

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی

رامین چالشی، کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

بابک گلچین^{*}، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

رامین مشک آبادی، استادیار، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.golchin@uma.ac.ir

چکیده

بتن غلتکی به دلیل سرعت اجرا، هزینه نسبتاً پایین، عدم استفاده از میلگرد، مقاومت و دوام کافی در ساخت بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند روسازی راه‌ها، محوطه‌های پارکینگ، سدسازی، کف‌سازی محوطه‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌است. رفتار ترد و شکننده بتن غلتکی این ایده و فکر را ایجاد می‌کند که الیاف فولادی شاید بتوانند رفتار مکانیکی آن را بهبود دهند. در این پژوهش، اثر الیاف فولادی بر مقاومت شکست، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن غلتکی بررسی شد. در آزمایش مقاومت شکست، از نمونه‌های نیم دایره‌ای با ترک لبه‌ای و تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای برای شبیه‌سازی وضعیت کشش خالص، برش خالص و ترکیب آن‌ها استفاده گردید. مقاومت فشاری و کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن غلتکی در حضور الیاف فولادی نیز ارزیابی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن الیاف فولادی به مقدار ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه این نمونه‌ها را به ترتیب ۱۲، ۱۵ و ۳۶ بهبود می‌دهد. این افزایش برای مقاومت کششی نمونه‌ها به ترتیب ۱۴، ۲۱ و ۳۹ درصد است. با افزایش درصد الیاف فولادی، بار شکست تمام نمونه‌ها در تمام مدهای بارگذاری افزایش می‌یابد. افزایش بار شکست موجب مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک می‌شود. مناسب‌ترین مقدار الیاف فولادی برای بهبود مقاومت شکست بتن غلتکی به مقدار ۰/۳ درصد کل وزن نمونه بتنی در مدهای مختلف بارگذاری شناسایی شد. این عدد برای مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به مقدار ۰/۵ درصد است.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی، الیاف فولادی، استحکام، مقاومت شکست

Experimental Evaluating the Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Roller-compacted Concrete

Ramin Chaleshi^a, Babak Golchin^{b,*}, Ramin Meshkabadi^c

^a Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

^b Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^c Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Namin, Iran

Abstract

The use of roller-compacted concrete in construction projects, such as road paving, parking lots, dam construction, and industrial pavement, is attributed to its quick implementation, relatively low cost, and sufficient strength without the need for steel bar. However, the brittle nature of roller-compacted concrete prompted an investigation into how steel fibers could improve its mechanical behavior. This research focused on the effect of steel fibers on fracture strength, compressive strength, and tensile strength of roller-compacted concrete. The study involved testing semicircular samples with edge cracks under three-point bending loading to simulate pure tension, pure shear, and their combination. Additionally, the compressive and tensile strength of roller-compacted concrete samples with steel fibers were evaluated at 7 and 28 days. The laboratory results showed that adding 0.1%, 0.3%, and 0.5% steel fibers improved the 28-day compressive strength by 12%, 15%, and 36%, respectively, and the tensile strength by 14%, 21%, and 39%, respectively. Moreover, the failure load of all samples increased in all loading modes with higher percentages of steel fibers, leading to greater resistance to crack growth. The study identified 0.3% of steel fibers as the most effective amount for improving the fracture resistance of roller-compacted concrete in different loading modes, while the optimal percentage for enhancing the compressive and tensile strength was determined to be 0.5%.

Keywords: Roller-compacted Concrete, Steel Fibers, Strength, Fracture Toughness

مود برشی خالص و ترکیب کشش و برش با نام مود ترکیبی یا مود I/II نامیده می‌شوند. استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی می‌تواند در پیش‌بینی رشد و انتشار ترک مؤثر باشد. با رشد ترک و رسیدن به یک حد بحرانی ترک به‌طور ناگهانی گسترش یافته و نمونه ناپایدار و گسیخته خواهد شد [۴].

در پژوهش‌های اخیر، اثر الیاف فولادی بر رفتار بتن بررسی شده است. وظیفه‌خواه و مناف‌پور به بررسی مقاومت کششی بتن مسلح با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در نسبت‌های مختلف پرداختند [۵]. الیاف فولادی به میزان ۰،۰۳، ۰،۰۶، ۰،۰۹ و ۱/۲ و الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰، ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجم بتن مورد استفاده قرار گرفتند. در کلیه مخلوط‌ها از سیمان تیپ ۱ استفاده شد و نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ بود. نتایج نشان داد که مقاومت کششی بتن مسلح با الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف از ۰ تا ۰/۶ درصد به مقدار کمی افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش از ۰/۶ الی ۱/۲ درصد بیشتر تغییر می‌کند. مقاومت کششی نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۲ درصد در سنین ۷ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش می‌یابد ولی به‌طور کلی نمونه‌های دارای ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه بدون الیاف دارای افزایش مقاومت چشمگیری نیست [۵]. شاد دل و همکاران الیاف فولادی را در تهیه بتن سبک حاوی پرلیت، لیکا و میکروسیلیس استفاده کردند. تحقیق ایشان نشان داد که این الیاف مقاومت فشاری بتن سبک را بهبود می‌دهد [۶]. Leone و همکاران، از درصد‌های کم الیاف فلزی باز یافتی در بررسی رفتار برشی مخلوط‌های بتنی استفاده کردند. یافته‌های پژوهش ایشان، استفاده از این الیاف را در مخلوط‌های بتنی پیشنهاد داد [۷]. در مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار بتن غلتکی، لاهوجیک و همکاران، از دو الیاف فلزی و چند الیاف مصنوعی دیگر در مقدار ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجمی در ساخت مخلوط‌ها استفاده کردند. بتن‌های حاوی این الیاف، مشخصات شکست مشابه و یا مشخصات بهتری را نسبت به بتن‌های غلتکی بدون الیاف نشان دادند [۲]. سوکونتا سکو و همکاران از الیاف فولادی در مقدار ۰/۵ و ۱ درصد برای تهیه نمونه‌های بتن غلتکی استفاده کردند [۸]. این الیاف توانستند مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی را بهبود دهند. سیف الهی و محمدی رفتار مکانیکی بتن غلتکی را در حضور صفر تا یک درصد الیاف فولادی به همراه افزودنی نانوسیلیکا بررسی کردند [۹]. در این پژوهش نیز رفتار مکانیکی بتن غلتکی بهبود یافت. ابوبکر و همکاران نشان دادند که افزودن الیاف فولادی می‌تواند دوام بتن غلتکی را در حضور متاکائولین ارتقا دهد [۱۰].

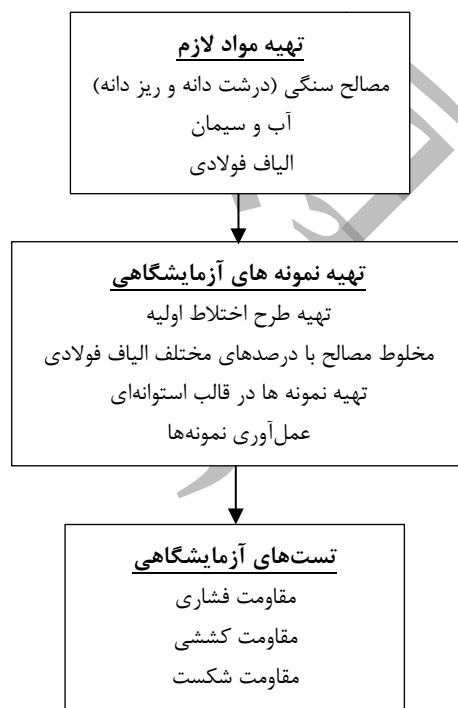
هزینه‌های ساخت و نگهداری راه‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترها در سرمایه‌گذاری‌های بخش حمل‌ونقل است. این هزینه‌ها به مقدار زیادی از نوع روسازی اثر می‌پذیرد. در کشور ما به دلیل ارزان بودن قیر در دهه‌های گذشته فناوری ساخت روسازی با بتن و علی‌الخصوص بتن غلتکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سهولت و سرعت ساخت، هزینه نسبی پایین در ساخت، مقاومت و دوام بتن غلتکی، آن‌ها را به یک گزینه قابل قبول در ساخت لایه‌های روسازی راه‌ها تبدیل کرده است. یکی از معایب مخلوط‌های بتنی، شکل‌پذیری نامناسب و شکنندگی آن‌ها است. این عیب در اکثر سازه‌های بتنی با میلگردهای فولادی برطرف می‌شود. در روسازی‌های بتن غلتکی از میلگردهای فولادی استفاده نمی‌شود [۱]. این امر باعث به وجود آمدن ترک‌های مختلف در این سازه‌ها می‌گردد. یکی از راه‌حل‌های موجود برای بهبود رفتار روسازی‌های بتن غلتکی، استفاده از انواع الیاف می‌باشد [۲]. الیاف فولادی به دلیل مزایای مختلف فنی و اقتصادی، کاربرد زیادی در سازه‌های بتنی دارند. بتن حاوی الیاف فولادی، شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی، آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی کوتاه می‌باشد که الیاف به صورت کاملاً اتفاقی در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده‌اند. وجود الیاف فولادی مشخصات بتن را نسبت به حالت بدون الیاف بهبود می‌دهد [۳]. در روسازی بتن غلتکی از مواد حباب‌زا استفاده نمی‌شود. مواد حباب‌زا می‌توانند شبکه ریزی از حباب‌های هوا را در بتن ایجاد نموده و کارایی و مقاومت بتن را در برابر شرایط ذوب و یخبندان بهبود دهند. در بتن غلتکی از غلتک‌های سنگین برای تراکم بتن استفاده می‌شود. این عمل به کاهش حفرات هوا در بتن کمک نموده، چگالی و مقاومت آن را افزایش می‌دهد. استفاده از مواد حباب‌زا با فرایند تراکم تداخل ایجاد می‌کند و از رسیدن بتن غلتکی به چگالی مورد نظر جلوگیری می‌کند. در نتیجه مقاومت این بتن را کاهش می‌دهد.

در روسازی‌های بتن غلتکی، به دلیل رفتار ترد و نیمه ترد بتن می‌توان از مفاهیم مکانیک شکست در بررسی رشد ترک استفاده کرد. در این زمینه با استفاده از انواع مودهای بارگذاری، نحوه جدا شدن و ازهم‌گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی بررسی می‌گردد. این بارگذاری‌ها در سه حالت کشش خالص، برش خالص و ترکیب کشش و برش خالص می‌توانند اعمال شوند. بدین منظور کشش خالص معمولاً با نام مود I یا مود کشش خالص، برش خالص به صورت مود II یا

نتایج آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است. در تهیه نمونه‌های بتن غلتکی از الیاف فولادی دو سر قلاب با طول ۵۴ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد. نسبت طول به عرض الیاف ۶۷/۵ و مقاومت کششی آن‌ها ۱۰۰۰ مگاپاسگال بودند. در شکل ۲ الیاف فولادی مذکور نشان داده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

با توجه به اینکه نوع بتن در این تحقیق از نوع بتن غلتکی می‌باشد برای تعیین طرح اختلاط از استاندارد نشریه شماره ۳۵۴ ایران و استاندارد PCA استفاده گردید. روش‌های طرح اختلاط بتن غلتکی به دلیل سفت بودن مخلوط و نیز دانه‌بندی متمایز آن، با روش‌های بکار رفته برای بتن‌های معمولی متفاوت است. روش طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق، اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن است. در کلیه روش‌های بتنی جهت دستیابی به مقاومت فشاری طرح یا الزامات دوام نسبت آب به مواد سیمانی مدنظر قرار می‌گیرد و همچنین اجزاء مخلوط به گونه‌ای تعیین می‌شوند که کارایی مخلوط جهت تراکم با غلتک و پیره‌ای مناسب باشد. این کارایی بر پایه انجام آزمایش روانی به روش تعیین زمان لازم جهت تراکم نمونه تحت سربار و در حالت ارتعاشی (زمان وی‌بی اصلاح‌شده) تعیین می‌گردد.



شکل ۱- الگوریتم روش تحقیق

به‌عنوان یک نتیجه از بررسی رفتار تحقیقات گذشته می‌توان تأثیر مثبت الیاف فولادی را در نمونه‌های بتنی مختلف و بتن غلتکی مشاهده کرد.

در سال‌های اخیر، بررسی رفتار شکست بتن‌های غلتکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۱-۱۳]. علاوه بر بتن غلتکی، این رفتار در مخلوط‌های آسفالتی، در مدهای مختلف برش و کشش توسط علیها و همکاران [۱۴] و گلچین و صفایی [۱۵] بررسی شده است. در بررسی رفتار سنگ‌ها، این موضوع برای ترکیب برش و کشش توسط میرسیار و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶]. فخری و همکاران به بررسی رفتار ترک در مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافت شده و خرده لاستیک پرداختند [۱۱]. در این پژوهش برای تولید مدهای مختلف بارگذاری از نمونه‌های خمشی چهار نقطه‌ای و نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان جذب انرژی در بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافت شده افزایش می‌یابد. رحمانی و همکاران اثر نسبت آب به سیمان را بر رفتار شکست بتن غلتکی بررسی کردند [۱۲]. نتایج شکست نمونه‌ها نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد. سنگون و همکاران رفتار شکست بتن غلتکی را بر اثر تراکم درجا و در محل بررسی نمودند [۱۳]. نتایج نشان داد که میزان تراکم و مشخصات مصالح به کار رفته در ساخت بتن غلتکی بر مقاومت شکست آن اثر می‌گذارد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اثر درصد‌های مختلف الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی بررسی می‌شود. بدین منظور الگوریتم روش تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲-۱- مواد لازم برای تهیه نمونه‌ها

سنگدانه‌هایی که در ساخت روسازی بتن غلتکی استفاده می‌شود باید استانداردهای دانه‌بندی ASTM C33 را رعایت نماید. بدین منظور، دانه‌بندی شن مصرفی در تهیه نمونه‌های بتن غلتکی در جدول ۱، خصوصیات درشت‌دانه مورد استفاده در جدول ۲ و دانه‌بندی ریزدانه مصرفی در جدول ۳ معرفی شده است. آب موردنیاز از شبکه آب‌رسانی شهر تبریز تهیه شده است. سیمان مورد استفاده سیمان نوع II از کارخانه سیمان صوفیان تبریز با وزن مخصوص برابر با ۳/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق استاندارد ASTM-C 188-89 می‌باشد.



شکل ۲- الیاف فولادی مورد استفاده

جدول ۱- دانه بندی مصالح درشت دانه مصرفی

۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵	اندازه الک (میلی متر)
۱۰-۰	۵۷-۲۰	۷۰-۴۵	۱۰۰-۹۰	۱۰۰	محدوده مجاز مطابق ASTMC33
۰	۳۴	۴۵	۹۵	۱۰۰	درصد عبوری از الک

جدول ۲- خصوصیات مصالح درشت دانه مورد استفاده

مشخصات درشت دانه	استاندارد مربوطه
حد اکثر اندازه درشت دانه	ASTM C137
وزن مخصوص خشک	ASTM C127
درصد سایش لوس آنجلس	ASTM C131
درصد شکستگی مصالح روی الک نمره ۴ در دو جبهه	ASTM D5821

جدول ۳- دانه بندی مصالح ریز دانه مصرفی

۰/۷۵۰	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۶۰	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	اندازه الک (میلی متر)
-	۱۷-۳	۳۴-۱۰	۶۵-۲۸	۸۷-۵۳	۱۰۰-۸۲	۱۰۰-۹۷	محدوده مجاز مطابق ASTMC33
۳	۸	۲۷	۵۴	۶۳	۷۷	۱۰۰	درصد عبوری از الک

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمان نوع II مورد استفاده در این تحقیق

ترکیب شیمیایی سیمان	درصد موجود در سیمان مصرفی
SiO ₂	۲۱/۲۲
Al ₂ O ₃	۴/۷۱
Fe ₂ O ₃	۳/۷۵
CaO	۶۲/۵۹
MgO	۳/۰۹
SO ₃	۱/۷۸
Na ₂ O	۰/۱۸
K ₂ O	۰/۵۸

در این تحقیق چهار نوع طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است که در هر طرح اختلاط ۸ نمونه و در مجموع ۳۲ نمونه ساخته شده است. در تمامی طرح اختلاطها میزان سنگدانه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ در نظر گرفته شده است. ابتدا شن و ماسه داخل میکسر ریخته شده، در حین عمل اختلاط، به تدریج سیمان اضافه می‌گردد و در پایان الیاف فولادی به تدریج به داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود. پس از ریختن تمامی مواد تشکیل‌دهنده به داخل مخلوط‌کن ۱/۵ دقیقه مواد مخلوط می‌شوند. بتن غلتکی داخل ظرف استوانه‌ای فلزی که روی میز قابل ارتعاش قرار دارد، ریخته می‌شود و وزنه استوانه‌ای فلزی که قطر آن کوچک‌تر از قطر ظرف است روی آن قرار داده می‌شود. سپس میز مرتعش کننده روشن می‌شود و زمان لازم از شروع ارتعاش تحت سربار تا رویت خمیر سیمان بیرون آمده از بتن غلتکی در محیط وزنه استوانه‌ای اندازه‌گیری می‌شود که این به منزله دستیابی به تراکم مناسب است. در طرح اختلاط اول که نمونه‌های اخذ شده از آن برای انجام آزمایش بدون الیاف به کار رفته است زمان وی‌بی ۳۳ ثانیه به دست آمده است. این زمان برای طرح اختلاط بتن غلتکی با درصد‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ (درصد وزن بتن غلتکی) به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۴۵ ثانیه به دست آمده است. در جدول ۵ طرح اختلاط مصالح نشان داده شده است. پس از ساخت مخلوط، بتن در داخل قالب‌ها ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت از ساخت نمونه‌ها قالب‌ها باز شده و در آب معمولی ۲۰ درجه سانتی‌گراد جهت عمل‌آوری قرار داده می‌شود. پس از گذشت زمان عمل‌آوری، بتن‌ها از آب خارج شده و پس از وزن کردن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای معمولی قرار داده می‌شود تا برای آزمایش‌ها آماده شوند. نمونه‌های استوانه‌ای در نهایت برش داده می‌شوند و ترک‌های لبه‌ای بر روی آن‌ها ایجاد می‌گردد.

۳-۲- آزمایش‌های صورت گرفته

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM C39/C39M-03 با نرخ بارگذاری بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۴ مگاپاسکال بر ثانیه صورت پذیرفت. در این آزمایش نمونه استوانه‌ای بین فک‌های دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود. مقدار این پارامتر برابر حداکثر تنش است که نمونه استوانه‌ای بتواند تحمل کند. در شکل ۳ یک نمونه بتن غلتکی که مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته، نشان داده شده است.

جهت انجام آزمایش مقاومت کششی بتن غلتکی نمونه‌های استوانه‌ای همانند نمونه‌های مقاومت فشاری به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از طرح اختلاط بتن غلتکی، در سنین ۷ و ۲۸ روزه تهیه گردید. همچنین نمونه‌های بتن غلتکی در سه لایه و با لرزش میز ویبره با سربار ۹/۱ کیلوگرم به دست آمد. هر طرح اختلاط شامل ۴ نمونه بوده که دو عدد در سن ۷ روز و دو عدد در سن ۲۸ روز آزمایش شده است. شکل ۴ آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی را نشان می‌دهد.

انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن و تحت بارگذاری استاتیک با نرخ ثابت بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت ترسیم منحنی بار در مقابل جابجایی، اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های بتنی را دارد. در شکل ۵ تصویری از چگونگی قرارگیری نمونه نیم دایره‌ای ترک‌خورده در دستگاه نشان داده شده است. در نمودار جابجایی در برابر نیرو، با افزایش میزان جابجایی، نیروی موردنیاز افزایش یافته و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. بار حداکثر به‌عنوان بار بحرانی شکست قرائت و یادداشت می‌شود.

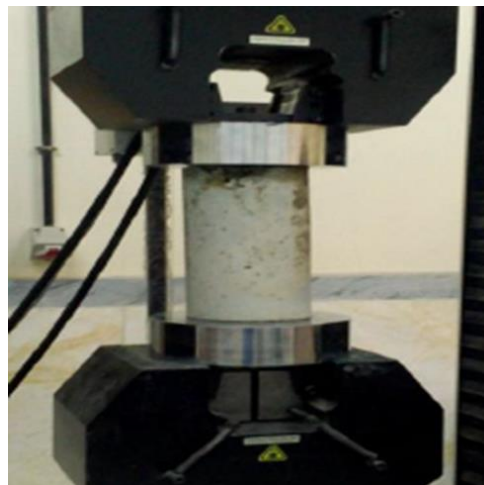
قطعه نیم‌دایره شکل نشان داده شده در شکل ۶ تحت بار خمش نیم‌دایره نمونه مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت شکست بتن است چراکه قابلیت ایجاد ترک لبه‌ای و سهولت بارگذاری در آن امکان‌پذیر است. این نمونه علاوه بر سادگی هندسه آن توانایی ایجاد حالت‌های مود ترکیبی را دارد. برای ایجاد نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای با استفاده از میز لرزه، مخلوط متراکم شده و سپس با برش نمونه‌های استوانه‌ای، نمونه ترک‌دار با مقطع نیم دایره‌ای تهیه می‌شود. می‌توان با کنترل تغییرات زاویه تمایل ترک (α)، شرایط بارگذاری متفاوتی را از مود کشش خالص تا مود برش خالص به دست آورد. مود کشش خالص را می‌توان با زاویه ترک صفر درجه ایجاد کرد. همچنین در یک زاویه خاص، ضریب شدت تنش در مود I برابر صفر شده و نمونه در مود II قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن ضرایب شکل نمونه‌های خمشی نیم دایره‌ای از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$Y_i \left(\alpha, \frac{a}{R}, \frac{S}{R} \right) = \frac{K_i}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (1)$$

که a بیانگر طول ترک، R شعاع دیسک، t ضخامت دیسک، α زاویه ترک نسبت به مرکز نیم‌دایره، i نشان‌دهنده نوع مود P ، ($i=I, II$) بار متمرکز استاتیکی وارد بر قطعه از بالا، Y_i

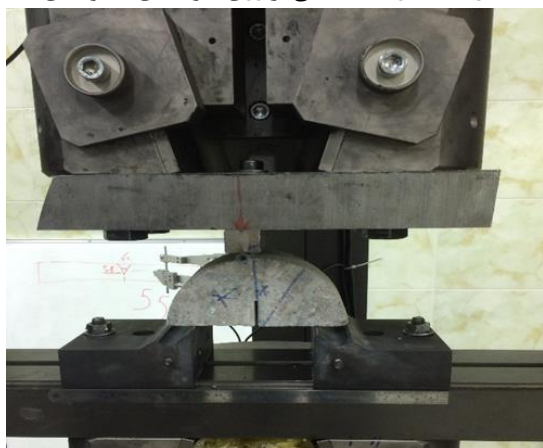
جدول ۵- جزئیات طرح اختلاط بتن غلتکی مصرفی

مصالح	سیمان	ماسه	شن	آب	سیمان/ آب
مقدار	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3
	۳۵۰	۱۲۹۸	۷۹۷	۱۳۰	۰/۴۲

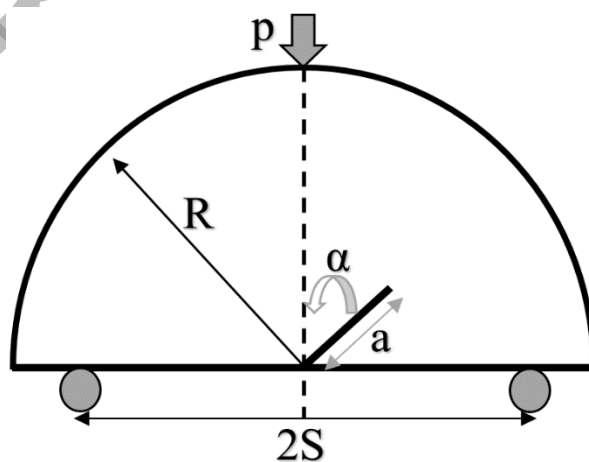


شکل ۴- مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

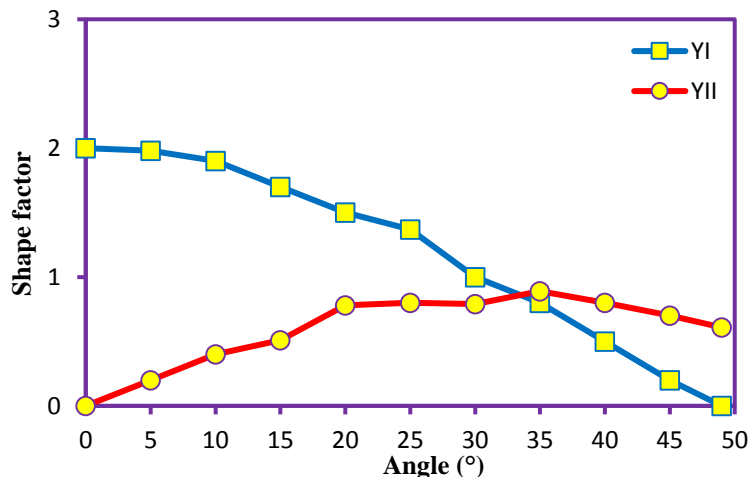
شکل ۳- دستگاه آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۵- نمونه نیم دایره‌ای ترک خورده و دستگاه بارگذاری



شکل ۶- نمونه انتخاب شده برای آزمایش تعیین مقاومت شکست مخلوط‌های بتن غلتکی



شکل ۷- نتایج تحلیل عددی برای ایجاد انواع مودهای مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای

در شکل ۸ نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری بتن غلتکی در درصد‌های مختلف الیاف فولادی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، با اضافه شدن الیاف در درصد‌های مختلف، مقاومت فشاری بتن غلتکی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت فشاری در هر دو حالت ۷ و ۲۸ روزه می‌گردد. علت این رفتار را می‌توان در توانایی الیاف در محدود کردن و جلوگیری از گسترش ترک‌ها عنوان کرد. این محدود کردن ترک منجر به کاهش تمرکز تنش در ناحیه ترک‌خوردگی گردیده و در نهایت سبب کاهش سرعت رشد ترک در بتن غلتکی الیاف‌دار می‌گردد. سوکوتاسوکول و همکاران بهبود مقاومت فشاری را برای نمونه‌های بتن غلتکی خود در حضور الیاف فولادی مشاهده کردند [۸]، لیکن در پژوهش ایشان، مقدار بهبود مقاومت کمتر از این تحقیق است. شاید دلیل این امر طول کوتاه (۳۶ میلی‌متر) الیاف فولادی بوده است.

مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه بدون الیاف با افزودن الیاف فولادی در درصد‌های مختلف، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی به مقدار ۱۰، ۲۴ و ۳۷ درصد شده است. این روند در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲، ۱۵ و ۳۶ درصد است. این امر نشان‌دهنده این است که الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی در هر دو حالت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه شده است. این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه از ۱۰ الی ۳۷ درصد و در مقاومت ۲۸ روزه بین ۱۲ الی ۳۶ درصد است. حال می‌توان گفت تأثیر الیاف فولادی بر عمل‌آوری بتن غلتکی ۷ روزه کمی بیشتر از عمل‌آوری بتن غلتکی ۲۸ روزه است.

ضریب شکل و K_I ضریب شدت تنش می‌باشد. Y_I به هندسه و بارگذاری نمونه بستگی دارد و با استفاده از آنالیز المان محدود به دست می‌آید. مقدار Y_I برای نمونه با $a/R=0.3$ و $S/R=0.43$ با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود به دست آمده و در شکل ۷ قابل مشاهده است.

برای مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس از نمونه شکل ۶ با $(a=15 \text{ mm}, R=50 \text{ mm}, t=30 \text{ mm}, P=1000 \text{ N})$ استفاده گردید. برای المان‌بندی کل مدل نیز حدود ۲۸۰۰ المان مستطیلی ۸ گرهی استفاده شد. به‌منظور اخذ نتایج بهتر برای مش‌بندی نوک، از مش‌بندی بسیار ریز استفاده گردید.

زاویه ترک برای ایجاد مود کشش خالص برابر صفر درجه، برای ایجاد مود برش خالص 49° و برای ایجاد مودهای ترکیبی کششی و برشی زاویه ترک برابر با $15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ و 45° در نظر گرفته شد. پارامتر M^e که نسبت مشارکت مودهای I و II را در حالت‌های مختلف بارگذاری مود ترکیبی نشان می‌دهد به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

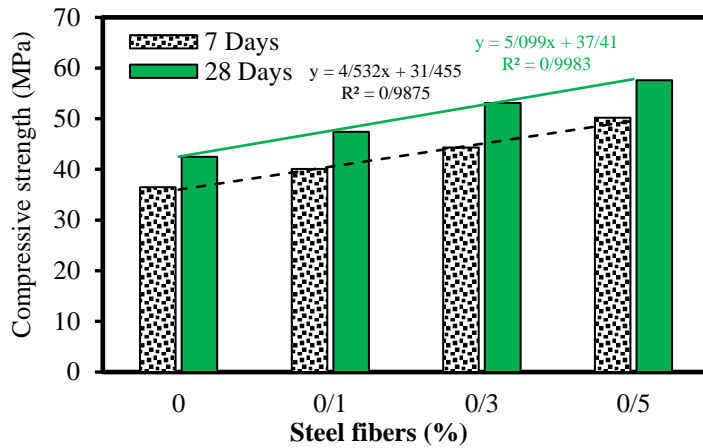
$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (2)$$

مقدار این پارامتر در حالت مود I برابر با یک و برای مد II برابر صفر می‌باشد.

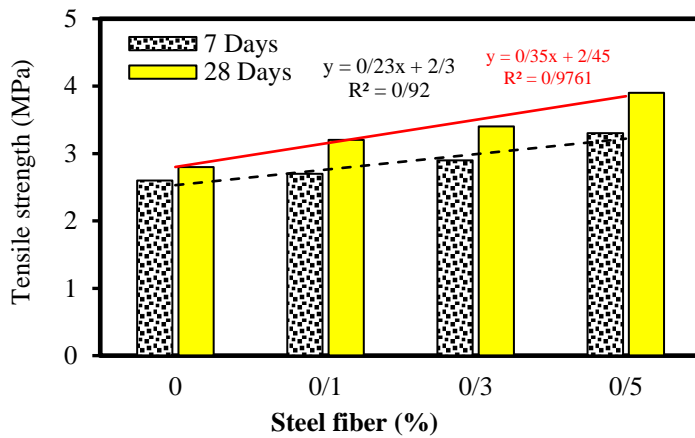
۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی ۷ و ۲۸ روزه حاوی الیاف و بدون الیاف پرداخته خواهد شد. سپس مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

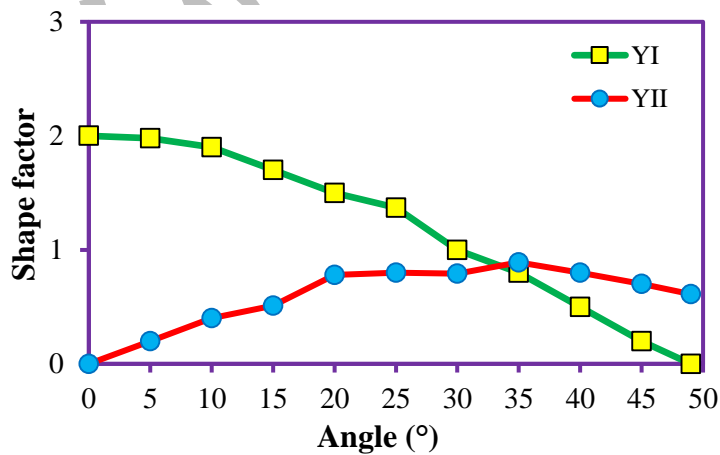
۳-۱- مقاومت فشاری بتن غلتکی



شکل ۸- مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی



شکل ۹- مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی



شکل ۱۰- نمودار ضرایب شکل

معرفی می‌کند [۱]. این ضابطه بیان می‌دارد که مقاومت فشاری مشخصه ۲۸ روزه بتن غلتکی نباید کمتر از ۲۵ مگاپاسکال باشد. بررسی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در

ضابطه شماره‌ی ۷۳۱ سازمان برنامه‌و بودجه کشور در خصوص طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها، مقدار مقاومت فشاری بتن غلتکی را معمولاً بین ۲۸ تا ۴۰ مگاپاسکال

شکل ۸ نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی همگی دارای مقاومت بیشتر از ۲۵ مگاپاسکال هستند. در شکل ۸ ارتباط ریاضی بین درصد الیاف با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک رابطه معناداری بین مقدار درصد الیاف با این مقاومت وجود دارد. شیب نمودار برای مقاومت ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت ۷ روزه است.

۷۳۱ سازمان برنامه‌بودجه کشور، مقدار بحرانی مشخصی را برای مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی معرفی نکرده است [۱]. شکل ۹ یک رابطه خطی بین درصد الیاف با مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. در این شکل، مشابه مقاومت فشاری، شیب نمودار برای مقاومت کششی ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت ۷ روزه است.

۳-۳- بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی

در شکل ۱۰ نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس برای ضرایب شکل نمونه خمشی نیم دایره‌ای نشان داده شده است. از این نتایج برای به دست آوردن مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی استفاده شد. در جدول ۶ مقادیر بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار برای نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای در مودهای مختلف بارگذاری شامل مود کشش خالص، مود ترکیبی و مود برش خالص نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف فولادی در تمام مودهای بارگذاری، بار شکست تمام نمونه‌های بتن غلتکی افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به توانایی الیاف فولادی در جلوگیری از گسترش ریز ترک‌ها و در نتیجه توزیع یکنواخت تنش‌ها نسبت داد. این افزایش بار سبب می‌شود که نمونه‌های بتن غلتکی ترک‌دار حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در تمام مودهای بارگذاری مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک داشته باشد. در ضابطه شماره ۷۳۱ سازمان برنامه‌بودجه کشور، مقدار بار بحرانی برای شکست نمونه‌های بتن غلتکی بیان نشده است [۱].

۳-۲- مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که به‌طور کلی با اضافه نمودن الیاف فولادی در محدوده مورد آزمایش، مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی به‌طور کلی افزایش یافته است. این افزایش مقاومت در مقاومت کششی بتن غلتکی ۷ روزه از ۴ الی ۲۶ درصد و در مقاومت کششی ۲۸ روزه بین ۱۴ الی ۳۹ درصد است؛ بنابراین می‌توان گفت تأثیر الیاف فولادی در ۵/۰ درصد بیشترین مقدار نسبت به سایر نسبت‌ها در مقاومت کششی بتن غلتکی است. شاید دلیل بهبود مقاومت کششی این باشد که الیاف فولادی توانسته‌اند بارگذاری وارده را در ساختار بتن غلتکی به‌صورت همگن‌تر و مؤثرتر توزیع نمایند. از طرفی با ایجاد یک ساختار پل مانده، موجب حفظ اتصال ترک‌ها به هنگام وقوع تنش‌های کششی بحرانی شده‌اند. در پژوهش‌های دیگر نیز بهبود مقاومت کششی بتن غلتکی در حضور الیاف فولادی مشاهده شده است. سیف الهی و محمدی در تحقیق خود بهبود مقاومت کششی بتن غلتکی را برای درصدهای ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد الیاف فولادی گزارش کردند [۹]. لازم به ذکر است، ضابطه شماره‌ی

جدول ۶- بار شکست نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

میانگین بار شکست (KN) (۰/۵ درصد الیاف)	میانگین بار شکست (KN) (۰/۳ درصد الیاف)	میانگین بار شکست (KN) (۰/۱ درصد الیاف)	میانگین بار شکست (KN) (۰ درصد الیاف)	M ^e	زاویه ترک (°)
۶/۰۹	۵/۹۲	۵/۸۶	۴/۵۵	۱	۰
۷/۲۳	۶/۸۹	۶/۱۰	۴/۶۹	۰/۸۱	۱۵
۷/۶۲	۷/۷۲	۶/۶۱	۵/۱۹	۰/۵۷	۳۰
۸/۷۳	۸/۲۳	۷/۰۳	۵/۷۱	۰/۳۵	۴۰
۹/۱۲	۸/۶۶	۷/۱۹	۶/۱۴	۰/۱۸	۴۵
۹/۴۱	۹/۲۰	۷/۴۲	۶/۵۹	۰	۴۹

جدول ۷- مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف در مودهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۲۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۵۹۸	۰/۵۵۶	۰/۳۵۹	۰/۲۰۱	۰/۰۸۹	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۱۶۹	۰/۲۸۳	۰/۲۹۳	۰/۲۹۶	۰/۲۸۳
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۵۹۸	۰/۵۸۱	۰/۴۵۷	۰/۳۵۵	۰/۳۰۹	۰/۲۸۳

جدول ۸- مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۱ درصد الیاف در مودهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۲۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۸۱	۰/۷۶۹	۰/۵۱۲	۰/۲۹۶	۰/۱۲۸	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۲۵۹	۰/۴۰۱	۰/۴۸۲	۰/۴۰۳	۰/۴۵۸
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۸۱	۰/۸۱۱	۰/۶۵۰	۰/۵۶۵	۰/۴۲۲	۰/۴۵۸

جدول ۹- مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۳ درصد در مودهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۲۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۶۹	۰/۸۹۷	۰/۶۰۱	۰/۳۲۰	۰/۱۴۲	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۳۶۲	۰/۴۹۳	۰/۵۰۹	۰/۴۹۳	۰/۴۹۸
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۶۹	۰/۹۶۷	۰/۷۷۷	۰/۶۰۱	۰/۵۱۳	۰/۴۹۸

جدول ۱۰- مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی ۰/۵ درصد در مودهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۲۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۹۳۲	۰/۹۳۶	۰/۶۱۳	۰/۳۲۹	۰/۱۵۹	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۳۲۱	۰/۴۸۹	۰/۵۲۲	۰/۴۹۹	۰/۵۱۲
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۹۳۲	۰/۹۸۹	۰/۷۸۴	۰/۶۱۷	۰/۵۲۳	۰/۵۱۲

۳-۴ مقاومت شکست در مودهای مختلف بارگذاری

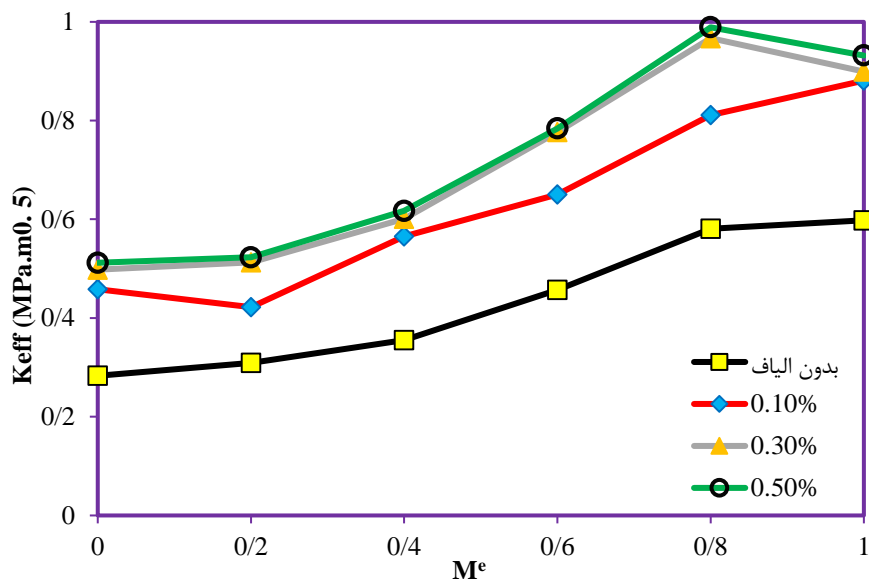
مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری در درصد‌های مختلف الیاف فولادی در جدول‌های ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۱ اثر مودهای مختلف را بر مقاومت شکست بتن غلتکی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با انتقال از مود کشش خالص به برش خالص مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف و بدون

الیاف کاهش می‌یابد؛ یعنی بیشترین مقدار مقاومت شکست در مود کشش خالص و کمترین مقدار در برش خالص اتفاق می‌افتد. همچنین اضافه شدن الیاف فولادی، سبب افزایش مقاومت شکست بتن غلتکی ترک‌دار در مودهای مختلف بارگذاری می‌شود. همچنین با توجه به شکل، با اضافه شدن برش، مقاومت شکست بتن غلتکی کاهش یافته تا اینکه در $M^e=0$ (برش خالص) مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی

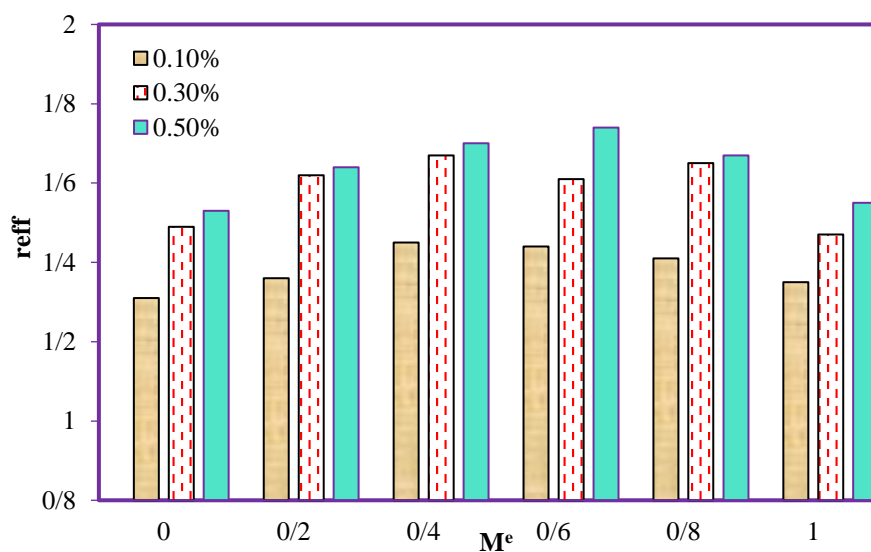
گلتکی بدون الیاف است. نسبت مقاومت شکست بتن گلتکی حاوی فولادی به بتن گلتکی بدون الیاف همیشه بزرگتر از ۱ است. این امر نشان‌دهنده این است که مقاومت شکست بتن گلتکی الیاف‌دار در برابر رشد ترک به مراتب بیشتر از مقاومت شکست مخلوط بدون الیاف است. افزودن الیاف فولادی بیشتر از مقدار ۰/۳ درصد تأثیر فراوانی در بهبود مقاومت شکست بتن گلتکی ندارد. از این رو، مقدار بهینه الیاف به دست آمده برای بهترین حالت مقاومت شکست بتن گلتکی در مودهای مختلف بارگذاری ۰/۳ درصد کل وزن بتن گلتکی است.

الیاف و بدون الیاف فولادی به کمترین مقدار خود نسبت به سایر مودهای بارگذاری می‌رسد. نتیجه مهمی که می‌توان از این مطلب گرفت این است که مود بحرانی برای شروع ترک در بتن گلتکی استفاده شده در این تحقیق، در $M^e=0$ (برش خالص) است. همچنین الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت شکست بتن گلتکی در برابر رشد ترک در مودهای مختلف بارگذاری می‌شود.

تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت شکست بتن گلتکی ترک‌دار در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این شکل در واقع نسبت مقاومت شکست بتن گلتکی حاوی الیاف فولادی به بتن



شکل ۱۱- تحلیل مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست بتن گلتکی



شکل ۱۲- تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت شکست بتن گلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

۴- نتیجه‌گیری

ایجاد نمی‌شود. مناسب‌ترین مقدار الیاف از نظر افزایش مقاومت کششی و فشاری مقدار ۰/۵ درصد بتن غلتکی است.

در این پژوهش مقاومت فشاری و کششی و نیز مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی بدون توجه به وقوع بحث خوردگی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد. بدیهی است که در نظر گرفتن بحث خوردگی می‌تواند نتایج تحقیق را تحت تأثیر قرار دهد:

۵- پیشنهادها

- امروزه از روش سطح پاسخ [۱۲ و ۱۳] و یادگیری ماشین [۱۴ و ۱۵] در تحلیل نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از این روش‌ها در تحلیل داده‌های مکانیک شکست نمونه‌های بتن غلتکی استفاده گردد.

- مقدار مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن غلتکی در حالت‌های ۷ و ۲۸ روزه در حضور الیاف فولادی بهبود می‌یابند. این مقاومت با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد.

- در این پژوهش استفاده از الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت شکست بتن غلتکی را بهبود داد. لیکن باید توجه داشت که پدیده‌ی خوردگی عملکرد این الیاف را در درازمدت می‌تواند تضعیف کند. برای کاهش خوردگی می‌توان از الیاف فولادی ضدزنگ، استفاده از پوشش‌های مناسب بر روی الیاف، کنترل میزان نفوذپذیری آب در بتن غلتکی استفاده نمود. همچنین استفاده از روش‌های مناسب زهکشی می‌تواند نفوذپذیری آب در بتن غلتکی را کاهش داده و میزان خوردگی در الیاف را کاهش دهد.

- بار شکست تمام نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش درصد الیاف فولادی در تمام مودهای بارگذاری افزایش می‌یابد.
- بیشترین مقدار مقاومت شکست مربوط به مود کشش خالص بوده و کمترین مقدار مقاومت شکست در برش خالص رخ می‌دهد.

- مناسب‌ترین مقدار الیاف فولادی از نظر مقاومت شکست، مقدار ۰/۳ درصد بتن غلتکی است، چراکه در بیشتر از این مقدار، تفاوت قابل‌توجهی در مقدار مقاومت شکست

۶- مراجع

- 1- "Guidelines for the design, implementation and maintenance of concrete paving of roads," *The Plan and Budget Organization*, (2018).
- 2- J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A. N. Amirkhanian, "Mechanical Properties of Roller-compacted Concrete with Macro-fibers," *Construction and Building Materials*, vol.135, pp. 440-446, (2017).
- 3- W. Zhang, S. Gong, J. Zhang, "Effect of Rubber Particles and Steel fibers on Frost Resistance of Roller Compacted Concrete in Potassium Acetate Solution," *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 752-759, (2018).
- 4- S. Fuan, M. Ke, L. Kanghe, L. Kun, M. R. M. Aliha, "Influence of Specimen Geometry on Mode I Fracture Toughness of Asphalt Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 276, pp. 122181, (2021).
- 5- A. R. Manafpour, N. Vazifekhah, "Effects of Steel and Polypropylene Fibers on Tensile Strength of FRC with the Same Base Strength," *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 42, no. 69, pp. 47-56, (2013).
- 6- H. shaddel, M. Kheyry ghoghbigli, A. Enayati Tekleh, "Behavior Pattern of Compressive and Tensile Strength of Structural Lightweight Concrete Consisting perlite, Leca and Steel Fiber," *Analysis of Structure and Earthquake*, vol. 15, no. 2, pp. 47-57, (2018).
- 7- M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli, M. A. Aiello, "Fiber-reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber: Shear Behaviour", *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp.141-155, (2018).
- 8- P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, P. Jamsawang, S. Horpibulsuk, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, "Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand," *Case studies in construction materials*, vol.11, (2019).
- 9- F. Seifollahi and Y. Mohammadi, "The effects of nano silica and steel fibers on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement," *Concrete Research*, vol. 13, no. 2, pp. 31-43, (2020).
- 10- M. Abu-Bakr, H. F. Mahmood, A. A. Mohammed, "Investigation of metakaolin and steel fiber addition on some mechanical and durability properties of roller compacted concrete", *Case Studies in Construction Materials*, vol.16, (2022).

- 11- M. Fakhri, E. Amosoltani, "The Effect of Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber on Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Pavement." *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 470-48, (2017).
- 12- E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, M. H. 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*, vol.109, pp. 102753, (2020).
- 13- E. Sengun, B. Alam, R. Shabani, I. O. Yaman, "Strength and fracture properties of roller compacted concrete (RCC) prepared by an in-situ compaction procedure," *Construction and Building Materials*, vol.271, pp.121563, (2021).
- 14- M. R. M. Aliha, A. Razmi, A. Mansourian, "The Influence of Natural and Synthetic Fibers on Low Temperature Mixed Mode I+ II Fracture Behavior of Warm Mix Asphalt (WMA) Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 182, pp. 322-336, (2017).
- 15- B. Golchin, R. Safayi, "Effect of Carbon Fibers on Fracture Toughness of Asphalt Mixtures Using Linear Elastic Fracture Mechanics," *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, vol. 4, pp. 77-92, (2018). (In Persian)
- 16- M. M. Mirsayar, A. Razmi, M. R. M. Aliha, F. Berto, "EMTSN Criterion for Evaluating Mixed Mode I/II Crack Propagation in Rock Materials", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 190, pp. 186-19, (2018).
- 17- M. Delnavaz, K. Eshaghi, "Treatment of Petroleum Wastewater Using new Fe-ZSM-5@TiO₂/Ag Nano Photocatalys," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 71-86, (2021). (In Persian)
- 18- B. Golchin, M. Aliyan, R. Meshkabadi, "Evaluating the Effect of Para-fiber on the Technical Properties of in Plant Hot Recycled Asphalt Mixture and Determining a Suitable Combination," *Journal of Transportation Research*, vol. 20, no. 3, pp. 85-102, (2023). (In Persian)
- 19- A. R. Kordjazi, F. Pooya Nejad, F. Shahabian, "Modeling the Patch Load Resistance of Plate Girders Using a Support Vector Machine," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 109-124, (2016). (In Persian)
- 20- A. Kordjazi, f. Pooya Nejad, "Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Axially Loaded Piles Using a Support Vector Machine," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, (2012). (In Persian)