

ارزیابی اثر الیاف بر شرایط رشد ترک در بتن غلتکی با استفاده از مدل اصلاح شده دو-پارامتری شکست

مقاله علمی - پژوهشی

حامد روح‌الامینی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rooholamini@Hormozgan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

صفحه ۲۴۸-۲۳۳

چکیده

بتن غلتکی یک مخلوط بتنی با اسلامپ صفر است که بوسیله غلتک برای رسیدن به چگالی لازم متراکم می‌گردد. در مقایسه با بتن معمولی، این بتن با میزان سیمان کمتری به مقاومت یکسان می‌رسد. با این حال، یکی از موانع اصلی در جهت توسعه استفاده از این نوع بتن در روسازی راه، مقاومت اصطکاکی پایین جهت استفاده در راه‌های با سرعت طرح بالا است. با توجه به اینکه در این نوع بتن امکان استفاده از داول در محل درزهای روسازی وجود ندارد استفاده از الیاف جهت مسلح کردن آن و افزایش توانایی انتقال بار می‌تواند گزینه مناسبی باشد. در این تحقیق از دو نوع الیاف ماکروسنتتیک و فلزی جهت مسلح نمودن این نوع بتن استفاده گردید. رفتار ترک خوردگی در مود کششی با استفاده از تیر خمش سه نقطه‌ای و به روش دو-پارامتری شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. نوآوری مدل دو-پارامتری اصلاح شده در نظرگیری احتمال تغییر مسیر ترک در حین رشد آن است. نتایج حاصل شده از انجام آزمایش و تحلیل آماری صورت پذیرفته، بیانگر عدم اثرگذاری معنادار الیاف در الگوی رشد ترک مخلوط بتنی است. همچنین با بررسی نتایج پردازش تصویر مشخص گردید که استفاده از روش اصلاح شده دو-پارامتری شکست باعث کاهش خطای محاسبه طاقت شکست در اثر لولا شدن مسیر رشد ترک می‌گردد. حضور الیاف ماکروسنتتیک و فلزی به ترتیب باعث افزایش مدول الاستیسیته به میزان ۵/۰٪ و ۱ درصد می‌گردد که حاکی از تأثیر گذاری کم الیاف در ناحیه پیش از ترک خوردگی بتن است. همچنین در بحث طاقت شکست، الیاف ماکروسنتتیک عملکرد بهتری از خود نشان داد. این در حالی است که الیاف فلزی در ناحیه پس از بار بیشینه، بدلیل مدول و سختی بالا باعث احتمال وقوع ناحیه سخت‌شدگی در نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، الیاف، مدل اصلاح شده دو-پارامتری شکست، زاویه رشد ترک، پردازش تصویر

۱- مقدمه

راه‌های صنعتی و چندگانه با سرعت ترافیک پایین و میزان بار زیاد است. از مزایای این نوع بتن می‌توان به کاهش هزینه ناشی از افزایش سرعت اجرا و مصرف سیمان کمتر جهت دستیابی به مقاومت مشابه بتن معمولی اشاره کرد. با توجه به اینکه در این نوع بتن امکان استفاده از داول در محل درزهای روسازی وجود ندارد استفاده از الیاف جهت مسلح کردن آن و افزایش توانایی انتقال بار می‌تواند گزینه مناسبی باشد (Arent et al., 1994). از منظر مواد، عمدتاً از چهار نوع الیاف جهت مسلح کردن بتن استفاده

بتن غلتکی یک بتن با اسلامپ صفر و مخلوطی خشک است که بوسیله غلتک برای رسیدن به چگالی لازم متراکم می‌گردد. در مقایسه با بتن معمولی این بتن با میزان سیمان کمتری به مقاومت یکسان می‌رسد (Rooholamini et al., 2018a). بمنظور دستیابی به مخلوط بتن غلتکی نیاز به ایجاد تغییراتی در مخلوط بتن معمولی شامل تغییر حجم ملات و سنگدانه درشت، کاهش میزان آب، تغییر نسبت آب به سیمان و افزایش میزان ریزدانه است (Arent et al., 1994). یکی از کاربردهای این نوع بتن در روسازی

در جدول ۱ مشاهده می‌شود تفاوت در نتایج ارایه شده بیانگر این نکته است که اثر الیاف بر مقاومت فشاری بتن متأثر از نوع و اندازه و میزان مصرف الیاف و نوع بتن می‌باشد. مطالعه لیبره و همکاران (Libre et al., 2011) بر روی درصد مصرفی الیاف در بتن نشان داده شد که در درصدهای پایین مصرف الیاف پلی‌پروپیلن (کمتر از ۰٫۲٪) مشخصات مکانیکی بتن تغییرات چشمگیری ندارد و حداقل درصد مصرف الیاف برای بهبود قابل توجه عملکرد خمشی ۰٫۴٪ توصیه شده است. در تحقیق انجام شده توسط آقای لین و همکاران بر روی الیاف از طریق انجام تست تیر خمش سه نقطه‌ای، نتیجه گیری شده است که با استفاده از نسبت ظاهری بالا الیاف و مقاومت بالای بتن، دستیابی به خیز سخت‌شدگی در ناحیه پس‌ترک‌خوردگی قابل انتظار است (Lin et al., 2013). بمنظور ارزیابی مشخصات مکانیکی شکست مخلوط‌های سیمانی اعم از ارزیابی آزمایشگاهی و عددی منجر به ارایه روش‌های مختلف ارزیابی گردیده است. جنگ و شاه در سال ۱۹۸۵ روشی تحت عنوان مدل دو پارامتری شکست را جهت تعیین مقدار چقرمگی شکست در مود ۱ ارائه دادند (Jenq & Shah, 1985). با این حال، یک ترک در بتن ممکن است در حین پخش حتی در مود ۱ بارگذاری در اثر ناهمگنی ناشی از آرایش تصادفی سنگدانه ها و الیاف تغییر مسیر دهد. بنابراین و نتادوری و همکاران در سال ۲۰۱۶ بر اساس تئوری کاستیلیانو و آنالیز عددی مدل دو پارامتری شکست را برای شرایط تغییر مسیر رشد ترک در مود یک اصلاح نمودند (Vantadori, et. al, 2016). نوآوری مدل دو پارامتری اصلاح شده در نظرگیری احتمال تغییر مسیر ترک در حین رشد آن است (Cotterell & Rice, 1980; Kitagawa et al., 1975). در نتیجه، مدل مذکور می‌تواند برآورد دقیق‌تری از مقدار واقعی چقرمگی شکست در مود ۱ بارگذاری را داشته باشد (Carpinteri, Berto, et al., 2017). از آنجایی که الیاف ماکرو ظرفیت قابل توجهی در افزایش باربری ناحیه پس‌ترک‌خوردگی دارند، این سوال مطرح است که این الیاف تا چه میزان بر شکل‌گیری الگوی رشد ترک تأثیرگذار خواهند بود. استفاده از مدل دو پارامتری اصلاح شده با توجه به در نظرگیری احتمال تغییر مسیر رشد ترک، امکان این

می‌گردد: الیاف شیشه‌ای، الیاف طبیعی، الیاف فلزی و الیاف سنتتیک. قابلیت الیاف در بهبود خواص و عملکرد بتن به عوامل زیادی چون نوع الیاف، درصد الیاف، نسبت ظاهری الیاف، اصطکاک سطحی و مقاومت کششی الیاف وابسته است (Yin & Hsu, 1995). الیاف فلزی دارای مدول الاستیسیته و سختی نسبتاً بالایی هستند که معمولاً سطح آنها مقاوم در برابر محیط قلیایی ماتریس سیمانی انتخاب می‌گردد. برای الیاف فلزی، استاندارد ASTM حداقل مقاومت کششی لازم را ۳۴۵ مگا پاسکال و استاندارد JSCE ۵۵۲ مگا پاسکال در نظر گرفته‌اند و انجمن بتن آمریکا نسبت ظاهری این الیاف رو بین ۲۰-۱۰۰ تعریف نموده است (ASTM 820, JSCE SF4, 1984, ACI 520, 2008). الیاف فلزی در مقایسه با الیاف ماکروسنتتیک به دلیل سختی و مدول بالاتر عملکرد بهتری در ناحیه پس‌ترک‌خوردگی دارند، در حالی که الیاف ماکروسنتتیک در مقایسه با الیاف فلزی، بدلیل عملکرد بهتر مانند کاهش وزن بتن سازه‌ای، مقاومت سایش بالاتر، مقامت باقیمانده خمشی بیشتر و عملکرد بهتر ضربه‌ای می‌تواند راه حل مناسب تری در مسلح نمودن بتن باشد. الیاف سنتتیک معمولاً در چهار دسته آرومید، پلی‌الفین، اکریلیک و کربن تولید می‌شوند. از منظر کاربرد و اندازه، الیاف سنتتیک به دو دسته میکرو و ماکرو دسته بندی می‌شوند. الیاف میکرو با مدول الاستیسیته پایین با قطر $10\text{--}5\ \mu\text{m}$ و طول $30\text{--}50$ میلی‌متر جهت کنترل انقباض پلاستیک در بتن تازه و الیاف ماکرو با سطح مقطع $2\text{--}1\ \text{mm}^2$ و طول $60\text{--}30$ میلی‌متر جهت بهبود مقاومت کششی نسبی پایین بتن و رفتار پس از ترک‌خوردگی بکار گرفته می‌شوند. شایان ذکر است که الیاف ماکرو نیز بر روی کاهش ترک‌های انقباضی پلاستیک بتن تأثیر موثر دارد (Rooholamini et al., 2018b). اخیراً، تحقیقات بسیاری بر روی اثر استفاده از انواع مختلف الیاف ماکرو بر مشخصات مکانیکی بتن صورت پذیرفته است. جدول ۱ بیانگر خلاصه‌ای از مطالعات اخیر بر اثر استفاده از الیاف بر عملکرد مشخصات مکانیکی بتن همچون مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و کششی بتن می‌باشد. بیشترین اثر استفاده از الیاف ماکرو را می‌توان به ترتیب بر روی چقرمگی، مقاومت خمشی و مقاومت کششی بتن بیان نمود (By et al., 2014). در بحث اثر الیاف بر مقاومت فشاری، همانطور که

ارزیابی را در شرایط مود کششی شکست فراهم می‌سازد. بر این اساس، در این تحقیق، آزمایش تیر خمشی سه نقطه‌ای بر روی بتن غلتکی مسلح الیافی براساس مدل MTPM جهت دستیابی به موارد زیر انجام پذیرفت.

۱- تعیین مقدار چقرمگی شکست در مود ۱ بارگذاری با در نظرگیری احتمال تغییر مسیر ترک در حین رشد آن.

۲- بررسی اثر الیاف فلزی و ماکروستتیک بر احتمال انحراف ترک از مسیر اصلی و میزان تاثیر آن بر زاویه لولای ترک.

۳- ارزیابی اثر الیاف فلزی و ماکروستتیک بر رفتار ناحیه پس- ترک خوردگی با استفاده از آزمایش تیر سه نقطه‌ای با شیار.

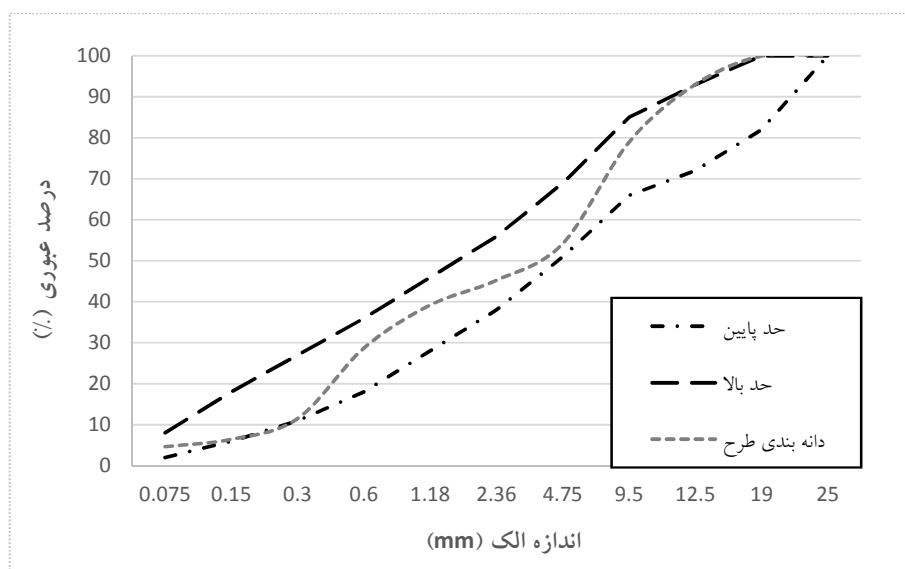
جدول ۱. خلاصه نتایج یافته‌های تحقیقات اخیر در زمینه بتن مسلح شده الیافی (↑ افزایش، ↓ کاهش، ن: ناچیز)

محققان	سال انتشار	نوع بتن	مشخصات الیاف مصرفی			مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی
			نوع	محتیای (متر)	نسبت حجمی (%)			
کارادلیس و یوگی (Karadellis & Lin, 2015)	۲۰۱۵	بتن غلتکی	فلزی	۵۰	۱،۵	ن	-	٪۲۴↑
فلاح و نعمت زاده (Fallah et al., 2017.)	۲۰۱۷	بتن مقاومت بالا	پلی‌پروپیلن	۳۹	۱،۲۵ ، ۰،۷۵ ، ۰،۲۵	٪۸↑، ٪۳؛ ٪۴↓	٪(۲۷، ۹، ۸)↑	-
حسامی و همکاران (Hesami et al., 2016)	۲۰۱۶	بتن خود تراکم	پلی‌پروپیلن	۶۰	۰،۱۲ ، ۰،۱۰	٪۲↑، ٪۵↓	٪(۲۷، ۱۹)↑	٪(۳۳، ۲۶)↑
سیدانی و همکاران (Saidani, 2016)	۲۰۱۶	بتن معمولی	فلزی	۵۰	٪۴ (وزنی)	٪۲↓	٪۹۸↑	-
			لپی‌پروپیلن	۵۰	٪۴ (وزنی)	٪۵↓	٪۶۵↑	-
پازاک و پونیکووسکی (Pajak & Ponikiewski, 2013)	۲۰۱۳	خود تراکم	فلزی	۳۰	۱،۵ ، ۱ ، ۰،۵	٪(۳۴، ۳۲، ۲۰)↑	-	۱۵۱، ۵۵) ٪(۳۳۹)↑
حسامی و همکاران (Hesami et al., 2014)	۲۰۱۴	بتن متخلخل	فلزی	۳۶	۰،۵	٪۲۴↓	٪۳۳↑	٪۱۹↑
			PPS	۵۴	۰،۳	٪۲۸↓	٪۳۷↑	٪۲۱↑
			شیشه‌ای	۱۲	۰،۴	٪۳۲↓	٪۲۸↑	٪۲۷↑
یو و همکاران (Yew, et. al, 2015)	۲۰۱۵	بتن سبک	پلی‌پروپیلن (رشته‌ای)	۵۴	۰،۵ ، ۰،۳۷۵ ، ۰،۲۵	٪(۱۵، ۱۱، ۵)↑	٪(۳۳، ۲۴، ۸)↑	٪(۴۰، ۳۱، ۲۹)↑
			پلی‌پروپیلن	۳۰	۰،۵ ، ۰،۳۷۵ ، ۰،۲۵	٪(۱۴، ۱۰، ۳)↑	٪(۲۷، ۱۹، ۱۰)↑	٪(۳۰، ۲۲، ۱۸)↑
				۲۰	۰،۵ ، ۰،۳۷۵ ، ۰،۲۵	٪(۱۴، ۱۰، ۴)↑	٪(۲۱، ۱۴، ۱۳)↑	٪(۲۰، ۱۰، ۶)↑
افروغ ثابت و ازبکالوگلو (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015)	۲۰۱۵	بتن مقاومت بالا	فلزی	۶۰	۱ ، ۰،۷۵ ، ۰،۵ ، ۰،۲۵	٪(۱۹، ۱۵، ۱۴، ۱۲)↑	-	٪(۶۱، ۲۸، ۱۴)↑
الحوزیمی و همکاران (Alhozaimy et al., 1996)	۱۹۹۶	بتن معمولی	پلی‌پروپیلن	-	۳ ، ۲ ، ۱ ، ۰،۵	ن	-	ن، ۴۴، ۲۷۱) ٪(۳۸۶)↑

۲- مصالح مصرفی و ساخت نمونه‌ها

سربار فلزی مکعبی با سطح تماسی 5×50 سانتی‌متر به وزن $12,7$ کیلوگرم جهت ایجاد انرژی تراکم یکسان مطابق با استاندارد ASTM C1176 استفاده گردید. تیرهای ساخته شده به مدت 28 روز در دمای 25 درجه سانتی‌گراد جهت انجام آزمایش تیر سه نقطه‌ای عمل آوری شدند. الیاف ماکرو معمولاً در مرحله اختلاط به بتن آماده اضافه می‌گردد و این بتن مشکلی جهت اجرا و پمپینگ ندارد. در این تحقیق، پس از مخلوط کردن سیمان و آب و سنگدانه، الیاف به مخلوط سیمانی اضافه گردید و جهت توزیع یکنواخت الیاف، به مدت زمان دو دقیقه با استفاده از میکسر بتن ترکیب گردید. یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر دوام و مشخصات مکانیکی بتن غلتکی میزان تراکم است.

در این تحقیق، از سیمان تیپ دو استفاده گردید. همچنین از سنگدانه‌های سیلیسی رودخانه‌ای با حداکثر اندازه سنگدانه 19 میلی‌متر و با دانه‌بندی در محدوده نشریه 354 مطابق شکل ۱ استفاده گردید (نشریه 354 ، 1392). مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فلزی و سنتتیک استفاده شده در جدول لیست گردیده است. همچنین طرح مخلوط بتن غلتکی براساس یافته‌های قبلی (Rooholamini et al., 2018a, 2018c) انتخاب گردید که اطلاعات آن در جدول ۳ نمایش داده شده است. امروزه روش‌های متنوعی جهت تراکم نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی توصیه شده است که از مهمترین آنها می‌توان به استفاده از میز ویبره و سربار با استفاده از چکش لرزان اشاره نمود. برای ساخت و تراکم یکنواخت تیرهای خمشی در طول تیر، از میز ویبره و یک



شکل ۱. دانه‌بندی مخلوط بتن غلتکی

جدول ۲. مشخصات الیاف مصرفی

نوع الیاف	جنس	قطر (mm)	طول (mm)	وزن مخصوص	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
ماکرو سنتتیک	پلی‌پروپیلن	۰,۴	۳۸	۰,۹۱	۶۱۰	۹,۵
فلزی	استیل	۱	۳۵	۷,۸	۱۱۶۰	۲۱*۱۰۴

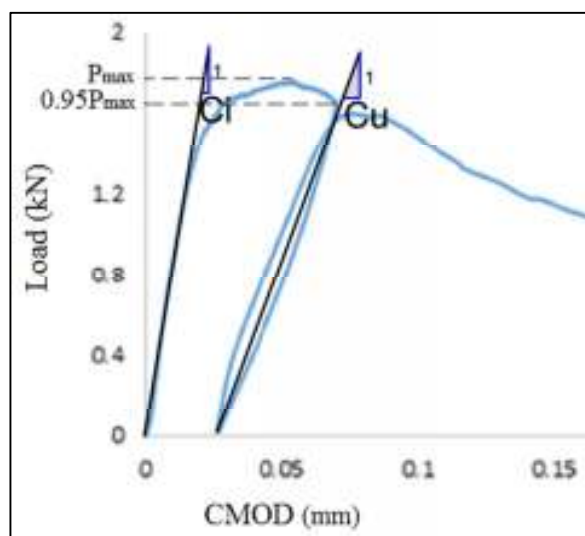
جدول ۳. طرح مخلوط و کارایی بتن غلتکی الیافی

نوع نمونه	سیمان مصرفی	W/C	(%) درصد حجمی الیاف مصرفی	زمان وی بی (ثانیه)
N	۳۵۰	۰/۴۲	۰	۳۵
P			۰/۵	۴۱
P0.5			۰/۷	۴۰

۳-مدل دو-پارامتری شکست اصلاح شده

روسازی‌های بتنی عمدتاً در اثر بارگذاری در شرایط مود کشش خالص شکست (مود I) قرار می‌گیرند. منتهی در شرایط رشد ترک، به دلیل وجود سنگدانه‌های درشت، این امکان وجود دارد که ترک مطابق با ابعاد سنگدانه‌ها تا حدودی منحرف شده و رشد ترک در مود ترکیبی کشش و برش قرار گیرد. با استفاده از مدل دو-پارامتری شکست اصلاح شده (MTPM) که توسط خانم و نتادوری و همکاران در سال ۲۰۱۶ جهت محاسبه چقرمگی شکست بتن ارائه گردیده است امکان این ارزیابی در مقیاس آزمایشگاهی فراهم گردیده است (Vantadori, et. al, 2016). در این روش، یک نگرش گام به گام بمنظور تعیین ضریب شدت تنش در مود ۱ بارگذاری (کشش خالص) با در نظرگیری امکان رشد ترک در مود ترکیبی کشش و برش در نظر گرفته شد. از منظر ابعاد، یک تیر منشوری با شیار تعبیه شده در پایین دهانه آن، مطابق با مدل دو پارامتری شکست با ابعاد

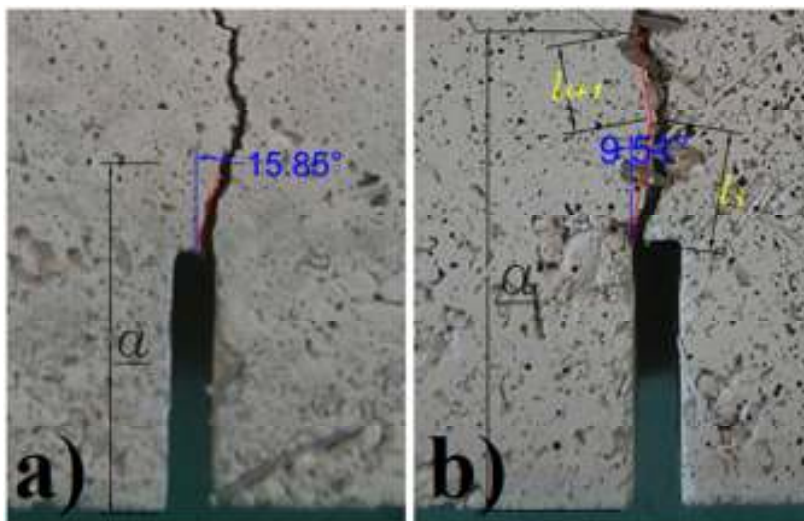
$\alpha_0 = a_0/W$ و نسبت عمق شیار $W=2B$, $S/W=4$ بکار گرفته شد. آزمایش در شرایط بارگذاری تیر خمشی سه نقطه‌ای صورت پذیرفت. به منظور اندازه‌گیری بازشدگی دهانه ترک از یک کلیپ گیج با دقت ۰,۱ میکرون و دامنه اندازه‌گیری ۱-/+۴ میلی‌متر با نرخ بارگذاری ۰,۲ میلی‌متر بر ساعت استفاده گردید. با رسیدن بار به حد بیشینه خود و کاهش ۵٪ در مقدار بار بیشینه، مرحله باربرداری کامل بار در راستای منفی مطابق شکل انجام گردید. سپس، بارگذاری با سرعت ۰,۱ میلی‌متر/دقیقه تا نقطه شکست ($CMOD=3.5mm$ یا ۹۵٪ کاهش بار بیشینه) ادامه یافت. نرمی اولیه و نرمی باربرداری (Cu, Ci) از نتایج آزمایش انجام شده به روش حداقل مربعات در ناحیه خطی بصورت پلکانی با طول گام ۰,۰۰۱ میلی‌متر مطابق شکل ۲ استخراج گردید.



شکل ۲. استخراج نرمی اولیه و نرمی باربرداری از نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک

بخشی که بیشترین طول را دارد (مانند شکل ۳ الف) تعیین گردید. میانگین مقدار زاویه لولا در دو وجه شکسته شده تیر به عنوان θ در نظر گرفته شد.

در مرحله بعد، زاویه شکست (θ) برای هر آزمایش از طریق برازش خط بر مسیر رشد ترک جهت به دست آوردن طول موثر ترک (a) استفاده گردید. در حالتی که زاویه لولا در مسیر رشد ترک منحرف می‌گردد زاویه لولا براساس زاویه



شکل ۳. نحوه محاسبه زاویه لولا

به منظور محاسبه مدول الاستیسیته، با استفاده از نرمی الاستیک خطی C_i به صورت زیر محاسبه گردید (Rooholamini et al., 2018b):

$$E_1 = \frac{6Sa_0V(\alpha_0)}{C_i w^2 B} \quad (1)$$

که در معادله فوق $V(\alpha_0)$ از معادله ۲ محاسبه می‌گردد:

$$V(\alpha_0) = 0.76 - 2.28\alpha_0 + 3.87\alpha_0^2 - 2.04\alpha_0^3 + \frac{0.66}{1-\alpha_0^2} \quad (2)$$

در شرایط رشد مایل ترک، به منظور محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی، $K_{(I+II)C}^S$ طول بحرانی موثر ترک از معادله ۴ با استفاده از تئوری کاستیلیانو و آنالیز عددی برای ترک خمشی محاسبه گردیده است (Rooholamini et al., 2018b):

$$E_2 = \frac{6SaV(\alpha_0)}{C_u w^2 B} \quad (3)$$

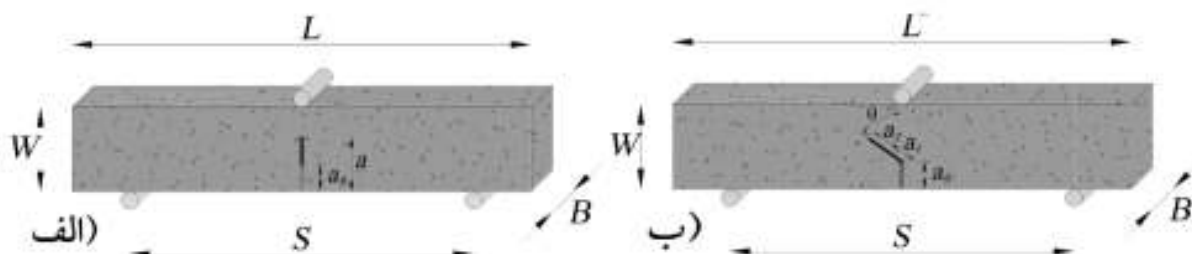
$$E_3 = \frac{6S}{C_u w^2 B} \left\{ a_0 V\left(\frac{\alpha_0}{W}\right) + \left[\cos^6\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \times \left[(a_0 + a_1 \cos \theta) V\left(\frac{(a_0 + a_1 \cos \theta)}{W}\right) - \alpha_0 V\left(\frac{\alpha_0}{W}\right) \right] + \left[\cos^3(\theta) + \sin^2(\theta) \cos(\theta) \right] \times \left[(a_0 + (a_1 + a_2) \cos \theta) V\left(\frac{a_0 + (a_1 + a_2) \cos \theta}{W}\right) - (a_0 + a_1 \cos \theta) V\left(\frac{a_0 + a_1 \cos \theta}{W}\right) \right] \right\} \quad (4)$$

که در آن $a = a_0 + (a_1 + a_2) \cos \theta$ ، $a_1 = 0.3a_0$ و $V(\alpha)$ از معادله ۲ با جایگزینی α_0 با $\alpha = a/W$ و قابل استخراج است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، طول ترک مورب شامل دو قسمت به نام‌های a_1 و a_2 می‌باشد. در صورتی که مقدار a_2 منفی بدست آید ($a_1 \leq 0.3a_0$)، طول موثر بحرانی ترک بایستی برابر $a = a_0 + a_1$ در نظر گرفته شود. بنابراین بمنظور محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی، $K_{(I+II)C}^S$ ، طول موثر بحرانی ترک (a) از معادله ۵ محاسبه می‌گردد.

(۵)

$$E_4 = \frac{6S}{C_u w^2 B} \left\{ a_0 V\left(\frac{\alpha_0}{W}\right) + \left[\cos^6\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \times \left[(a_0 + a_1 \cos \theta) V\left(\frac{(a_0 + a_1 \cos \theta)}{W}\right) - \alpha_0 V\left(\frac{\alpha_0}{W}\right) \right] \right\}$$

شایان ذکر است که با در نظر گیری مقدار زاویه لولا برابر صفر، معادله ۳ و ۴ مقدار مشابه‌ای را نتیجه می‌دهند.



شکل ۴. رشد ترک در: الف) مود خالص کشش ب) مود ترکیبی کشش و برش

در نهایت، ضریب شدت تنش بحرانی با استفاده از مقدار ماکزیمم بار (P_{max}) برای حالت‌های مختلف به شرح زیر محاسبه می‌گردد (Rooholamini et al., 2018b):

$$K_{IC}^S = \frac{3P_{max}S}{2W^2B} \sqrt{\pi a} f(\alpha) \quad (6)$$

$$K_{(I+II)C}^S = \frac{3P_{max}S}{2W^2B} \sqrt{\pi [a_0 + (a_1 + a_2) \cos \theta]} f(\alpha) \quad \text{با } \alpha = \frac{a_0 + (a_1 + a_2) \cos \theta}{W} \quad \text{اگر } a_1 \geq 0.3a_0 \quad (7)$$

$$K_{(I+II)C}^S = \frac{3P_{max}S}{2W^2B} \sqrt{\pi [a_0 + a_1 \cos \theta]} f(\alpha) \quad \text{با } \alpha = \frac{a_0 + a_1 \cos \theta}{W} \quad \text{اگر } a_1 \leq 0.3a_0 \quad (8)$$

در حالی که تابع $f(\alpha)$ بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.70\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (9)$$

نهایتاً، بمنظور امکان در نظر گیری تاثیر زاویه رشد ترک، از پارامتر شاخص خطا (I_e) بصورت زیر استفاده گردید:

$$I_e = \frac{K_{(I+II)C}^S - K_{IC}^S}{K_{IC}^S} 100\% \quad (10)$$

۴-تحلیل نتایج

۴-۱-نتایج مدل دو پارامتری شکست

جدول ۲ نتایج ضریب شدت تنش ناشی از آزمایش تیر خمش سه نقطه‌ای با شیار را نشان می‌دهد. براساس نتایج مدل MTPM، در اکثریت نمونه‌ها اختلاف بین چقرمگی شکست K_{IC}^S و $K_{(I+II)C}^S$ کوچک است ($I_e \leq 1$). هرچند که در برخی موارد (طول موثر ترک کم یا زاویه ترک زیاد) میزان این خطا حتی تا میزان ۱۱,۵٪ تاثیرگذار بوده است.

۴-۲-اعتبارسنجی نتایج مدل دو پارامتری شکست

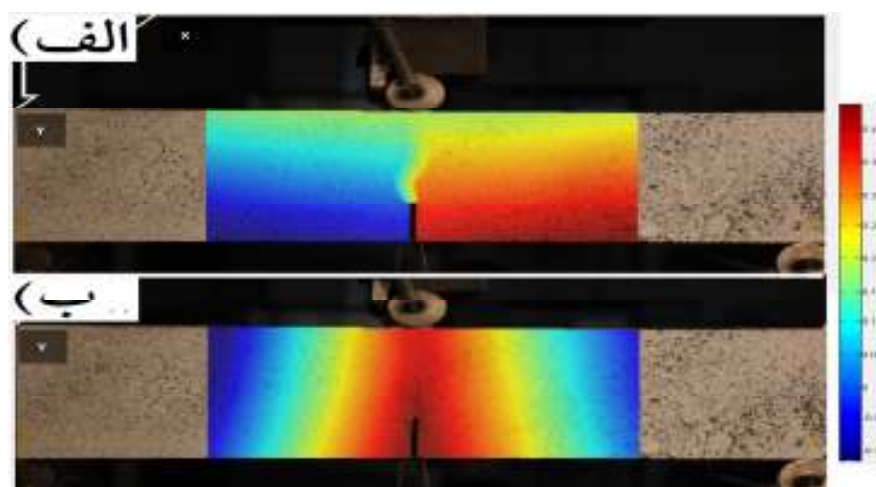
جهت ارزیابی صحت نتایج مدل دو پارامتری شکست در این تحقیق از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای استخراج نقشه دو بعدی جابه‌جایی نسبی در وسط دهانه هر تیر استفاده گردید. سطح هر یک از نمونه‌ها با پاشش نقاط تصادفی مشکی بر روی پس زمینه سفید جهت تمایز پیکسل‌های تصاویر برداشت شده توسط دوربین دیجیتال (Nikon D3X پیکسل ۶۰۳۲*۴۰۳۲) پرداخت گردید. با

شروع آزمایش تصاویر با فاصله زمانی ۱۵ ثانیه تا اتمام آزمایش ثبت گردید. تصاویر برداشت شده با استفاده از روش زمین مرجع کردن اصلاح و هم محور شد. میزان جابه‌جایی افقی نسبی برای وسط دهانه تیر با مقایسه تصویر شروع آزمایش و زمان رسیدن بار به حداکثر بار محاسبه گردید (نمونه شکل ۵). جابه‌جایی نسبی افقی بدست آمده برای محور قائم در محل میانه تیر با در نظرگیری ۱۰۰ نقطه در ارتفاع تیر ترسیم گردید. نمودارهای خاکستری ترسیم شده در شکل ۶ روند تغییرات جابه‌جایی افقی نسبی برای ۴ نمونه از هر طرح مخلوط را نشان می‌دهد. با برآزش یک خط، محل انحراف منحنی از مسیر خطی (نقطه قرمز) بیانگر حداکثر طول موثر آزمایشگاهی ترک است. مطابق شکل ۶، مقدار به دست آمده از مدل MTPM برای a (ارتفاع خط چین) مطابقت قابل قبولی با مقدار آزمایشگاهی آن (نقطه قرمز) دارد.

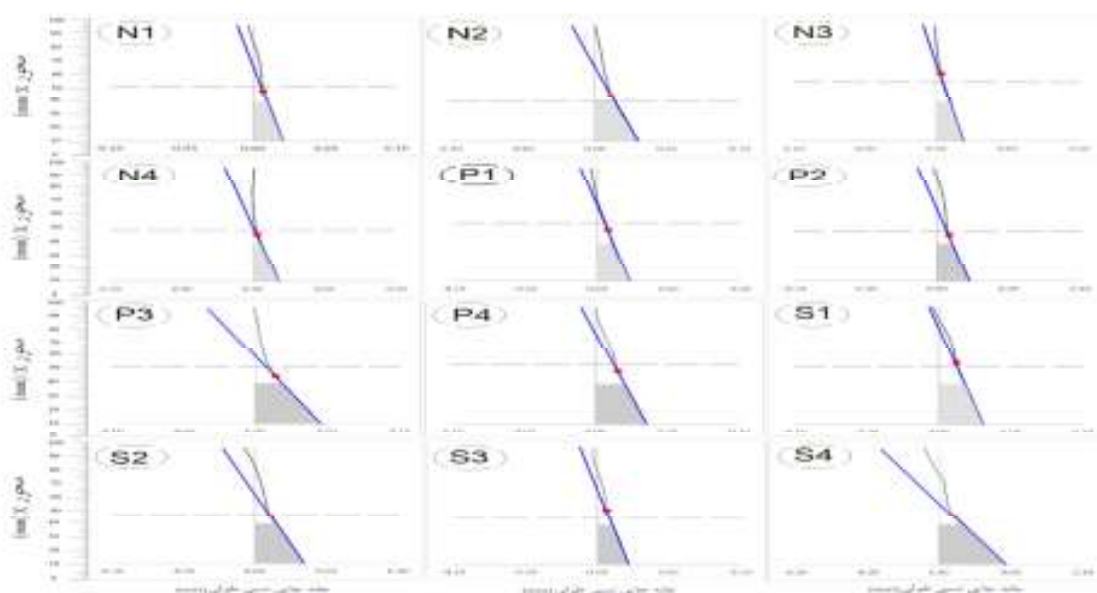
جدول ۲. خلاصه نتایج آزمایش سه نقطه‌ای براساس روش MTPM

شماره نمونه	P (N)	E (MPa)	a (mm)	Θ ($^{\circ}$)	K_{IC}^S (MPa.m $^{\frac{1}{2}}$)	$K_{(I+II)C}^S$ (MPa.m $^{\frac{1}{2}}$)	I_e (%)
N1	۲۱۱۵,۲۷	۳۱۶۹۵,۰۱	۴۷,۹۴	۱۲,۰۹	۱,۳۰۵	۱,۳۱۶	۰,۷
N2	۲۱۴۵,۱۴	۲۸۶۳۹,۳۹	۳۴,۰۴	۴,۰۳	۰,۸۹۳	۰,۹۷۲	۸,۹
N3	۲۱۱۶,۷۳	۳۱۹۲۱,۳۹	۵۲,۰۲	۹,۲۴	۱,۴۷۱	۱,۴۷۹	۰,۵
N4	۲۰۷۳,۱۹	۲۷۶۹۵,۵۴	۴۵,۳۷	۱۴,۷۳	۱,۱۷۵	۱,۱۸۶	۰,۹
N5	۱۶۰۷,۵۱	۲۴۳۰۰,۶۷	۵۶,۲۶	۱,۷۴	۱,۲۶۳	۱,۲۶۴	۰
N6	۱۹۰۵,۶	۲۲۳۲۸,۶۸	۴۳,۲۰	۶,۴۱	۰,۹۹۴	۰,۹۹۶	۰,۱
N7	۲۰۲۳,۹۲	۲۸۹۲۸,۶۰	۴۲,۷۷	۱۳,۶۹	۱,۰۶۴	۱,۰۷۱	۰,۷
N8	۱۵۱۸,۲۳	۲۵۷۵۵,۰۵	۴۸,۶۰	۸,۰۹	۰,۹۳۲	۰,۹۳۵	۰,۳
N9	۱۶۶۵,۶۲	۲۵۰۴۹,۷۳	۴۵,۴۰	۱۰,۷۰	۰,۹۱۸	۰,۹۲۳	۰,۴
N10	۱۷۲۹,۸۴	۲۳۰۶۱,۱۷	۴۵,۰۸	۱۱,۶۰	۰,۹۶۴	۰,۹۶۹	۰,۶
P1	۱۸۷۷,۲۵	۲۸۳۱۲,۷۸	۵۱,۵۱	۴,۹۴	۱,۲۶۱	۱,۲۶۳	۰,۱
P2	۲۴۰۷,۴۲	۲۵۵۱۹,۲۳	۴۴,۲۵	۷,۸۹	۱,۳۲۴	۱,۳۲۸	۰,۳
P3	۲۲۴۱,۰۳	۲۹۹۱۴,۴۲	۴۶,۹۵	۱۲,۶۹	۱,۳۵۱	۱,۳۶۱	۰,۷
P4	۲۱۲۵,۵۵	۲۹۷۱۲,۳۵	۴۹,۸۳	۱۱,۰۵	۱,۳۳۴	۱,۳۴۳	۰,۶
P5	۲۰۰۶,۱۴	۲۸۴۱۱,۴۶	۴۹,۲۰	۵,۰۰	۱,۲۷۵	۱,۲۷۷	۰,۱
P6	۱۷۲۵,۰۶	۱۱۱۱۵,۶۷	۳۵,۳۲	۸,۵۱	۰,۷۳۹	۰,۸۲۳	۱۱,۵
P7	۱۷۰۱,۲۳	۲۲۳۲۴,۳۱	۴۰,۶۲	۱۷,۴۷	۰,۸۳۶	۰,۸۴۴	۰,۹
P8	۱۷۶۴,۹۷	۲۹۶۹۶,۲۲	۵۲,۷۰	۵,۱۷	۱,۲۴۸	۱,۲۵۰	۰,۲

۲,۸۲	۱,۱۹۷	۱,۱۶۴	۶,۴۴	۴۰,۵۰	۲۲۴۲۴,۲۲	۲۴۲۶,۲۷	P9
۰,۲	۱,۲۰۸	۱,۲۰۵	۷,۶۵	۴۳,۵۸	۲۱۰۰۵,۲۰	۲۳۰۱,۱۰	P10
۰,۲	۱,۲۱۹	۱,۲۱۷	۵,۹۲	۴۷,۳۱	۲۲۶۴۰,۶۷	۲۰۱۶,۶۶	S1
۱,۲	۱,۱۰۰	۱,۰۸۶	۱۷,۲۴	۴۳,۳۷	۱۹۵۷۸,۶۴	۲۰۳۵,۴۱	S2
۰,۲	۱,۲۴۸	۱,۲۴۶	۷,۵۳	۴۰,۳۱	۳۰۳۵۶,۲۴	۲۵۰۰,۲۵	S3
۰,۷	۱,۱۰۵	۱,۰۹۶	۳,۴۸	۴۱,۵۱	۳۰۱۱۸,۷۵	۲۱۸۵,۳۶	S4
۰,۶	۰,۷۷۶	۰,۷۷۱	۳,۷۳	۴۰,۰۴	۲۹۶۶۸,۷۴	۱۵۶۳,۷۹	S5
۰,۱	۱,۲۵۵	۱,۲۵۴	۳,۰۳	۵۱,۱۷	۲۶۱۹۹,۶۴	۱۸۵۵,۷۲	S6
۰,۴	۱,۱۸۰	۱,۱۷۶	۱۰,۰۸	۴۴,۲۲	۲۹۱۱۵,۸۵	۲۱۶۴,۳۵	S7
۰,۱	۱,۲۲۲	۱,۲۲۱	۴,۹۲	۴۲,۰۰	۲۶۳۴۲,۴۴	۲۳۸۲,۱۹	S8

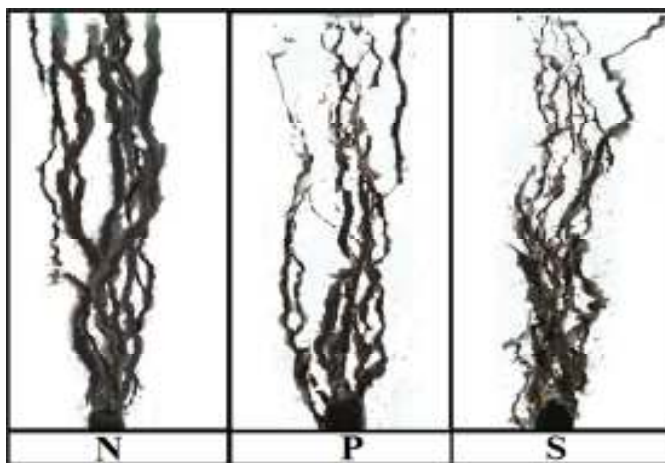


شکل ۵. محاسبه جابه‌جایی در نمونه N1 الف) جابه‌جایی نسبی افقی ب) جابه‌جایی نسبی قائم



شکل ۶. جابه‌جایی افقی نسبی در میانه تیر با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC)

۴-۳- ارزیابی اثر الیاف در وقوع زاویه لولا



شکل ۷. پوش مسیر رشد ترک در تیر سه نقطه‌ای شکست

از سوی دیگر، در بتن مسلح الیافی، ممکن است حضور الیاف در وقوع این احتمال موثر باشد. جهت بررسی این احتمال، با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه تاثیر نوع مخلوط بتن غلتکی بر روی زاویه رشد ترک استفاده گردید. با در نظرگیری نتایج بتن غیر مسلح به عنوان مدل پیشنهادی بصورت ذیل تعریف گردید:

$$\theta = \beta_0 + \sum_{j=1}^5 \beta_j x_j \quad (11)$$

جایی که θ زاویه لولا، $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ ضرایب جزئی رگرسیون، x_j متغیر ورودی مستقل است و در این مدل اینگونه تعریف شده است:

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{نمونه از نوع P} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}, \quad x_2 = \begin{cases} 1 & \text{نمونه از نوع S} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

ظاهری مختلف تاثیرگذاری معناداری بر وقوع خیز احتمالی ترک (نقطه لولا) و مقدار آن در حین رشد پایدار ترک ندارد. بنابراین، الگوی وقوع نقطه لولا در مود کشش خالص از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند و آرایش تصادفی سنگدانه‌ها در مسیر رشد ترک نقش اصلی را در وقوع یا عدم وقوع حالت لولا و مقدار زاویه آن ندارد.

جدول ۳ نتایج آنالیز مدل رگرسیون چندگانه را برای زاویه رشد ترک نشان می‌دهد. نتایج تحلیل مدل برازش خطی چندگانه مندرج در جدول ۳ حاکی از عدم تاثیرگذاری معنادار الیاف در مقدار زاویه رشد ترک در بازه اطمینان ۹۵٪ می‌باشد و مقادیر P-value برای متغیرهای مستقل تعریف شده، بیش از ۰،۰۵ می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حضور انواع مختلف الیاف با جنس، سختی و نسبت

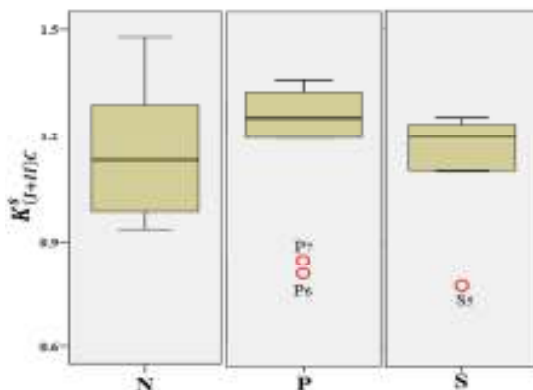
جدول ۳. مقادیر ضرایب رگرسیون زاویه شکست در مدل برازش چند خطی

متغیر مستقل	ضریب رگرسیون	P-value	t-value	خطای استاندارد
x_1	-۲،۲۴۱	۰،۴۲۴	-۰،۷۸	۲،۸۷۵۳
x_2	-۲،۴۶۴	۰،۳۵۷	-۰،۹۳	۲،۶۵۰۱
عدد ثابت	۹،۲۳۲	۰،۰۰۰	۴،۹۳	۱،۸۷۳۷

۴-۴-شناسایی داده‌های پرت

نمایش داده شده برای نقاط توکی ما بین چارک بالا (Q_1) و چارک پایین (Q_3) (به ترتیب فراوانی ۲۵٪ و ۷۵٪) رسم گردیده است (Bremer, 1995). فاصله دو چارک ذکر شده (IQR) به عنوان مبنای تشخیص داده‌های پرت در نظر گرفته شد و داده‌هایی که فاصله‌ی بیش از $1.5 * IQR$ به عنوان داده پرت در نظر گرفته شد و در ادامه تحلیل‌ها از جامعه آماری حذف گردید.

داده پرت به داده‌هایی اطلاق می‌گردد که معمولاً در یک مجموعه داده نسبت به سایر مقادیر موجود بزرگتر یا کوچکتر است. داده پرت مشاهده‌ای است که در فاصله دورتری از سایر داده‌ها قرار می‌گیرد و با مقدار مورد انتظاری که داریم متفاوت است. در شکل ۸، نمودار جعبه‌ای مربوط به ضرایب شدت تنش ($K_{(I+II)C}^S$) هر یک از طرح مخلوط‌های بتن غلتکی نشان داده شده است. نمودار جعبه‌ای

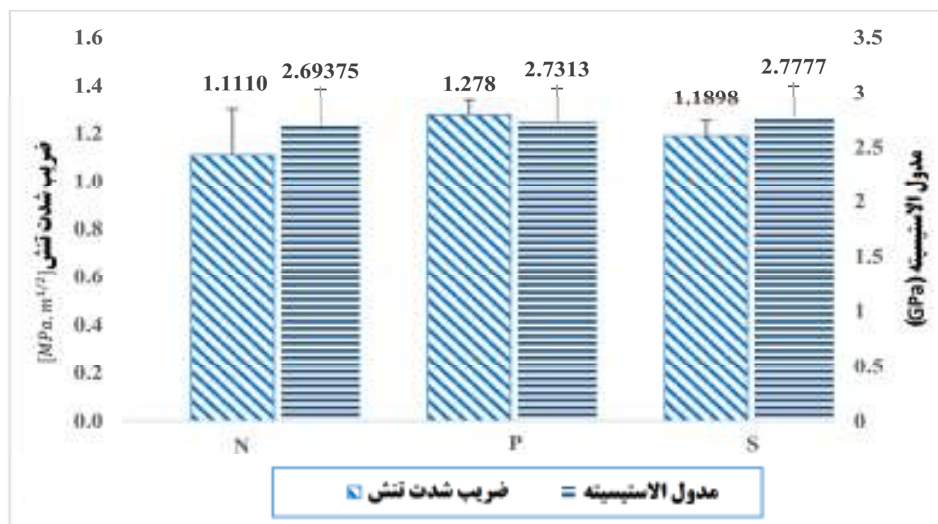


شکل ۸. نمودار جعبه‌ای توزیع ضریب شدت تنش مخلوط‌های بتن غلتکی (O: داده پرت)

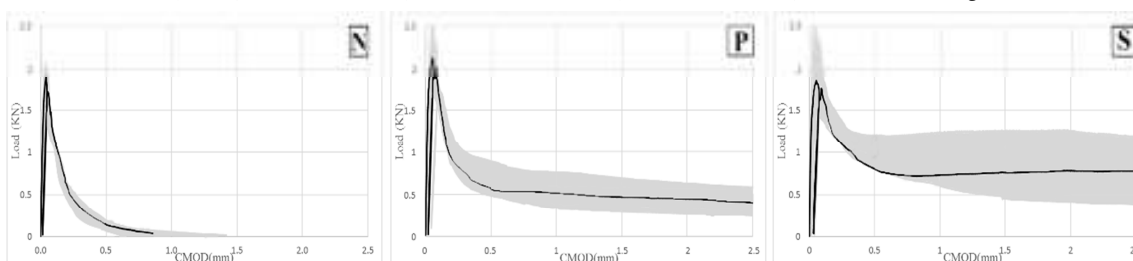
۴-۵-اثر الیاف بر عملکرد خمشی بتن غلتکی

پوش تغییرات نمودارهای هر یک از مخلوط‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. در ناحیه بعد از بار بیشینه، عملکرد الیاف فلزی به مراتب بهتر بوده و میزان مقاومت این الیاف در گسترش ترک‌های ماکرو منجر به ایجاد ناحیه سخت شدگی در نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک گردیده است. هر چند که طول الیاف فلزی کمتر از الیاف ماکرو سنتتیک است مهمترین عامل در ایجاد این سخت شدگی را می‌توان به مدول بالای این نوع الیاف نسبت داد. همچنین نمودار بتن غلتکی مسلح شده با الیاف فلزی دارای دامنه تغییرات بیشتری در ناحیه پس-ترک خوردگی است که دلیل آنرا می‌توان به وجود تعداد کمتر الیاف فلزی در مخلوط در مقایسه با الیاف ماکرو سنتتیک بیان نمود.

ضریب شدت تنش به دست آمده بر اساس مدل MTPM در شکل ۹ نشان داده شده است. با اضافه شدن الیاف ماکرو سنتتیک و فلزی به بتن غلتکی میزان ضریب شدت تنش به ترتیب ۱۵٪ و ۷٪ افزایش می‌یابد که مبین عملکرد بهتر الیاف ماکرو سنتتیک در برابر ایجاد و گسترش ترک‌های میکرو است. دلیل این امر را می‌توان به سختی کمتر و تعداد بیشتر این الیاف در مخلوط بتنی به دلیل وزن مخصوص به مراتب کمتر از الیاف فلزی نسبت داد. همچنین در بحث مدول الاستیسیته خمشی، حضور الیاف ماکرو سنتتیک و فلزی به ترتیب باعث افزایش مدول الاستیسیته به میزان ۵/۰ و ۱ درصد می‌گردد که حاکی از تأثیرگذاری کم الیاف در ناحیه پیش از ترک خوردگی بتن است. شکل ۱۰، پوش نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک را نشان می‌دهد. ناحیه خاکستری



شکل ۹. ضریب شدت تنش در حالت مود ترکیبی و مدول الاستیسیته خمشی برای مخلوط‌های بتن غلتکی



شکل ۱۰. پوش نمودار بار-بازشدگی ترک در آزمایش تیر سه نقطه‌ای شکست

۵- نتیجه گیری

درصد می‌گردد که حاکی از تأثیر گذاری کم الیاف در ناحیه پیش از ترک خوردگی بتن است. حضور انواع مختلف الیاف با جنس، سختی و نسبت ظاهری مختلف تأثیرگذاری معناداری بر وقوع خیز احتمالی ترک (نقطه لولا) و مقدار آن در حین رشد پایدار ترک ندارد. بنابراین الگوی وقوع نقطه لولا در مود کشش خالص از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند و آرایش تصادفی سنگدانه‌ها در مسیر رشد ترک نقش اصلی را در وقوع یا عدم وقوع حالت لولا و مقدار زاویه آن دارد.

۶- سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات دکتر و ننادوری و کارپنتری که در فراهم سازی بستر انجام آزمایشات در دانشگاه پارما به اینجانب کمک نموده‌اند نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تیر سه نقطه‌ای با شیار به روش دو-پارامتری اصلاح شده شکست، و همچنین تحلیل‌های آماری صورت پذیرفته و استفاده از تکنیک پردازش تصویر، نتایج زیر قابل حصول است: نتایج حاصل از مدل دو-پارامتری اصلاح شده شکست بدلیل در نظرگیری احتمال لولا شدن مسیر رشد ترک در مود خالص کششی، برآورد دقیق‌تری از نتایج آزمایشگاهی چقرمگی شکست را فراهم می‌سازد. در آزمایش تیر سه نقطه‌ای، با اضافه شدن الیاف ماکروسنتتیک و فلزی به بتن غلتکی میزان ضریب شدت تنش به ترتیب ۱۵٪ و ۷٪ افزایش می‌یابد که مبین عملکرد بهتر الیاف ماکروسنتتیک در برابر ایجاد و گسترش ترک‌های میکرو است. دلیل این امر را می‌توان به سختی کمتر و تعداد بیشتر این الیاف در مخلوط بتنی به دلیل وزن مخصوص به مراتب کمتر از الیاف فلزی نسبت داد. همچنین در بحث مدول الاستیسیته خمشی، حضور الیاف ماکروسنتتیک و فلزی به ترتیب باعث افزایش مدول الاستیسیته به میزان ۵/۰ و ۱

۷-مراجع

- Cotterell, B. and Rice, J., (1980), "Slightly curved or kinked cracks", *International journal of fracture*, 16(2), pp.155-169.
- Delatte, N.J., (2014), "Concrete pavement design, construction, and performance", Crc Press.
- Fallah, S. and Nematzadeh, M., (2017), "Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume", *Construction and Building Materials*, 132, pp.170-187.
- Hesami, S., Ahmadi, S. and Nematzadeh, M., (2014), "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement", *Construction and Building Materials*, 53, pp.680-691.
- Hesami, S., Hikouei, I.S. and Emadi, S.A.A., (2016), "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber", *Journal of Cleaner Production*, 133, pp.228-234.
- Hoaglin, D.C., Iglewicz, B. and Tukey, J.W., (1986), "Performance of some resistant rules for outlier labeling. *Journal of the American Statistical Association*", 81(396), pp.991-999.
- Jenq, Y. and Shah, S.P., (1985), "Two parameter fracture model for concrete", *Journal of engineering mechanics*, 111(10), pp.1227-1241.
- JSCE-SF4 III, P., (1984), "Method of tests for steel fiber reinforced concrete", *Concrete Library of JSCE, the Japan Society of Civil Engineers*.
- Karadelis, J.N. and Lin, Y., (2015), "Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete", *Construction and building materials*, 93, pp.498-505.
- Kitagawa, H., Yuuki, R. and Ohira, T., (1975), "Crack-morphological aspects in fracture mechanics", *Engineering Fracture Mechanics*, 7(3), pp.515-529.
- Libre, N.A., Shekarchi, M., Mahoutian, M. and Soroushian, P., (2011), "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice", *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2458-2464.
- ACI committee 544, 3R-08, (2008), "Guide for specifying, proportioning, and production of fibre reinforced concrete", American concrete institute, Farmington hills, USA.
- Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T., (2015), "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and building materials*, 94, pp.73-82.
- Alhozaimy, A.M., Soroushian, P. and Mirza, F., (1996), Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), pp.85-92.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) C1176/C1176M-08, 2008. Standard Practice for Making Roller-compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table.
- Arent, W.L., Kohn, S., Piggott, R.W., Berry, J.R., Larsen, R.L., Ragan, S.A., Cole, L., Lopez, R.W., Rice, J.L., Colucci, B. and McComb, R.A., 1994. State of the art report on roller compacted concrete pavements. *ACI Materials Journal*, 91(5), pp.509-516.
- ASTM, A., 820/A 820M-06., (2006), "Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete, American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee A", 1.
- Brandt, A.M., (2008), "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering", *Composite structures*, 86(1), pp.3-9.
- Bremer, R., 1995. Outliers in statistical data.
- Carpinteri, A., Berto, F., Fortese, G., Ronchei, C., Scorza, D. and Vantadori, S., 2017. Modified two-parameter fracture model for bone. *Engineering Fracture Mechanics*, 174, pp.44-53.
- Carpinteri, A., Fortese, G., Ronchei, C., Scorza, D. and Vantadori, S., 2017. Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Code 354, (2009), "Design and construction of roller compacted concrete pavement", Ministry of Road and Transportation Research and Education Center of Iran.

- Saidani, M., Saraireh, D. and Gerges, M., (2016), "Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture", *Engineering Structures*, 113, pp.328-334.
- Scorza, D., Luciano, R., Mousa, S. and Vantadori, S., (2020), "Fracture behaviour of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete used in pavements", *Construction and Building Materials*, pp.121554.
- Vantadori, S., Carpinteri, A., Fortese, G., Ronchei, C. and Scorza, D., (2016), "Mode I fracture toughness of fibre-reinforced concrete by means of a modified version of the two-parameter model", *Procedia Structural Integrity*, 2, pp.2889-2895.
- Yew, M.K., Mahmud, H.B., Ang, B.C. and Yew, M.C., (2015), "Influence of different types of polypropylene fibre on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 90, pp.36-43.
- Yin, Shi, et al., (2015), "Use of macro plastic fibres in concrete: a review, *Construction and Building Materials* 93", pp. 180-188.
- Lin, Y., Karadelis, J.N. and Xu, Y., (2013), "A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays", *Construction and Building Materials*, 48, pp.333-341.
- Modarres, A. and Hosseini, Z., (2014), "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material, *Materials & Design*, 64, pp.227-236.
- Pajak, M. and Ponikiewski, T., (2013), "Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers.", *Construction and Building Materials*, 47, pp.397-408.
- Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M.R.M., (2018), "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, *Construction and Building Materials*, 159, pp.517-529.
- Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M.R.M., (2018), "Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack", *Construction and Building Materials*, 187, pp.248-256.

Evaluating the Effect of Fibre on the Crack Growth of Fibre- Reinforced Roller Compacted Concrete Using Two-Parameter Fracture Model

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

E-mail: Rooholamini@Hormozgan.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

Roller compacted concrete pavement (RCCP) is a zero-slump and stiff-dry mixture which is usually placed with an asphalt paver and compacted by conventional vibratory roller compactors to achieve the required density. RCCP consistently has slightly lower cement content than conventional concretes of similar strength. Nowadays, RCCP is used for any type of industrial or heavy-duty pavement and has advantages including cost saving as a result of the construction method and the increased placement speed of the pavement. Therefore, the use of RCCP pavement has become more and more popular in recent years. There are numerous studies on the mechanical properties of fibre reinforced focused on cement paste and normal concrete. However, our understanding of what exactly happens when hybrid fibres used to reinforce RCCP mixes with respect to fracture toughness is quite limited. Accordingly, in this study, three point bending test was carried out on mono and hybrid fibre-reinforced RCCP based on modified two-parameter model to determine the value of Mode I plane-strain fracture toughness of fibre-reinforced RCCP by considering possibility of crack deflection during its propagation through modified two-parameter fracture model. Finally, it can be observed that, for great amount of fracture angle, the application of Two-parameter fracture model instead of modified Two-parameter fracture model cause to an overestimation of the fracture toughness values.

Keywords: Roller Compacted Concrete Pavement, Fibre, Two-Parameter Fracture Model, Crack Kink Angle, Image Processing