.



شکل ۱. قالب‌های مخصوص ساخته شده با طرح دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم

Fig. 1. Molds constructed to prepare the straight notched Brazilian disc concrete specimens

۲- نمونه های مورد آزمایش

چقرمگی شکست، یکی از عوامل مهم در مهندسی سنگ و مواد دیگر می باشد. این پارامتر نشان دهنده مقاومت ماده یا سنگ در برابر رشد ترک تحت بارگذاری می باشد. معمولاً بتن و ساختارهای بتنی ترک دار در طبیعت، تحت بارگذاری های پیچیده قرار می گیرند. با توجه به جهت گیری ترک نسبت به راستای بارگذاری، امکان دارد شکست ترد در بتن ایجاد شود که ناشی از ترکیب دو حالت شکست که شامل حالت I (مود کشش) و حالت II (مود برشی) است؛ بنابراین بسیار مهم می باشد که چقرمگی شکست حالت ترکیبی (I-II) بررسی شود [۱۲]. در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر روی انتشار ترک حالت I، II و ترکیبی (I-II) در بتن، نمونه های دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم بتنی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و نمونه های بتنی که میکروسیلیس جایگزین ۱۰ درصد وزنی سیمان و پودر سنگ آهک جایگزین ۵ درصد وزنی سیمان [۱۳] شده است برای انجام آزمایش چقرمگی شکست آماده شده است. آزمون چقرمگی شکست تحت زوایای انحراف ترک ۰، ۱۵، ۲۸/۸۳، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ درجه روی نمونه ها انجام می شود، از آنجایی که نمونه ها بعد

از انجام آزمایش تخریب می شوند برای هر حالت ۲۸ نمونه در نظر گرفته شد. ۲۸ عدد دیسک برزیلی برای نمونه های بتنی ساده و فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و ۲۸ عدد دیسک برزیلی بتنی ساده حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد پودر سنگ آهک آماده شده است. ضخامت متوسط دیسک ها ۲۵ و قطر ۷۵ میلی متر است. در مرکز دیسک ها ترکیب مصنوعی به طول متوسط ۱۵ میلی متر ایجاد شده است. نمونه های آماده شده در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است. طرح اختلاط بتن معمولی و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در جدول ۱ آورده شده است. در این پژوهش از شن و ماسه آهکی استفاده شده است ترکیب شن و ماسه مصرفی طبق آنالیز XRF در جدول ۱ ارائه شده است. تجزیه سرندی انجام شده نشان می دهد شن و ماسه مصرفی مطابق الزامات ارائه شده در استاندارد ملی شماره ۳۰۲ سازمان ملی استاندارد ایران می باشد [۱۴]. مشخصات هندسی نمونه های آماده شده در جدول ۳ آورده شده است. برای آماده سازی نمونه ها از قالب های مخصوص ساخته شده با طرح دیسک برزیلی دارای ترک مستقیم مطابق شکل ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن

Table 1. The mix designs of concretes

نام نمونه	اجزا	بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودرسنگ آهک	بتن ساده حاوی میکروسیلیس و پودرسنگ آهک
		مقدار برای یک مترمکعب بتن	مقدار برای یک مترمکعب بتن
سیمان پرتلند تیپ ۲ (کیلوگرم)	۳۵۰	۲۹۷/۵	
ماسه (کیلوگرم)	۱۱۵۰	۱۱۵۰	
شن (کیلوگرم)	۷۰۰	۷۰۰	
میکروسیلیس (درصد وزنی سیمان)	۰	۱۰	
پودرسنگ آهک (درصد وزنی سیمان)	۰	۵	
نسبت آب به سیمان	۰/۴	۰/۴	
افزودنی فوق روان کننده (درصد وزن سیمان مصرفی)	۰/۸	۰/۸	

جدول ۲. نتیجه ی آنالیز XRF ماسه و شن مصرفی

Table 2. XRF results for sand and gravel

نوع	واحد	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	L.O.I
ماسه	%	۳/۳	۰/۹	۰/۶	۰/۱۰	۰/۲	۵۲/۸	۰/۶	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۴۱/۴
شن	%	۷/۳	۱/۶	۱	۰/۴	۰/۵	۴۹/۳	۰/۹	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۳۸/۸

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های دیسکی ترک‌دار جهت آزمایش چقرمگی شکست

Table 3. Specifications of notched discs for fracture toughness test

طول ترک (میلی‌متر)	ضخامت دیسک (میلی‌متر)	قطر دیسک (میلی‌متر)
۱۵	۲۵	۷۵



شکل ۲. مرکز یاب

Fig. 2. Center finder

جدول ۴. خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی

Table 4. Mechanical properties of concrete samples

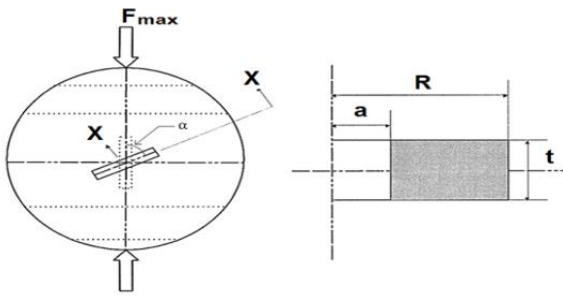
مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	تخلخل مؤثر (%)	سرعت امواج طولی (m/s)	وزن مخصوص خشک (KN/m ³)	نمونه
۳۰	۴/۶۷	۶/۴۸	۴۷۳۹	۲۲/۰۶	بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک
۵۴/۵۸	۶/۰۷	۶/۱۳	۴۹۸۰	۲۳/۷۴	بتن ساده حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

۳- خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های بتنی

برای شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های بتنی روی آنها آزمایش انجام شده است. برای این منظور نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۷ میلی‌متر آماده شد. در این آزمایش‌ها سرعت امواج طولی، وزن مخصوص، تخلخل، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوره تعیین شده است. آزمایش‌ها بر طبق استاندارد ISRM انجام شده است [۱۶]. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴ آمده است. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک منافذ بتن را پر می‌کند به همین

برای این منظور پس از آماده‌سازی بتن، مخلوط داخل قالب فولادی ریخته شده و پس از مسطح کردن سطح بالایی به مدت ۲۴ ساعت داخل قالب باقی می‌ماند؛ سپس نمونه‌ها از قالب خارج و تا سن ۲۸ روز در داخل آب و در محیط آزمایشگاهی مطابق الزامات استاندارد ملی ایران، شماره ۱۷۰۴۰، در دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند [۱۵].

نمونه‌های دیسک برزیلی پس از رسیدن به سن ۲۸ روز توسط مرکز یاب (شکل ۳) و مقاله، به اندازه‌ی زوایای موردنظر (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) اندازه‌گذاری شده و برای آزمایش تعیین چقرمگی شکست آماده می‌شوند.



شکل ۳. هندسه نمونه [۱۷].

Fig. 3. Specimen geometry

دلیل تخلخل موثر در بتن حاوی میکرو سیلیس و پودر سنگ آهک کمتر از بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک است. کاهش تخلخل موثر باعث افزایش وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری در بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک شده است.

۴- نتایج و تحلیل نتایج آزمایش روی دیسک برزیلی دارای

ترک مستقیم

این آزمایش توسط آواچی و ساتو در سال ۱۹۷۸ برای تعیین چقرمگی شکست حالت I، II و ترکیبی (I-II) در نمونه‌های گرافیت، گچ و سنگ مرمر توسعه داده شده است. اتکینسون در سال ۱۹۸۲ رابطه ضریب شدت تنش را برای این روش معرفی کرد. از این روش می‌توان در تعیین چقرمگی شکست حالت I، II و ترکیبی (I-II) استفاده کرد [۱۷]. در شکل ۳ هندسه نمونه دیسک برزیلی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

برای محاسبه چقرمگی شکست حالت I، II و ترکیبی (I-II) از روابط (۱)، (۲)، (۳)، (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۱۷].

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

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

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

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

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

در این روابط، K_{IC} و K_{IIC} به ترتیب چقرمگی شکست حالت I و 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 II در حالتی که نسبت a/R کوچک‌تر و یا مساوی با 0.3 و K_{eff} چقرمگی شکست موثر می‌باشد. برای محاسبه حالت I خالص زاویه α برابر صفر می‌باشد؛ همچنین برای به دست آوردن زاویه حالت II خالص از رابطه (۲)، N_I را برابر با صفر قرار داده و زاویه محاسبه می‌شود [۱۸]. در این بخش، ابتدا نتایج آزمایش چقرمگی شکست برای نمونه‌های بتنی ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و سپس برای نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در جداول ۵ آورده شده است. در شکل ۴ نحوه شکست نمونه‌های بتنی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و در شکل ۵ نحوه شکست نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک نشان داده شده است.

در این پژوهش به منظور بررسی روند انتشار ترک در حالت‌های مختلف، نمودارهای مربوطه رسم و با استفاده از نرم‌افزارهایی فیلم نحوه شکست، بررسی و نتایج ارائه شده است. منحنی $K_{IC}-\alpha$ ، $K_{IIC}-\alpha$ و $K_{eff}-\alpha$ برای بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن ساده حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک مطابق شکل ۶ می‌باشد. نمودار ستونی چقرمگی شکست برای حالت‌های مختلف، برای بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در مقایسه با بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک به ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.

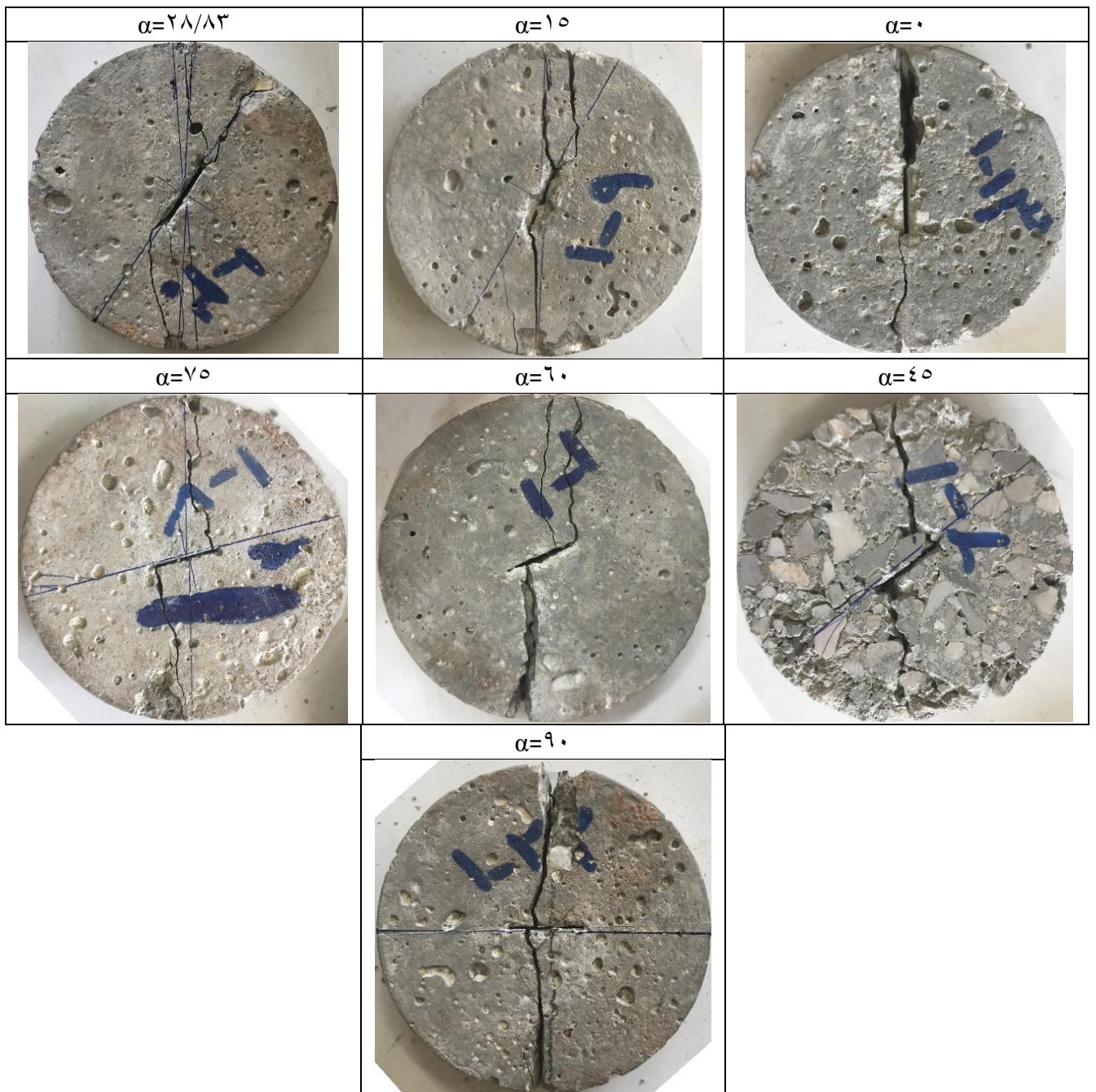
در جدول ۶ مقادیر میانگین چقرمگی‌های شکست تحت زوایای مختلف انحراف ترک آورده شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش چقرمگی شکست در نمونه‌های بتن فاقد میکروسیلیس و پودرسنگ آهک (S) و بتن حاوی میکروسیلیس و پودرسنگ آهک (SMP)

Table 5. The fracture toughness test results for fibreless concrete specimen lacking microsilica (S) and limestone powder and the concrete specimen containing microsilica and limestone powder (SMP)

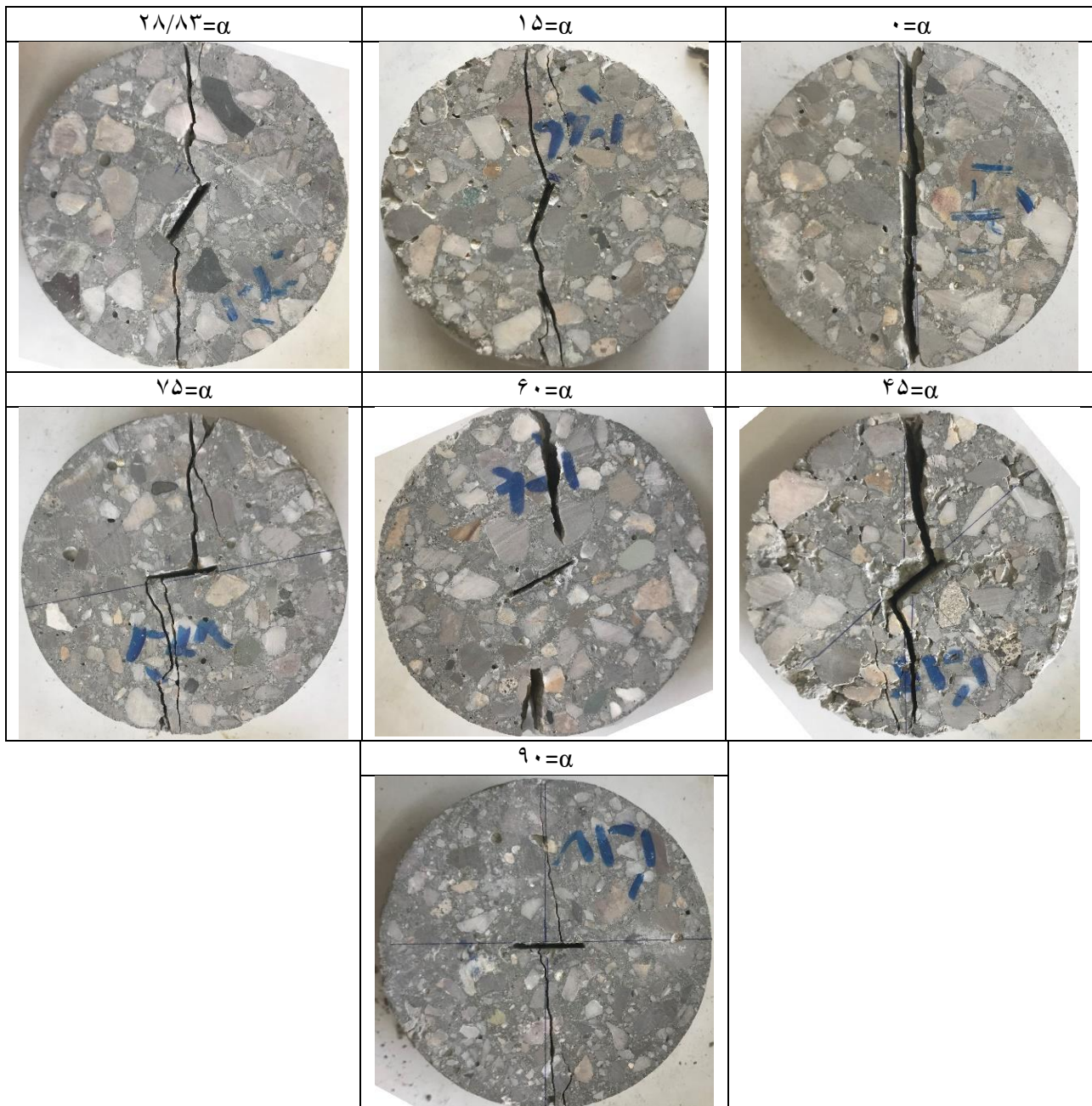
نمونه	زاویه بارگذاری (°)	میزان مصرف الیاف (درصد حجم بتن)	حالت شکست	زاویه شروع ترک (°)	فاصله ترک از نوک پیش ترک (mm)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	K_{IIC} (MPa.m ^{1/2})	K_{eff} (MPa.m ^{1/2})
S	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۲	۰	۰/۵۲
S	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۵	۰	۰/۵۵
S	۰	-	I	۰	۰	۰/۴۳	۰	۰/۴۳
S	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۰	۰	۰/۴۹
S	۱۵	-	ترکیبی	۲۲/۱۵	۰	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۵۸
S	۱۵	-	ترکیبی	۲۱/۱۵	۰	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۶۰
S	۱۵	-	ترکیبی	۲۳	۰	۰/۲۹	۰/۴۴	۰/۵۳
S	۱۵	-	ترکیبی	۲۲/۴	۰	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۵۸
S	۲۸/۸۳	-	II	۴۴/۷۳	۰	۰	۰/۷۱	۰/۷۱
S	۲۸/۸۳	-	II	۵۱/۶۸	۰	۰	۰/۶۹	۰/۶۸
S	۲۸/۸۳	-	II	۴۵/۳۷	۰	۰	۰/۸۵	۰/۸۵
S	۲۸/۸۳	-	II	۴۴/۳۷	۰	۰	۰/۶۸	۰/۶۷
S	۴۵	-	ترکیبی	۵۹/۹۷	۰	-۰/۴۲	۰/۷۵	۰/۸۶
S	۴۵	-	ترکیبی	۶۴	۰	-۰/۴۲	۰/۷۴	۰/۸۴
S	۴۵	-	ترکیبی	۵۶/۹۳	۰	-۰/۴۱	۰/۷۳	۰/۸۳
S	۴۵	-	ترکیبی	۶۰/۴۸	۰	-۰/۴۴	۰/۷۹	۰/۹۰
S	۶۰	-	ترکیبی	۷۲/۶۳	۴/۹۵	-۰/۸۱	۰/۶۶	۱/۰۴
S	۶۰	-	ترکیبی	۷۵	۵/۳۱	-۰/۸۳	۰/۶۶	۱/۰۶
S	۶۰	-	ترکیبی	۷۸/۹۸	۵/۲۳	-۰/۷۹	۰/۶۴	۱/۰۲
S	۶۰	-	ترکیبی	۵۸/۸۶	۵	-۰/۸۲	۰/۶۶	۱/۰۵
S	۷۵	-	ترکیبی	۸۹/۲۹	۶/۹	-۱/۲۱	۰/۴۱	۱/۲۷
S	۷۵	-	ترکیبی	۹۲/۶۷	۷	-۱/۱۵	۰/۴۰	۱/۲۱
S	۷۵	-	ترکیبی	۵۸/۸۶	۶/۴۱	-۱/۱۶	۰/۴۰	۱/۲۲
S	۹۰	-	ترکیبی	۹۵	۷/۵	-۱/۳۴	۰	۱/۳۳
S	۹۰	-	ترکیبی	۹۰/۳۵	۷/۶	-۱/۳۰	۰	۱/۲۹
S	۹۰	-	ترکیبی	۹۰/۴۴	۷/۴	-۱/۳۹	۰	۱/۳۹
S	۹۰	-	ترکیبی	۱۰۶/۳	۷/۳	-۱/۳۶	۰	۱/۳۶

SMP	۰	-	I	۰	۰	۰/۴۹	۰	۰/۴۹
SMP	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۵	۰	۰/۵۵
SMP	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۰	۰	۰/۵۰
SMP	۰	-	I	۰	۰	۰/۵۲	۰	۰/۵۲
SMP	۱۵	-	ترکیبی	۳۳	۰	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۵۸
SMP	۱۵	-	ترکیبی	۳۷	۰	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۵۴
SMP	۱۵	-	ترکیبی	۳۹/۱۱	۰	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۶۱
SMP	۱۵	-	ترکیبی	۳۵	۰	۰/۳۴	۰/۵۱	۰/۶۱
SMP	۲۸/۸۳	-	II	۴۵/۴۱	۰	۰	۰/۸۱	۰/۸۱
SMP	۲۸/۸۳	-	II	۴۸	۰	۰	۰/۸۶	۰/۸۶
SMP	۲۸/۸۳	-	II	۴۶/۸۰	۰	۰	۰/۸۱	۰/۸۱
SMP	۲۸/۸۳	-	II	۴۷	۰	۰	۰/۸۵	۰/۸۵
SMP	۴۵	-	ترکیبی	۷۲	۰	-۰/۴۸	۰/۸۶	۰/۹۸
SMP	۴۵	-	ترکیبی	۷۴	۰	-۰/۵۰	۰/۸۹	۱/۰۲
SMP	۴۵	-	ترکیبی	۷۰	۰	-۰/۴۷	۰/۸۵	۰/۹۷
SMP	۴۵	-	ترکیبی	۷۹	۰	-۰/۵۱	۰/۹۲	۱/۰۵
SMP	۶۰	-	ترکیبی	۷۶	۱/۴	-۰/۸۸	۰/۷۰	۱/۱۲
SMP	۶۰	-	ترکیبی	۸۰	۱/۱۷	-۰/۹۰	۰/۷۳	۱/۱۶
SMP	۶۰	-	ترکیبی	۸۴	۱/۲۸	-۰/۹۸	۰/۸۰	۱/۲۷
SMP	۶۰	-	ترکیبی	۸۸	۱/۴	-۰/۹۹	۰/۸۰	۱/۲۸
SMP	۷۵	-	ترکیبی	۱۰۰	۴/۲۰	-۱/۲۰	۰/۴۲	۱/۲۷
SMP	۷۵	-	ترکیبی	۹۰	۴/۴۶	-۱/۲۹	۰/۴۴	۱/۳۶
SMP	۷۵	-	ترکیبی	۱۰۱	۴/۴۰	-۱/۲۴	۰/۴۳	۱/۳۱
SMP	۷۵	-	ترکیبی	۱۰۳	۴/۱	-۱/۲۴	۰/۴۳	۱/۳۱
SMP	۹۰	-	ترکیبی	۹۱	۶/۷۳	-۱/۳۳	۰	۱/۳۳
SMP	۹۰	-	ترکیبی	۹۰/۵	۶/۷۳	-۱/۳۹	۰	۱/۳۹
SMP	۹۰	-	ترکیبی	۹۰/۴	۶/۷۳	-۱/۳۰	۰	۱/۳۰
SMP	۹۰	-	ترکیبی	۹۰/۸	۶/۷۳	-۱/۴۰	۰	۱/۴۰



شکل ۴. نحوه شکست نمونه‌های بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 4. The failure of conventional concrete specimens lacking microsilica and limestone powder



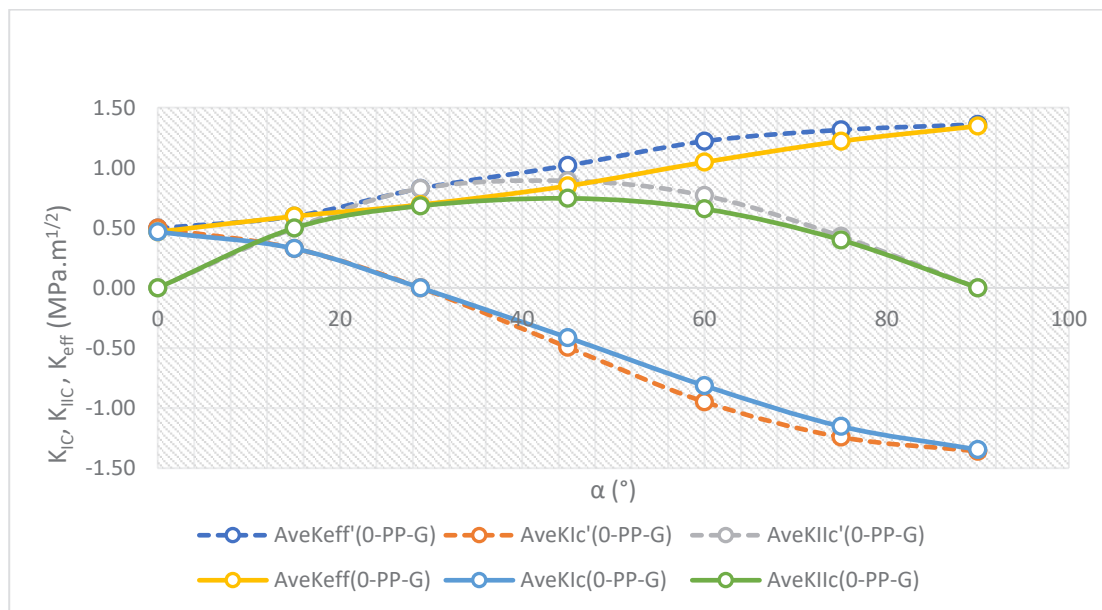
شکل ۵. نحوه شکست نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس و پودرسنگ

Fig. 5. The failure of conventional concrete specimens containing microsilica and limestone powder

جدول ۶. میانگین نتایج آزمایش چقرمگی شکست در نمونه‌های بتنی ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ و نمونه‌های بتنی ساده حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Table 6. The mean fracture toughness of conventional concrete specimens lacking microsilica and limestone powder and the concrete specimen containing microsilica and limestone powder

زاویه	بتن ساده حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک			بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک		
	K_{eff} (MPa.m ^{1/2})	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	K_{IIC} (MPa.m ^{1/2})	K_{eff} (MPa.m ^{1/2})	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	K_{IIC} (MPa.m ^{1/2})
۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰	۰/۴۷	۰/۴۷	۰
۱۵	۰/۶۰	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۳۳	۰/۵۰
۲۸/۸۳	۰/۸۳	۰	۰/۸۳	۰/۶۸	۰	۰/۶۸
۴۵	۱/۰۲	-۰/۴۹	۰/۸۹	۰/۸۵	-۰/۴۱	۰/۷۴
۶۰	۱/۲۲	-۰/۹۵	۰/۷۷	۱/۰۵	-۰/۸۱	۰/۶۶
۷۵	۱/۳۱	-۱/۲۴	۰/۴۳	۱/۲۲	-۱/۱۵	۰/۴۰
۹۰	۱/۳۶	-۱/۳۶	۰	۱/۳۵	-۱/۳۵	۰

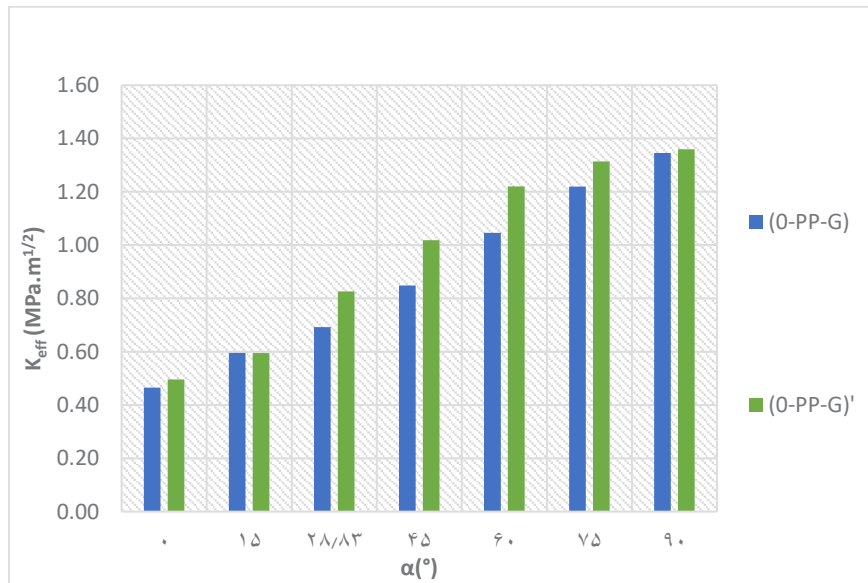


شکل ۶. منحنی $K_{IC}-\alpha$ ، $K_{IIC}-\alpha$ و $K_{eff}-\alpha$ برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 6. $K_{IC}-\alpha$, $K_{IIC}-\alpha$, and $K_{eff}-\alpha$ diagrams for concrete lacking microsilica and limestone powder and concrete containing microsilica and limestone powder

درصد نسبت به بتن ساده افزایش می‌یابد. چقرمگی شکست موثر برای بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در تمامی زوایا بیشتر از بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می‌باشد. در شکل‌ها راهنمای (0-PP-G) نشانه بتن ساده فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و راهنمای (0-PP-G) نشانه بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک است.

نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که چقرمگی شکست حالت I برای بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک ۶/۳۸ درصد در زاویه ۰ درجه و ۰/۱ درصد در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک افزایش می‌یابد. چقرمگی شکست حالت برشی خالص که در زاویه ۲۸/۸۳ درجه اتفاق می‌افتد برای بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک ۲۲/۰۵



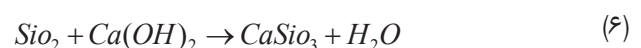
شکل ۷. نمودار ستونی چقرمگی شکست موثر برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 7. Column chart of effective fracture toughness for concrete without microsilica and limestone powder and concrete containing microsilica and limestone powder

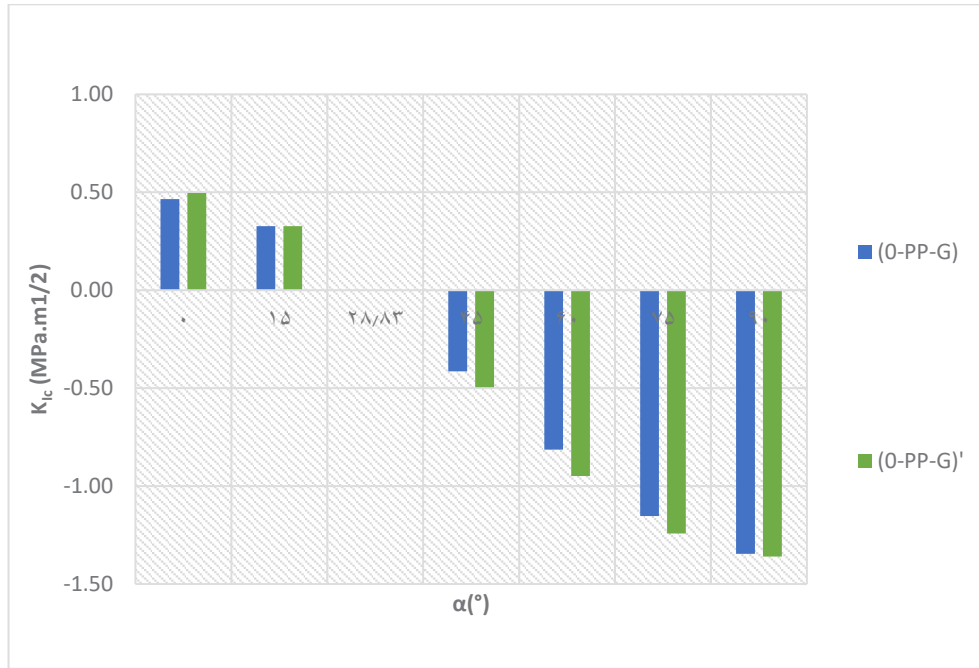
همانطور که در جدول ۴ مشاهده شد تخلخل موثر در بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک ۵/۷ درصد نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک کاهش یافت و به واسطه پرشدن منافذ بتن توسط میکروسیلیس، وزن مخصوص خشک و سرعت امواج طولی به ترتیب ۷/۶۱٪ و ۵/۰۸ درصد نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک افزایش یافت و کاهش تخلخل موثر سبب افزایش مقاومت و چقرمگی شکست نمونه های حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک شده است. البته علاوه بر میکروسیلیس، پودر سنگ آهک نیز به کاهش تخلخل کمک می کند.

همان طور که از نمودار حاصله (شکل ۱۰) مشخص است، بار لحظه‌ی شکست در نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در تمامی زوایا بیش از نمونه‌های فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می‌باشد. با توجه به نمودار بار شکست (شکل ۱۰)، ملاحظه می‌گردد در نمونه های حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک از زاویه انحراف پیش ترک ۰ تا ۴۵ درجه روند بار شکست نزولی و با افزایش زاویه‌ی انحراف پیش‌ترک از زاویه ۴۵ تا ۹۰ درجه بار شکست افزایش می یابد هنگامی که زاویه انحراف ترک با راستای بارگذاری محوری ۴۵ درجه باشد، حداقل نیرو برای شکست سنگ لازم است. در پژوهشی که توسط میرزایی نصیرآباد و همکاران [۲۰]

همان طور که از نمودار ستونی (شکل ۷) مشخص است، افزودن میکروسیلیس و پودر سنگ آهک به بتن سبب افزایش چقرمگی شکست در تمامی زوایا نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ خواهد شد. نمودار ستونی (شکل‌های ۷، ۸ و ۹) نشان می دهد چقرمگی شکست حالت I و حالت II و حالت ترکیبی (II-I) نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بیشتر از چقرمگی شکست حالت I و حالت II نمونه‌های بتنی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می‌باشد. آنالیز XRF میکروسیلیس استفاده شده نشان داد ۹۹/۵٪ درصد آن را سیلیس تشکیل می دهد. میکروسیلیس از دو طریق به مقاومت بتن کمک می کند اول اینکه سیلیس فعال قادر است مطابق با (معادله ۶)، هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ موجود در سیمان بتن را که یک عامل تضعیف کننده بتن محسوب می‌شود، به سیلیکات کلسیم $(CaSiO_3)$ که ماده‌ای مقاوم است تبدیل نماید [۱۹].

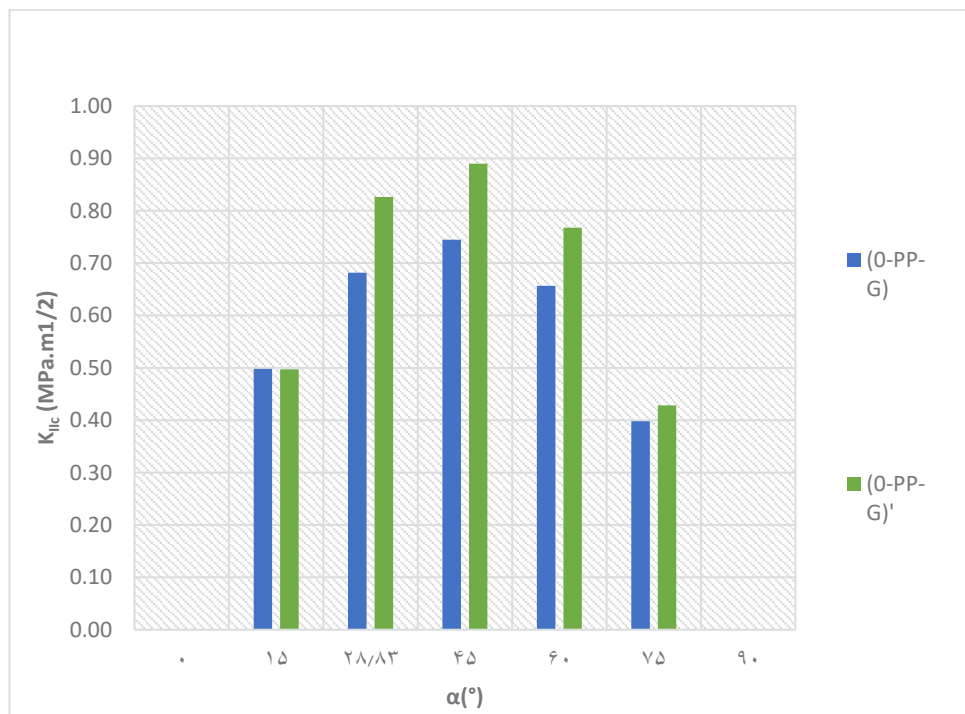


طریقه دوم به واسطه پر کردن منافذ بتن و کاهش تخلخل موثر بتن،



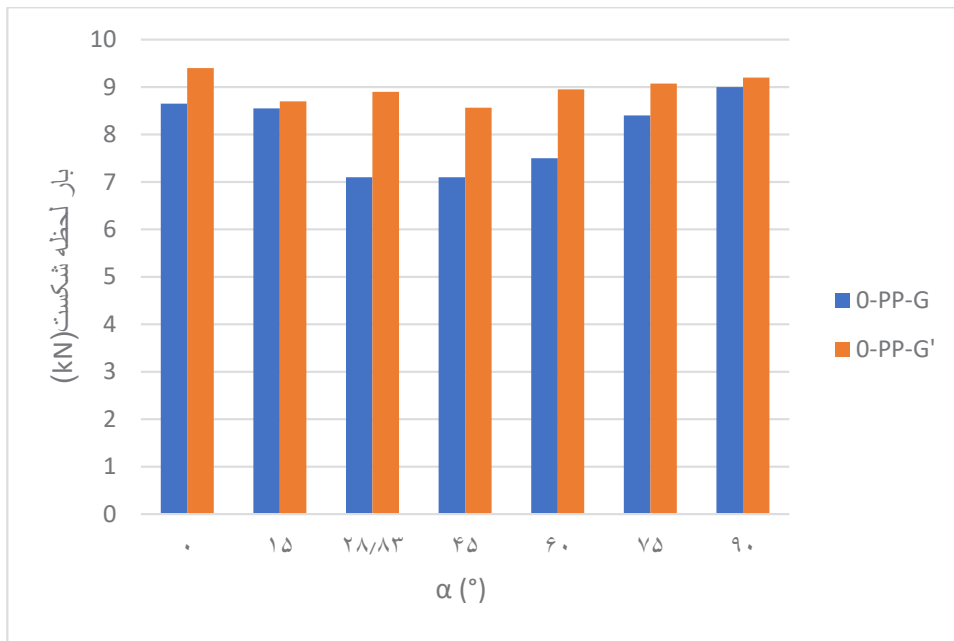
شکل ۸. نمودار ستونی چقرمگی شکست حالت I، برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 8. Column chart of mode I fracture toughness for concrete without microsilica and limestone powder and concrete containing microsilica and limestone powder



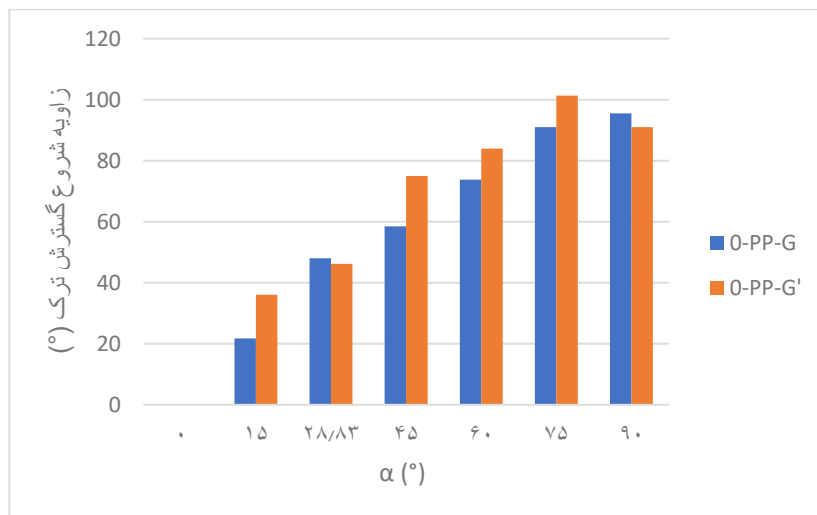
شکل ۹. نمودار ستونی چقرمگی شکست حلت II برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 9. Column chart of mode II fracture toughness for concrete without microsilica and limestone powder and concrete containing microsilica and limestone powder



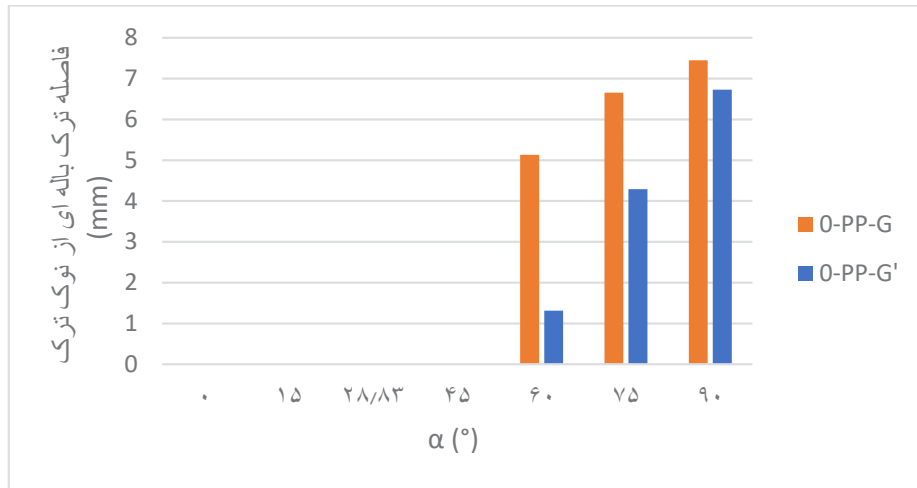
شکل ۱۰. تغییرات بار لحظه شکست با زاویه بین راستای ترک و راستای بارگذاری برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 10. Variations of the load at failure with crack inclination angle for concrete lacking fibres, microsilica, and limestone powder and concrete containing microsilica and limestone powder



شکل ۱۱. نمودار ستونی روند تغییرات زاویه شروع گسترش ترک نسبت به زاویه انحراف پیش ترک در بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 11. Column chart of variations of crack initiation angle versus crack inclination angle for the specimens lacking microsilica, and limestone powder and specimens containing microsilica and limestone powder



شکل ۱۲. نمودار ستونی روند تغییرات فاصله ترک باله ای (d) نسبت به زاویه انحراف پیش ترک برای بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک و بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک

Fig. 12. The bar diagram of variations of wing crack distance from the pre-crack tip versus crack inclination angle for the specimen microsilica, and limestone powder and specimens containing microsilica and limestone powder

اند که به بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش مقاومت فشاری و چقرمگی شکست آنها کمک می کند. این پدیده در بتن های معمولی [۲۵-۲۹] و بتن های با عملکرد بالا [۲۸،۲۹] رخ می دهد.

با بررسی روند تغییرات زاویه شروع گسترش ترک نسبت به زاویه انحراف پیش ترک (شکل ۱۱)، مشاهده می شود با بیشتر شدن زاویه ی ترک نسبت به راستای بارگذاری، زاویه شروع ترک نیز افزایش می یابد. گسترش ترک در زوایای ۴۵ و کمتر از آن از نوک پیش ترک آغاز می شود، این در حالی است که برای زوایای ۶۰ درجه و بزرگ تر از آن ترک های باله ای با فاصله d از نوک ترک شروع و به سمت محل بارگذاری گسترش می یابند. با افزایش زاویه بارگذاری و در نهایت قرار گرفتن ترک در ۷۵ درجه، زاویه گسترش ترک به ۸۶ درجه رسیده و زمانی که به حالت افقی نزدیک می شود این زاویه نیز به ۹۰ درجه می رسد. این روند با نتایج تحقیقات پیشین مطابقت دارد. از جمله این پژوهش ها می توان به مقاله قزوینیان و همکاران اشاره نمود؛ در این پژوهش بیان شده است هنگامی که ترک به صورت افقی قرار می گیرد زاویه انتشار ترک به صورت قائم و در قالب دو ترک کششی از مرکز دیسک برزبلی حاوی ترک می باشد. انتشار ترک تقریباً به موازات بار فشاری حداکثر رخ می دهد و ترک های باله ای به مرزهای بالایی و پایینی نمونه می رسند همچنین در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه انتشار ترک با فاصله از نوک ترک شروع به گسترش می کند [۷]. زاویه شروع ترک در نمونه های حاوی میکروسیلیس در زاویه انحراف ترک ۱۵، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه بیشتر از زاویه شروع ترک در

بر روی نمونه های گچی دیسک برزبلی ترک دار انجام شده است، نشان داده شده است که در بین نمونه های دیسکی ترک دار، نمونه حاوی ترک با شیب ۴۵ درجه کمترین بار شکست را تحمل می نماید. با توجه به نتایج حاصله مشخص می شود که استفاده از بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک تا ۲۰/۷ درصد بار لحظه شکست را در زاویه ۴۵ درجه نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ بهبود می بخشد. با توجه به تحقیقات محققین دیگر که بر روی تاثیر مواد افزودنی بر روی بار شکست و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن صورت گرفته است، اندازه کوچک ذرات افزودنی مانند میکروسیلیس و پودر سنگ آهک تأثیر مفیدی بر پارامترهای مقاومتی، خواص مکانیکی و همچنین خواص فیزیکی بتن دارد و نشان داده شده است که این مواد علاوه بر کاهش میزان مصرف سیمان در بتن و تاثیر اقتصادی این جایگزینی باعث کاهش گرمای هیدراتاسیون سیمان، و در نتیجه افزایش مقاومت بتن در برابر بارهای وارده و گسترش ترک ناشی از این بارها می شود [۲۱-۲۴] که با نتایج بدست آمده از آزمایشات صورت گرفته در این پژوهش همخوانی دارد.

علاوه بر موارد ذکر شده، تغییرات مثبت در خواص مکانیکی بتن های حاوی افزودنی های معدنی ریز و فعال شیمیایی مانند میکروسیلیس که در این تحقیق استفاده شده است مستقیماً با تغییرات ساختاری رخ داده در بتن مرتبط است. در مقالات متعددی تا به امروز ثابت شده است که این مواد به طور قابل توجهی ریزساختار بتن را با ترکیب چسبنده سیمانی تغییر داده

ارزیابی بتن هایی با ترکیب اصلاح شده (بتن همراه با افزودنی) منجر به این نتیجه می شود که ترکیب مواد افزودنی پوزولانی فعال شیمیایی و بسیار ریزدانه (میکروسیلیس) به وضوح بر تغییرات ساختار بتن تأثیر می گذارد. این تغییر ساختار در نواحی تبلور مجدد فاز C-S-H (هیدرات سیلیکات کلسیم) رویت می شود که با پیشرفت فرآیند عمل آوری، ساختار آن را از بی نظم به فشرده تغییر می دهد [۸] میکروفیلرها همچنین مقدار و مهمتر از همه اندازه منافذ موجود در ساختار ماتریس سیمان را کاهش می دهد. توسعه فازهای اضافی (عمدتا C-S-H) از طریق استفاده از میکروسیلیس باعث می شود که آنها در حفره های بتن قرار گیرند و به تدریج حفرات و فضای خالی موجود در بتن را پر کنند [۸]. به دلیل کاهش گرمای هیدراتاسیون بتن با افزودنی های معدنی، فرآیندهای تشکیل اولین ترک های انقباضی در سازه بتنی نیز کاهش می یابد [۳۰-۳۳]. در نتیجه، اثرات فوق منجر به همگن شدن ساختار این مواد، افزایش سختی آنها و بهبود پارامترهای مکانیکی می شود. علاوه بر این، افزودن مواد افزودنی به بتن بر بهبود چقرمگی شکست بتن و تغییر در انتشار ترک های ماکروسکوپی ایجاد شده در طول فرآیند شکست آن تحت تأثیر بارهای خارجی وارده بر نمونه ها، تأثیر می گذارد [۳۴،۳۵].

در نهایت می توان گفت افزودن میکروسیلیس و پودر سنگ آهک به بتن ساده علاوه بر اینکه بکارگیری ضایعات و یا باطله های معدنی از جنبه محیط زیستی و اقتصادی ضروری است در ضمن باعث بهبود قابل توجهی در خواص فیزیکی و مکانیکی بتن می شود. استفاده از این مواد افزودنی باعث افزایش چقرمگی شکست بتن و کاهش حفرات و فضاهای خالی می شود.

۵-۵- نتیجه گیری

این پژوهش به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر چقرمگی شکست حالت های I، II و حالت ترکیبی I-II بتن پرداخت. نتایج این پژوهش نشان می دهد:

- استفاده از میکروسیلیس و پودر سنگ آهک به دلیل کاهش تخلخل و فضای خالی موجود در بتن و افزایش چگالی بتن مورد آزمایش باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می شود.
- استفاده از ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد پودر سنگ باعث بهبود چقرمگی شکست موثر، مود I و مود II می شود.
- در تمامی نمونه های مورد آزمون، با افزایش زاویه انحراف ترک،

نمونه های فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می باشد. همان طور که پیش تر گفته شد در زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه، ترک های باله ای با فاصله d از نوک پیش ترک شروع به رشد می نمایند (شکل ۱۲)؛ نکته قابل توجه این است که برای بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ این فاصله به مراتب کم تر از بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می باشد. کاهش در مقدار فاصله d در زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ به ترتیب ۷۴/۴۶، ۳۵/۵۳ و ۹/۶۶ درصد نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ است. نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش حاتمی و همکاران مطابقت دارد. به طوری که در زاویه بارگذاری ۷۵ درجه و ۹۰ درجه، انتشار ترک با فاصله از نوک پیش ترک شروع به گسترش می کند [۹].

. با این تفاوت که در این پژوهش رشد ترک در زاویه بارگذاری ۶۰ درجه نیز با فاصله از نوک پیش ترک آغاز شده است.

همان طور که نشان داده شد نمونه های بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک دارای بیشترین چقرمگی شکست موثر نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بوده است. نمونه های بارگذاری شده حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک با زاویه انحراف ترک ۱۵ درجه، از دو نوک ترک، ترک های کششی با زاویه ۳۶ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های تحت بارگذاری با زاویه انحراف ترک ۲۸/۸۳، 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 تحت بارگذاری با زاویه انحراف ترک ۴۵ درجه، از دو نوک ترک، ترک های باله ای با زاویه ۷۵ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های تحت بارگذاری با زاویه انحراف ترک ۶۰ درجه، از نزدیکی دو نوک ترک، ترک های باله ای با زاویه ۸۴ درجه نسبت به امتداد ترک منشعب شده و به مرزهای بالایی و پایینی می رسند. در نمونه های تحت بارگذاری با زاویه انحراف ترک ۷۵ درجه، از نزدیکی دو نوک ترک (نه نوک ترک)، ترک های باله ای با زاویه ۱۰۱ 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 منشعب شده و با ساختن زاویه ۹۰ درجه با پیش ترک به مرز پایینی می رسد به مرز پایینی می رسد و سپس یک ترک دیگر در همان نقطه در نیم دایره بالایی دیسک منشعب شده به مرز بالایی می رسد. سپس دو ترک ثانویه دقیقاً از نوک ترک اصلی منشعب شده و به مرز بالایی می رسند.

- Engineering Journal, 31(2) (2017). (In Persian)
- [5] S.C. Kou, F. Xing, The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012 (2012).
- [6] P. Khoshkalamian, S.M. Qureshi, Effect of Silica Fiber on Tensile and Compressive Strength of Concrete, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 89(3) (2018). (In Persian)
- [7] A. Ghazvinian, H.R. Nejati, V. Sarfarazi, M.R. Hadei, Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials, *Arabian Journal of Geosciences*, 6 (2013) 4435-4444.
- [8] G.L. Golewski, D.M. Gil, Studies of fracture toughness in concretes containing fly ash and silica fume in the first 28 days of curing, *Materials*, 14(2) (2021) 319.
- [9] M.H. Jorbat, M. Hosseini, M. Mahdikhani, Effect of polypropylene fibers on the mode I, mode II, and mixed-mode fracture toughness and crack propagation in fiber-reinforced concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109 (2020) 102723
- [10] A. Dehestani, M. Hosseini, A.T. Beydokhti, Effect of wetting–drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of sandstone in natural (pH= 7) and acidic (pH= 3) environments, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107 (2020) 102512.
- [11] A. Dehestani, M. Hosseini, A.T. Beydokhti, Effect of wetting–drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar and concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106 (2020) 102448.
- [12] J. Akbaridoost, M. Ayatollahi, Experimental analysis of mixed mode crack propagation in brittle rocks: The effect of non-singular terms, *Engineering Fracture Mechanics*, 129 (2014) 77-89.
- [13] M. Ghalenoi, A. Khodabakhshian, A. Asadi Shamsabadi, Effect of marble powder wastes and microsilica as replacement for part of cement on concrete durability, *Concrete Studies*, 11(2) (2018) 35-50. (In Persian)
- زاویه شروع ترک نیز افزایش می‌یابد. با ادامه بارگذاری ترک‌های باله‌ای ایجاد شده در مسیری منحنی شکل به سمت لبه‌ی دیسک و به موازات راستای بارگذاری منتشر می‌شود. نکته قابل توجه در پژوهش حاضر این مساله است که زاویه انتشار ترک‌های باله‌ای در همه‌ی حالات مشابه یکدیگر بوده است. بنابراین در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و پودرسنگ آهک، ترک با زاویه‌ی بیشتری شروع و سپس به سمت نقطه بارگذاری لبه دیسک گسترش می‌یابد.
- در تمامی نمونه‌های بتنی کمترین بار شکست در زاویه ۴۵ درجه رخ می‌دهد.
 - شروع ترک در زوایای انحراف ترک ۴۵ 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 ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه، شروع ترک با فاصله d از نوک پیش‌ترک رخ می‌دهد. با افزودن میکروسیلیس و پودرسنگ آهک، با توجه به نحوه شکست در زوایای انحراف ترک ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه، فاصله‌ی d نسبت به نمونه‌های بتنی ساده کمتر شده است. استفاده از میکروسیلیس و پودرسنگ باعث کاهش بیشتر این فاصله نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس و پودرسنگ آهک می‌شود.
 - بار شکست در نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بیشتر از نمونه‌های بتنی فاقد میکروسیلیس و پودر سنگ آهک می‌باشد.

منابع

- H. Haeri, K. Shahriar, M. Fatehi Maraji, P. Maraefvand, The use of displacement discontinuity method in analyzing crack propagation mechanism in pseudo-rock materials, *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 5 (2013) 38-49. (In Persian)
- [2] P. Payro, Fibre-reinforced concrete, Tehran, Farhand and Danesh, (2013). (In Persian)
- [3] Ş. Yazıcı, G. İnan, V. Tabak, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21(6) (2007) 1250-1253.
- [4] S.H. Ghasemzadeh, Y. Ghorbani Shamsad Sera, Effect of microsilica and nanosilica on the mechanical properties of lightweight fiber concrete, *Ferdowsi Civil*

- [24] M. Regourd, Microstructure of cement blends containing fly ash, silica fume, slag and fillers, MRS Online Proceedings Library (OPL), 85 (1986) 187.
- [25] G. Carrette, V. Malhotra, Early-age strength development of concrete incorporating fly ash and condensed silica fume, Special Publication, 79 (1983) 765-784.
- [26] P. Mehta, P. Monteiro, Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone, MRS Online Proceedings Library (OPL), 114 (1987) 65.
- [27] M. Baalbaki, S. Sarker, P. Aitcin, H. Isabelle, Properties and microstructure of high-performance concretes containing silica fume, slag and fly ash, Special Publication, 132 (1992) 921-942.
- [28] E.-H. Kadri, R. Duval, S. Aggoun, S. Kenai, Silica fume effect on hydration heat and compressive strength of high-performance concrete, ACI Materials Journal, 106(2) (2009) 107.
- [29] K. Brodersen, K. Nilsson, Pores and cracks in cemented waste and concrete, Cement and concrete research, 22(2-3) (1992) 405-417.
- [30] V. Lilkov, E. Dimitrova, O.E. Petrov, Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: the first 24 hours, Cement and concrete research, 27(4) (1997) 577-588.
- [31] B. Langan, K. Weng, M. Ward, Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement, Cement and Concrete research, 32(7) (2002) 1045-1051.
- [32] J. Yajun, J. Cahyadi, Simulation of silica fume blended cement hydration, Materials and structures, 37 (2004) 397-404.
- [33] B. Szostak, G.L. Golewski, Improvement of strength parameters of cement matrix with the addition of siliceous fly ash by using nanometric CSH seeds, Energies, 13(24) (2020) 6734.
- [34] D. Fakhri, M. Hosseini, M. Mahdikhani, Effect of glass and polypropylene hybrid fibers on Mode I, Mode II, and Mixed-Mode fracture toughness of concrete containing micro-silica and limestone powder, J. Min. Env, 13 (2022) 559-577.
- [14] Institute of Standards & Industrial Research of Iran, Concrete aggregates-properties, Standard No. 302 (2015). (In Persian)
- [15] Institute of Standards & Industrial Research of Iran, mixing room, moist chamber, moist room, and water ponds used in hydraulic testing of cement and concretes, Standard No. 17040 (2013). (In Persian)
- [16] R. Ulusay, J. Hudson, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, (2007).
- [17] G. Krishnan, X. Zhao, M. Zaman, J.-C. Roegiers, Fracture toughness of a soft sandstone, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35(6) (1998) 695-710.
- [18] T. Funatsu, M. Kuruppu, K. Matsui, 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 (2014),1-8.
- [19] A.A. Ramzaniyanpour, M. Pidaish, Concrete in marine environment, Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, (2014) 199-197. (In Persian)
- [20] H. Mirzaei Nasirabad, S.M.E. Jalali, M. Shariati, R. Kakaei, Experimental study of crack growth in notched Brazilian plaster discs and effect of crack slope on failure behavior, Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 1 (2010). (In Persian)
- [21] K. Robalo, E. Soldado, H. Costa, L. Carvalho, R. do Carmo, E. Júlio, Durability and time-dependent properties of low-cement concrete, Materials, 13(16) (2020) 3583.
- [22] Z. Suchorab, M. Franus, D. Barnat-Hunek, Properties of fibrous concrete made with plastic optical fibers from e-waste, Materials, 13(10) (2020) 2414.
- [23] E. Rahmani, M.K. Sharbatdar, M. Beygi, The effect of water-to-cement ratio on the fracture behaviors and ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 109 (2020) 102753.

Micro-silica and Limestone Powder, Journal of Mining and Environment, 12(3) (2021) 895-906.

[35] M. Hosseini, D. Fakhri, Experimental Study of Effect of Glass Fibres on Properties of Concrete Containing

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

D. Fakhri, M. Hosseini, M. Mahdikhani, Experimental study of the effect of micro-silica and limestone powder on the fracture toughness of concrete , Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1625-1644.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20877.7560



