

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

بابک گلچین، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

بهنام رمزی، کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

رامین مشک آبادی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی نوین، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

r_meshkabadi@uma.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

چکیده

در این پژوهش، استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی تحت حالت‌های مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور و ایجاد حالت‌های بارگذاری کشش خالص، برش خالص و ترکیب آن دو از نمونه نیم دایره‌ای با ترک لبه‌ای استفاده شد. برای تعیین استحکام شکست نمونه‌ها از آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. از ضریب شدت تنش بحرانی به دست آمده از آزمایش شکست، و ضرایب شکل به دست آمده از تجزیه و تحلیل المان محدود به عنوان معیارهای ارزیابی استفاده گردید. نتایج نشان داد که افزایش بار شکست ناشی از افزایش درصد الیاف طبیعی در نمونه‌ها منجر به این می‌شود که نمونه‌های بتن غلتکی ترک‌دار با داشتن الیاف طبیعی نسبت به نمونه‌هایی که فاقد الیاف طبیعی هستند در تمام حالت‌های بارگذاری مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک نشان دهند. این تحقیق مقدار درصد الیاف طبیعی بهینه در مدهای مختلف بارگذاری با توجه به مقاومت شکست نمونه‌ها را تعیین کرد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی، الیاف طبیعی، مقاومت شکست، المان محدود

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

بتن غلتکی نوعی بتن است که توسط دستگاه‌های متداول ساخت روسازی (فینیشر) پخش شده و به وسیله غلتک ارتعاشی متراکم می‌شود. این بتن با اینکه چندین مزیت مهم مانند عدم استفاده از میلگرد دارد، لیکن مستعد ترک خوردن است. فرایند گیرش در بتن غلتکی و انقباض ناشی از آن منجر به تنش‌های کششی می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد ترک گردد. از طرفی، تغییرات سریع دما می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و در نتیجه ایجاد ترک شود. نسبت آب به سیمان نادرست یک نقطه ضعف دیگر در این بتن‌ها می‌باشد. عمل‌آوری ناکافی می‌تواند منجر به از دست دادن رطوبت و افزایش خطر ترک‌های انقباضی شود. آماده‌سازی ضعیف بستر و در نتیجه ایجاد تغییر شکل موضعی در بستر باعث ایجاد ترک در محل بارگذاری‌ها می‌شود. بارهای بیش از حد یا ترافیک سنگین می‌تواند از ظرفیت باربری بتن غلتکی فراتر رفته و باعث گسترش ترک‌ها شوند. برای کاهش ترک خوردگی می‌توان از افزودنی‌های کاهنده انقباض و نسبت آب به سیمان مناسب استفاده کرد.

بتن‌های غلتکی که در روسازی راه‌ها استفاده می‌شود، دارای طرح اختلاط مشخص، مقدار سیمان زیاد، مقاومت فشاری بالا و دانه‌بندی کنترل‌شده در یک محدوده معین هستند. بتن غلتکی می‌تواند به عنوان لایه رویه در تأمین قدرت باربری سازه روسازی مورد استفاده قرار گیرد. بتن غلتکی ترکیبی از سنگ‌دانه با قطر حداکثر ۱۹ میلی‌متر، سیمان و آب هست. این روسازی پس از سخت شدن بر اثر واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان به بتن تبدیل می‌گردد [Rambabu, Sharma, and Akbar, 2023].

روسازی بتن غلتکی از نظر عملکرد و پارامترهای اقتصادی در سال‌های گذشته مورد ارزیابی و مقایسه با سایر روسازی‌ها قرار گرفته است. بررسی اقتصادی بتن غلتکی و بتن‌های آسفالتی نشان می‌دهد که روسازی ساخته شده از بتن غلتکی در مقایسه با روسازی آسفالت معمولی و یا اساس دانه‌ای دارای هزینه‌های

بسیار کمتری است [Debbarma, and Ransinchung, 2021]. وجود ترک در بتن غلتکی می‌تواند عملکرد آن را به روش‌های مختلفی تحت تاثیر قرار دهد. ترک‌ها می‌توانند یکپارچگی ساختاری بتن غلتکی را از بین برده و منجر به خرابی‌های بالقوه تحت بارگذاری شوند. این امر به ویژه در کاربردهایی مانند روسازی بسیار مهم است. ترک‌ها مسیرهایی را برای نفوذ آب و سایر مواد شیمیایی به بتن فراهم می‌کنند که می‌تواند فرآیندهای خرابی مانند چرخه‌های انجماد و ذوب و حملات شیمیایی را تسریع بخشد. همچنین ترک‌ها می‌توانند توزیع یکنواخت بارها در سطح روسازی راه را مختل کنند. این امر منجر به تمرکز موضعی تنش شده و باعث ایجاد ترک یا تغییر شکل بیشتر می‌شود. وجود ترک‌ها اغلب نیازمند افزایش عملیات نگهداری و در نتیجه افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری برای روسازی راه‌ها است. در روسازی‌ها، ترک‌ها می‌توانند منجر به ایجاد سطوح ناهموار، افزایش استهلاک خودروها و به طور بالقوه مشکلات ایمنی شوند. در سازه‌هایی مانند سدها، ترک‌ها می‌توانند قابلیت‌های نگهداری آب و الگوهای زهکشی را تغییر دهند و بر عملکرد کلی تأثیر بگذارند. برای کاهش این اثرات، طراحی مناسب، انتخاب مواد، و شیوه‌های ساخت و ساز برای به حداقل رساندن ترک در بتن غلتکی ضروری است [Aghaeipour and Madhkhan, 2020].

در یک مطالعه، استفاده از بتن‌های غلتکی و بتن‌های آسفالتی به عنوان رویه روسازی در مسیرهای با ترافیک سنگین مورد مقایسه قرار گرفتند. مطالعه نشان داد که خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی کاهش یافته و یا حتی حذف می‌گردند. یکی از این خرابی‌ها، تغییر شکل دائمی یا شیارشدگی در لایه-های آسفالتی است که در شرایط آب و هوایی گرم به طور قابل ملاحظه‌ای گسترش می‌یابند. به همین دلیل، استفاده از بتن غلتکی برای مسیرهای با ترافیک سنگین و در شرایط آب و هوایی گرم مناسب ارزیابی می‌شود. همچنین در این مطالعه ملاحظه شد که روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی انعطاف‌پذیر به

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

روسازی بتن غلتکی بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که نمونه‌های دارای الیاف، استحکام کششی بهتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف دارند. الیاف پلی‌پروپیلن توانستند استحکام کششی و خمشی بالاتری نسبت به الیاف پلی‌الفین نشان دهند. از طرفی، افزودن الیاف به مقدار ۲ و ۳ کیلوگرم بر مترمکعب می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح‌شده را بهبود بخشد. صرف نظر از نوع الیاف، چقرمگی مخلوط‌های حاوی ۳ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف از بتن ساده برای تحمل بارهای خمشی بهتر عمل می‌کند [Jahanbakhsh, Saberi and Soltaninejad, 2023].

نکته مهم دیگر احتمال وقوع شکست در بتن و علی‌الخصوص در بتن غلتکی است. مکانیک شکست علم بررسی رفتار شکست قطعات ترک‌دار است و مقاومت به ضربه قطعات ترک‌دار را بررسی می‌کند. این علم در سال‌های اخیر در زمینه بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است [Sengun, Alam, Shabani and Yaman, 2021].

از تحقیقاتی که به بررسی مقاومت شکست بتن غلتکی در مدهای مختلف بارگذاری پرداخته شده است، می‌توان به تحقیق فخری و همکاران در تجزیه و تحلیل رفتار ترک در مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافت شده و خرده لاستیک با استفاده از نمونه‌های خمشی چهار نقطه‌ای و نمونه‌های نیم دایره-ای ترک‌دار اشاره کرد. آن‌ها افزایش در مقاومت شکست مخلوط بتن غلتکی مورد استفاده را نسبت به آسفالت بازیافت شده و نیز تأثیر نوع نمونه‌ها در رفتار شکست بتن مورد استفاده را گزارش کردند [Fakhri and Ershad, 2017]. استفاده از افزودنی الیاف برای بهبود ویژگی‌های رفتاری مواد مختلف، ایده‌ای قدیمی است. اخیراً نشان داده شده است که استفاده از الیاف طبیعی با تقویت ساختار بتن در مقابل ترک، زمان گیرش مخلوط و زمان حمل بتن را افزایش می‌دهد. از دیگر ویژگی‌های الیاف طبیعی می‌توان به مدول الاستیسیته پایین (نزدیک به ملات

ضخامت کمتر نیاز دارند [Koohmishi, 2013]. حسنی و همکاران در یک پژوهش نشان دادند که با کاهش یافتن مقدار نسبت آب به سیمان از مقدار بهینه مقاومت بتن غلتکی برخلاف بتن معمولی افزایش نمی‌یابد. همچنین ذرات سنگ‌دانه بسیار ریز نقش اصلی را در کنترل مشخصات مقاومتی ایفا می‌کنند و مقدار سیمان مخلوط در این ارتباط موثر نیست، زیرا مشخصات مقاومتی بتن غلتکی به طور عمده از طریق تراکم کافی حاصل می‌گردد [Hassani, Shekarchizade and Akbarnejad, 2008].

در یک تحقیق دیگر، مصالح خمیری (مانند پوزولان طبیعی، میکروسیلیس و خاکستر بادی) جایگزین درصدی از سیمان در ساخت بتن غلتکی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از این مواد در بتن، یک راه حل عملی و مناسب در مقایسه با روش هوازایی در بتن است تا مقاومت بتن غلتکی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان افزایش یابد [Naidu, Kumar, Adisesh, and Satayanarayana, 2012].

در تحقیقی دیگر، بتن غلتکی به عنوان لایه اساس در یک بزرگراه اجرا گردید. سپس یک روکش نازک آسفالتی به ضخامت ۵ سانتی‌متر روی آن اجرا شد. پس از گذشت یک سال از ساخت روسازی، از نظر سازه‌ای و عملکردی موردی غیر از اثر غلتک‌های چرخ فولادی روی سطح مشاهده نشد. همچنین ملاحظه شد که استفاده از بتن غلتکی یک روش اقتصادی و بادوام برای انجام روسازی راه است [Brotman, Michael, and John, 2007].

با گسترش استفاده از بتن در راهسازی می‌توان تعدادی از مشکلات روسازی راهها را کاهش داد، لیکن استفاده از بتن نقاط ضعف خود را دارد. مقاومت کششی پایین و ترک‌های ناشی از تنش‌های کششی، نمونه‌ای از این موارد است. یک ایده در این زمینه استفاده از الیاف برای جلوگیری از گسترش ریز ترک‌هاست. جهانبخش و همکاران اثرات دو الیاف مصنوعی به نام الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌الفین را بر روی ویژگی‌های آزمایشگاهی

محدود و آزمایش شکست انتخاب شدند. ضریب شدت تنش و ضرایب شکل نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تعیین شده و اثر ایجاد مدهای مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار برای انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال تحلیل گردید. همچنین تأثیر درصد‌های مختلف الیاف طبیعی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ (درصد وزن بتن غلتکی) بر مقاومت شکست و جلوگیری از رشد ترک در نمونه‌های بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ انتخاب نمونه آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های شکست مواد ترد و نیمه ترد تحت بارگذاری‌های مختلف، ابتدا هندسه نمونه انتخاب شده توصیف گردیده و سپس تحلیل‌های اجزای محدود به منظور محاسبه ضرایب شکل انجام می‌شود. در این تحقیق از نمونه‌های ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای خمشی مطابق شکل ۱ استفاده شده است که در آن a طول ترک، R شعاع دیسک، t ضخامت دیسک و α زاویه ترک نسبت به مرکز نیم‌دایره است.

۲-۲ تحلیل اجزای محدود برای استخراج ضرایب

شکل

در این تحقیق شعاع دیسک برابر ۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ میلی‌متر و طول ترک ۱۵ میلی‌متر انتخاب گردید و آزمایش‌ها برای حالت‌های بارگذاری مد I خالص (کشش خالص)، مد II خالص (برش خالص) و دو حالت مد ترکیبی I/II (کشش - برش) انجام گرفت. همچنین با در نظر گرفتن مدل دو بعدی برای انجام آنالیز المان محدود در نرم‌افزار آباکوس مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای نمونه‌های بتنی به ترتیب ۳۰/۱۲ گیگا پاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. از مدل دو بعدی به خاطر ساده‌سازی و کاهش زمان حل مسئله استفاده شد. برای المان بندی مدل المان مستطیلی ۸ گرهی استفاده شده است که این المان‌ها به تعداد ۲۸۰۰ عدد در نوک ترک به صورت منفرد

سیمان) و مقاومت کششی نسبتاً بالای آن‌ها اشاره کرد که مهم‌ترین کارکرد آن‌ها کنترل بهارخواب‌های انقباضی در بتن و کنترل سرعت رشد ترک است [Zhou, Ghaffar, Dong, Oladiran and Fan, 2013]. یوسفی رشید و گلچین از الیاف مصنوعی پلی اولفین آرمید در بررسی رفتار شکست بتن غلتکی استفاده کردند. ایشان نشان دادند که حضور الیاف مصنوعی، مقاومت شکست بتن غلتکی را در تمام مدهای بارگذاری بهبود می‌دهد [Yousefi and Golchin 2020]. چالشی و همکاران، تأثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت شکست، مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن غلتکی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن الیاف فولادی به مقدارهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲، ۱۵ و ۳۶ درصد و مقاومت کششی به ترتیب ۱۴، ۲۱ و ۳۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که با افزایش درصد الیاف فولادی، بار شکست و در نتیجه مقاومت در برابر رشد ترک بیشتر می‌شود [Chaleshi, Golchin and Meshkabadi, 2024]. رمزی و میرسیار در تحقیقی تأثیر مدهای مختلف بارگذاری (کشش خالص و برش خالص) را با استفاده از نمونه نیم‌دایره‌ای با ترک لبه‌ای تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای و استفاده از اصول مکانیک شکست در حضور الیاف طبیعی جوت بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بتن معمولی، ضریب شدت تنش بحرانی در مدهای کشش و برش خالص در حضور الیاف جوت افزایش می‌یابد [Razmi, and Mirsayar, 2017].

با توجه به مطالعات پیشین که از الیاف مختلف در بهبود رفتار مقاومت شکست بتن غلتکی استفاده کرده بودند و اینکه میرسیار و رمزی شاهد ارتقا این مقاومت برای بتن معمولی با الیاف طبیعی بودند، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی مقاومت شکست برای بتن‌های غلتکی مسلح به الیاف طبیعی تعریف شد. برای این منظور مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی (جوت) و بدون الیاف (شاهد) به دست آمده و نمونه مناسب آزمایشگاهی به منظور انجام آنالیزهای المان

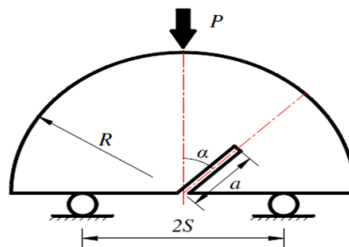
تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

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

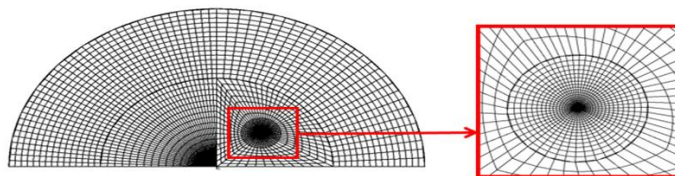
که i نشان‌دهنده نوع مود ($i=I, II$) بار اعمال شده در مدل‌سازی و Y_i ضریب شدت تنش است. برای ایجاد مدهای خالص کشش و برش و مدهای ترکیبی زاویه ترک (α) برابر با ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰، ۴۵ و ۴۹ درجه انتخاب گردید. در شکل ۲ نمونه‌ای از مش بندی به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس در مود برش خالص (زاویه ۴۹ درجه) نشان داده شده است.

می‌باشند. هدف از مدل‌سازی قطعه نیم دیسک، محاسبه ضرایب شدت تنش حالت بارگذاری I، II و ترکیبی است. بارگذاری به صورت یک بار متمرکز $P = 1000N$ است که به صورت استاتیکی از بالا وارد می‌شود. با استفاده از تحلیل در نرم‌افزار آباکوس، مقادیر ضرایب شدت تنش با استفاده از تکنیک J انتگرال محاسبه و استخراج گردید.

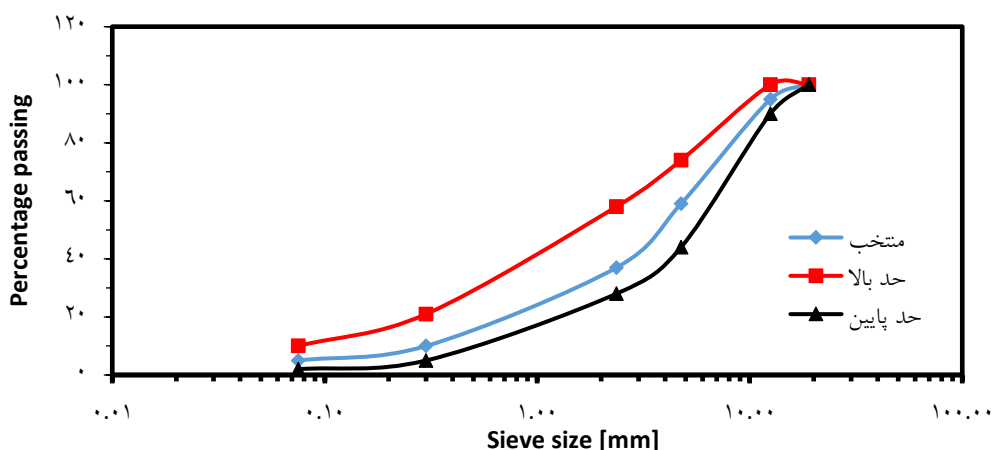
برای تعیین ضرایب شکل نمونه‌های خمشی نیم دایره‌ای ترک‌دار از رابطه (۱) استفاده شده است [Ayatollahi and Aliha, 2007]:



شکل ۱. نمونه آزمایش و پارامترهای آن



شکل ۲. نمونه‌ای از مش بندی به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس در مود برش خالص



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده برای نمونه‌های بتن غلتکی

تعریف می‌شود [Smith, Ayatollahi and Pavier, 2001]:

پارامتر M^e که نشان‌دهنده نسبت مشارکت مدهای I و II در حالت‌های مختلف بارگذاری مود ترکیبی است توسط رابطه (۲)

استفاده شد. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده برای نمونه‌های بتن غلتکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

سیمان مورد استفاده سیمان تپ II کارخانه سیمان صوفیان تبریز مطابق با استاندارد ASTM C150-86 است که نتایج آنالیز شیمیایی آن در جدول (۱) ارائه شده است. آب مورد نیاز از شبکه آب‌رسانی شهر تبریز تهیه شده است.

جوت (شکل ۴)، نوعی گیاه طویل، نرم و براق است که می‌تواند به‌صورت نخ‌ی مستحکم درآید و مورد استفاده قرار گیرد. این گیاه قابلیت ترکیب شدن با دیگر الیاف، طبیعی یا مصنوعی را دارد. مشخصات این افزودنی در جدول (۲) بیان شده است. جوت پس از پنبه، دومین الیاف طبیعی است که در حجم انبوه در جهان تولید می‌شود. تولید کنندگان بزرگ آن هند و بنگلادش می‌باشند [Islam and Ahmed, 2018].

تحقیقات گذشته نیاز به استفاده از الیاف را در بتن نشان داده‌اند. الیاف فلزی و مصنوعی گران قیمت هستند. جوت به‌عنوان یک الیاف ارزان قیمت توجه زیادی را برای استفاده در بتن بدست آورده است [Ahmad, Arbili, Majdi, Althoey, Farouk Deifalla, and Rahmawati, 2022]. در این تحقیق، الیاف جوت به طول ۲۰ میلی‌متر در مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی به مصالح سنگی اضافه شده است.

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

بعد از به دست آوردن ضرایب شکل از رابطه (۱)، مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است [Smith, Ayatollahi and Pavier, 2001].

$$K_{If} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (3)$$

$$K_{IIf} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II} \quad (4)$$

که P_{cr} بار بحرانی شکست بوده و از نتایج آزمون‌ها مشخص می‌شود. وقتی ناحیه نوک ترک تحت بارگذاری کششی خالص است، آنگاه $M^e=1$ (زاویه صفر درجه) و وقتی تحت بارگذاری برش خالص است، آنگاه $M^e=0$ (زاویه ۴۹ درجه) و برای بارگذاری ترکیبی (کشش-برش) مقدار M^e برابر ۰/۸۱، ۰/۵۷، ۰/۳۵ و ۰/۱۸ به ترتیب برای زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه است.

۳-۲ مواد و مصالح مصرفی

مصالح اساسی مورد استفاده در بتن غلتکی شامل سنگ‌دانه (درشت‌دانه و ریزدانه)، مواد سیمانی و آب است. سنگ‌دانه‌ها حدود ۸۰ درصد از حجم مخلوط بتن غلتکی روسازی را تشکیل می‌دهند و تأثیر زیادی بر خواص بتن سخت شده و بتن تازه دارند. در این تحقیق از شن نخودی به عنوان درشت‌دانه با اندازه اسمی حداکثر ۱۹ میلی‌متر و از ماسه شکسته به عنوان ریزدانه

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند نوع II کارخانه سیمان صوفیان

عنصر	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ A _F	CaO	سایر
مقدار (درصد)	۴۸/۴۸	۲۶/۶۵	۷/۴۹	۱۰/۵۵	۱/۲۳	۵/۹

جدول ۲. مشخصات افزودنی الیاف طبیعی (جوت)

مشخصه	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (Kg/m ³)	مقدار جذب آب (درصد)
مقدار	۲۰۰-۴۵۰	۲۰-۵۵	۱۳۰۰-۱۵۰۰	۱۲

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

جدول ۳. جزئیات طرح اختلاطی بتن مصرفی

مصالح	سیمان	ماسه	شن	آب	سیمان/آب
مقدار (Kg/m ³)	۴۰۰	۹۴۷/۸	۸۸۶/۵	۱۲۸	۰/۳۲



شکل ۴. الیاف جوت

شده در قالب و لرزاندن آن، نمونه‌ها به منظور جلوگیری از تبخیر آب با کیسه‌های پلاستیکی پوشانده می‌شوند و ۲۴ ساعت بعد، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به داخل حوضچه آب منتقل می‌شوند. نمونه‌ها یک ساعت قبل از آزمایش از حوضچه آب بیرون آورده شده و سپس تحت آزمایش قرار می‌گیرند. مراحل ساخت نمونه‌های بتن غلتکی استوانه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از مشخص شدن طرح اختلاط، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شدند. سپس از این نمونه‌ها، دیسک‌هایی با ضخامت سه سانتی متر برش داده شد. لازم به ذکر است، عملیات برش بایستی با دقت کامل صورت گیرد. از هر نمونه بتن غلتکی ۴ قطعه دیسک تهیه شد. برای تولید نمونه‌های خمشی نیم دایره‌ای، دیسک‌ها با دستگاه برش به دو نیم‌دایره تقسیم شدند. سپس بر روی قطعات نیم‌دایره، ترک‌هایی به طول ۲۰ میلی‌متر با زاویه‌های مختلف ایجاد شد تا آماده آزمایش مقاومت شکست گردند. زاویه صفر درجه بیانگر بارگذاری کشش خالص، زاویه ۴۹ درجه بیانگر بارگذاری برش خالص و زوایای مابین آن‌ها بیانگر ترکیب برش و کشش است.

افزودن الیاف طبیعی مانند جوت با اینکه می‌تواند مزایایی در زمینه بهبود مقاومت کششی و جلوگیری از ترک خوردگی بتن غلتکی داشته باشد، لیکن جذب آب بالای آن‌ها در شرایط مرطوب و در معرض مواد شیمیایی می‌تواند مشکلات جدی در دوام بتن غلتکی ایجاد کند. لذا توجه به تدابیر حفاظتی برای کاهش این خطر با استفاده از افزودنی‌های ضد آب، بهینه‌سازی طول الیاف، عمل آوری مناسب بتن غلتکی و نگهداری مناسب از روسازی بتن غلتکی در جلوگیری از نفوذ آب می‌تواند ضروری باشد.

۲-۴ طرح اختلاط و تهیه نمونه‌ها

جدول (۳) جزئیات طرح اختلاط بتن غلتکی مصرفی را نشان می‌دهد. در ابتدا، شن، ماسه، سیمان و آب توسط مخلوط‌کن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شده و الیاف جوت به تدریج به داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود. در ادامه، مخلوط‌کن به مدت ۳ دقیقه دیگر کار می‌کند تا الیاف در تمام فضای بتن غلتکی پخش شده و مخلوط کاملاً یکنواختی حاصل گردد. با ریختن بتن مخلوط



شکل ۵. مراحل ساخت نمونه‌های استوانه‌ای

شکل حاوی الیاف و بدون الیاف صورت گرفت.

۳. نتایج و بحث

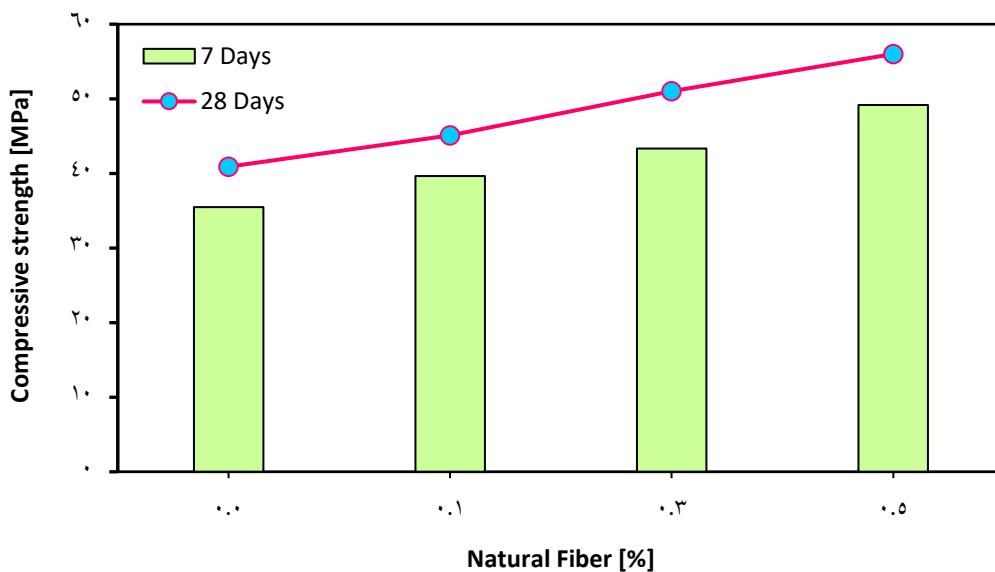
۳-۱ مقاومت فشاری بتن غلتکی

شکل ۶ تأثیر درصد وزنی الیاف طبیعی در مقاومت فشاری بتن غلتکی در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه را به منظور بررسی رفتار آن در گذشت زمان و تکمیل شدن پدیده هیدراتاسیون نشان می‌دهد.

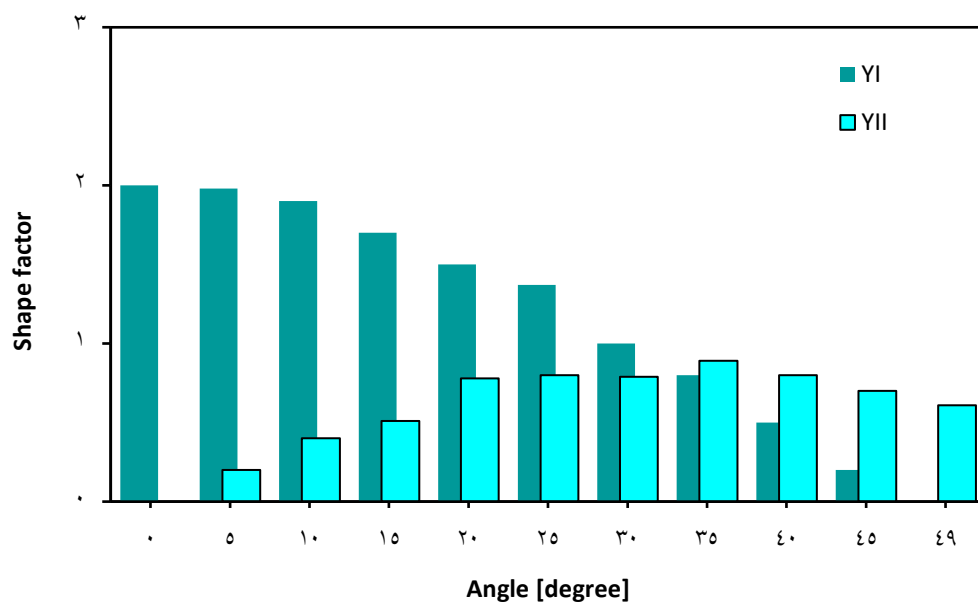
۲-۵ آزمایش مقاومت شکست و فشاری بتن غلتکی

آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن و تحت بارگذاری استاتیک با نرخ ثابت بارگذاری صورت گرفت. این دستگاه می‌تواند منحنی بار - جابجایی را ترسیم نموده و مقدار بار بحرانی شکست و میزان چقرمگی شکست هر یک از مخلوط‌های بتن غلتکی را تعیین نماید. همچنین آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری



شکل ۶. مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی



شکل ۷. نمودار ضرایب شکل

استحکام کلی بتن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر الیاف طبیعی با جذب انرژی می‌توانند تنش را به‌طور یکنواخت در سراسر بتن توزیع کنند که می‌تواند ظرفیت باربری آن را افزایش دهد. همچنین افزودن الیاف طبیعی به داخل ساختار بتن باعث پر شدن فضاهای خالی درون آن شده و ضمن تشکیل ساختاری متراکم‌تر استحکام فشاری بتن افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه از ۱۲ الی ۳۹ درصد و در نوع ۲۸

مشاهده می‌گردد با اضافه شدن الیاف در درصدهای مختلف مقاومت فشاری بتن غلتکی نسبت به بتن غلتکی بدون الیاف افزایش می‌یابد. دلیل این مشاهده این است که الیاف طبیعی جوت پیوندهای بین مواد چسباننده و ذرات سنگ‌دانه را افزایش می‌دهند و منجر به تشکیل ساختاری منسجم‌تر می‌شوند. همچنین الیاف افزوده‌شده با پل زدن بر روی ترک‌ها و جلوگیری از انتشار آن‌ها به کنترل ترک کمک می‌کنند. این امر دوام و

در جدول ۴ مقادیر بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی نیم دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای بدون الیاف و الیاف دار در مودهای مختلف بارگذاری، نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که بار شکست نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف طبیعی در تمام حالت‌های بارگذاری افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر رشد ترک نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در تمام مودهای بارگذاری است. افزایش بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت با افزایش درصد الیاف درون آن را می‌توان به چندین عامل کلیدی نسبت داد. با افزایش محتوای الیاف، مواد کامپوزیتی بهتر می‌توانند در برابر تنش‌های کششی مقاومت کنند که منجر به بارهای شکست بیشتر می‌شود. الیاف طبیعی با پل زدن بین ترک‌هایی که در زمینه بتن ایجاد می‌کنند به توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در مواد کمک کنند و با جلوگیری از انتشار ترک‌ها به افزایش کلی ظرفیت باربری کمک نمایند. همچنین ظرفیت جذب انرژی الیاف طبیعی می‌تواند شکست را به تأخیر بیندازد.

روزه بین ۱۰ الی ۳۷ درصد است که می‌توان گفت تأثیر الیاف طبیعی بر عمل‌آوری بتن غلتکی ۷ روزه کمی بیشتر از عمل‌آوری بتن غلتکی ۲۸ روزه است. علت این رفتار را می‌توان در توانایی الیاف در محدود کردن و جلوگیری از گسترش ترک و در نتیجه کاهش تمرکز تنش در ناحیه ترک‌خوردگی و در نهایت کاهش سرعت رشد ترک در بتن غلتکی الیاف دار بیان کرد. نتیجه تأثیر مثبت جوت بر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی را اسلام و احمد [Islam and Ahmed, 2018] و همچنین رزمی و میر سیار [Razmi, and Mirsayar, 2017] در پژوهش‌های گذشته خود گزارش نموده اند.

۲-۳ تعیین ضرایب شکل نمونه‌های نیم دایره‌ای زاویه‌ای ترک‌دار

در شکل ۷ نتایج عددی حاصل از تعیین ضرایب شکل نمونه‌های نیم دایره‌ای زاویه‌ای ترک‌دار که بر اساس تحلیل المان محدود تعیین شده‌اند نشان داده شده است. از این نتایج برای به دست آوردن مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی در مطالب پیش رو استفاده خواهد شد.

۳-۳ بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی

جدول ۴. بار شکست نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

میانگین بار شکست (KN)			بدون الیاف	M ^e	زاویه ترک (درجه)
(۰/۵ درصد)	(۰/۳ درصد)	(۰/۱ درصد)			
۵/۳۵	۵/۰۵	۴/۶۲	۳/۴۵	۱	۰
۶/۲۹	۶/۱۹	۵/۳۲	۳/۷۵	۰/۸۱	۱۵
۷/۱۸	۶/۹۸	۵/۹۶	۴/۱۲	۰/۵۷	۳۰
۷/۴۰	۷/۳۲	۶/۳۳	۴/۳۴	۰/۳۵	۴۰
۷/۹۵	۷/۸۸	۶/۶۶	۴/۸۷	۰/۱۸	۴۵
۸/۱۹	۸/۱۴	۷/۰۳	۵/۳۵	۰	۴۹

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

جدول ۵. مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف در مدهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۳۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۵۷۶	۰/۵۳۲	۰/۳۴۴	۰/۱۸۱	۰/۰۸۱	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۱۵۹	۰/۲۷۱	۰/۲۸۹	۰/۲۸۴	۰/۲۷۲
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۵۷۶	۰/۵۵۵	۰/۴۳۷	۰/۳۴۱	۰/۲۹۵	۰/۲۷

جدول ۶. مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۱ درصد الیاف در مدهای مختلف بارگذاری

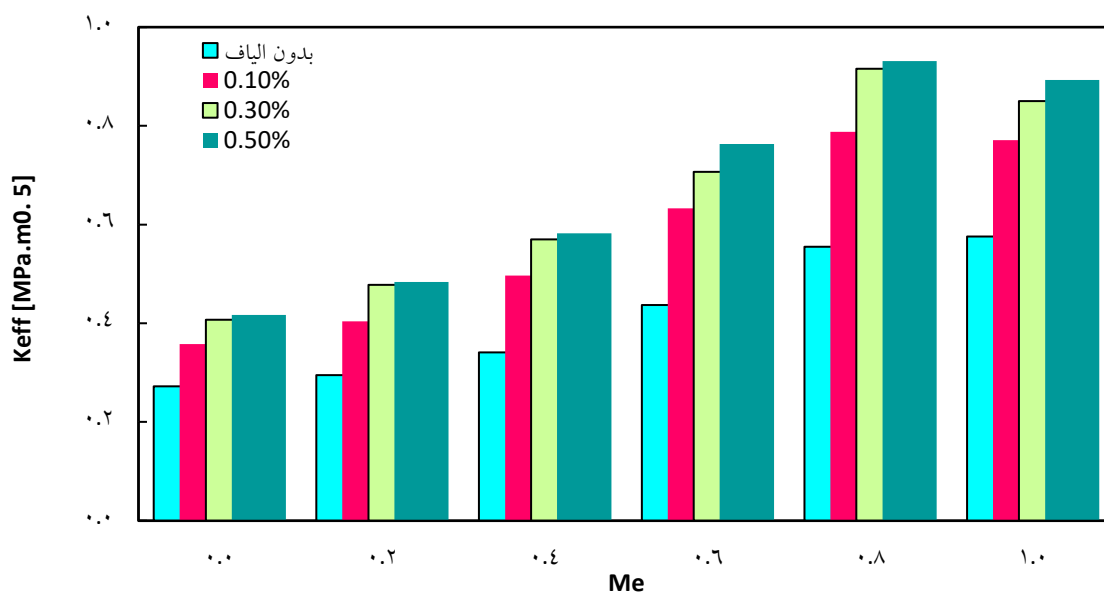
زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۳۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۷۷۱	۰/۷۵۵	۰/۴۹۷	۰/۲۶۴	۰/۱۱۱	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۲۲۶	۰/۳۹۳	۰/۴۲۲	۰/۳۸۹	۰/۳۵۸
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۷۷۱	۰/۷۸۸	۰/۶۳۳	۰/۴۹۷	۰/۴۰۴	۰/۳۵۸

جدول ۷. مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۳٪ درصد الیاف در مدهای مختلف بارگذاری

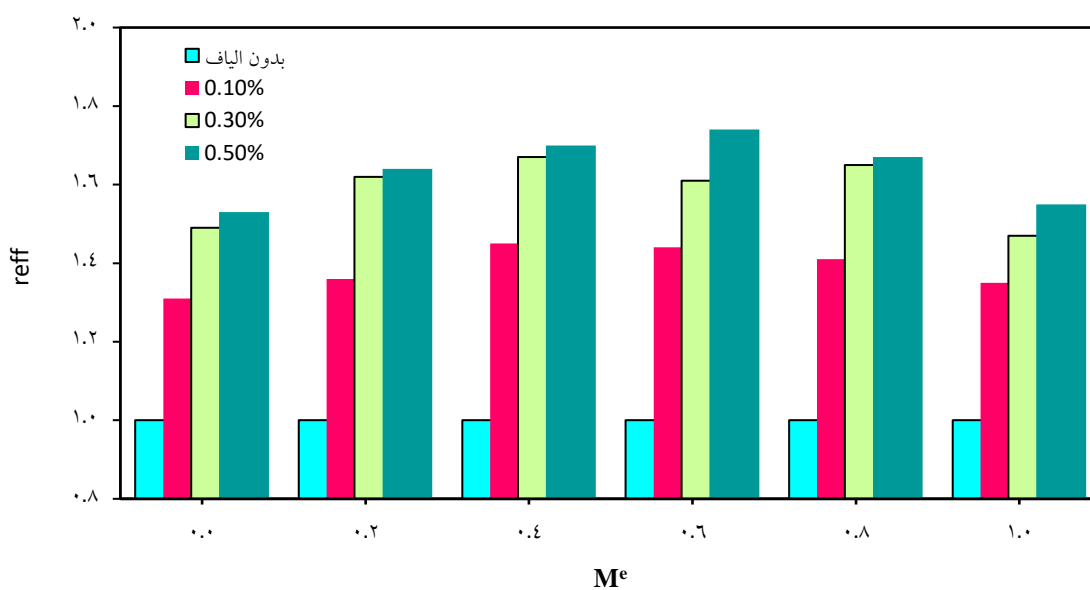
زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۳۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۵۰	۰/۸۷۸	۰/۵۸۳	۰/۳۰۵	۰/۱۳۱	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۲۶۳	۰/۴۶۰	۰/۴۸۹	۰/۴۶۰	۰/۴۰۷
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۵۰	۰/۹۱۶	۰/۷۰۷	۰/۵۷۰	۰/۴۷۸	۰/۴۰۷

جدول ۸. مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی ۰/۵ درصد الیاف در مدهای مختلف بارگذاری

زاویه ترک (درجه)	۰	۱۵	۳۰	۴۰	۴۵	۴۹
M^e	۱	۰/۸۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۱۸	۰
$K_{If} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۹۳	۰/۸۹۲	۰/۵۹۹	۰/۳۰۸	۰/۱۳۲	۰
$K_{IIf} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰	۰/۲۶۸	۰/۴۷۳	۰/۴۹۴	۰/۴۶۴	۰/۴۱۷
$K_{eff} (MPa \cdot \sqrt{m})$	۰/۸۹۳	۰/۹۳۱	۰/۷۶۳	۰/۵۸۲	۰/۴۸۴	۰/۴۱۷



شکل ۸. تحلیل مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست بتن غلتکی



شکل ۹. تأثیر الیاف جوت بر مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

الیاف و بدون الیاف کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، مقاومت شکست بیشینه در مود کشش خالص I و کمینه مقدار آن در مد برش خالص II اتفاق می‌افتد. همچنین افزودن الیاف جوت به بتن غلتکی، مقاومت شکست بتن غلتکی ترک‌دار را در مودهای مختلف بارگذاری افزایش می‌دهد.

شکل ۹، اثر الیاف جوت را بر مقاومت شکست بتن غلتکی ترک‌دار نشان می‌دهد. در این شکل، نسبت مقاومت شکست بتن

۳-۴ مقاومت شکست مودهای مختلف بارگذاری بتن

غلتکی

مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری در درصد‌های مختلف الیاف طبیعی در جدول‌های ۵ الی ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که با تغییر از حالت بارگذاری کشش خالص به برش خالص، مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

• مقاومت شکست در نمونه‌های بتنی دارای افزودنی الیاف و بدون آن با انتقال از مود کشش خالص به برش خالص کاهش می‌یابد. یعنی کمترین مقدار مقاومت شکست در برش خالص II و بیشترین مقدار مقاومت شکست در مود کشش خالص I رخ می‌دهد.

• می‌توان گفت که مقدار مناسب درصد الیاف طبیعی با توجه به مقاومت شکست در مدهای مختلف بارگذاری، ۰/۳ درصد وزن بتن غلتکی است، چرا که مقدار بیشتر از این عدد، تأثیر معناداری بر مقاومت شکست نمونه‌ها ندارد.

۵. مراجع

– Rambabu, D., Sharma, S.K. and Akbar, M.A. (2023) “A review on suitability of roller-compacted concrete for constructing high traffic resisting pavements”, *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 8, No. 1.

– Debbarma, S., and Ransinchung, G. D. (2021) "Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review", *Journal of cleaner production*, Vol. 287, pp. 125078.

– Aghaeipour, A., and Madhkhan, M. (2020) “Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review”, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 21, No. 7, pp. 1775-1798.

– Koohmishi M. (2013) “Evaluation of application of roller compacted concrete versus asphalt concrete as pavement surface layer for high traffic volume routes”, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, Vol. 3, pp. 330-335.

– Hassani A., Shekarchizade M. and Akbarnejad S. (2008) “Properties of roller compacted concrete containing a high-volume and low-volume non-plastic aggregates for

غلتکی دارای الیاف جوت به بتن غلتکی بدون الیاف نمایش داده شده است. شکل ۹ بیان می‌کند که این نسبت بزرگ‌تر از یک است. این بدان معنا است که مقاومت شکست در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی الیاف بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف است. مطابق نتایج این شکل می‌توان گفت که بیشترین اثر الیاف در مدهای بارگذاری ترکیبی I/II ($0.4 < M^e < 0.8$) قابل مشاهده است. همچنین، شکل ۹ بیان می‌کند که الیاف جوت در مقدار بیشتر از ۰/۳ درصد، مقدار مقاومت شکست بتن غلتکی را به مقدار قابل توجهی تغییر نمی‌دهد. بنابراین، در مدهای مختلف بارگذاری مقدار مناسب الیاف ۰/۳ درصد کل وزن بتن غلتکی است. لازم به ذکر است که الیاف جوت به کار رفته در این تحقیق دارای درصد جذب آب بالا در حدود ۱۲ درصد می‌باشند. لیکن ویژگی‌های مکانیکی مثبت دیگر این الیاف در اندرکنش آن با درصد جذب آب توانسته است مقاومت شکست مخلوط بتن غلتکی را بهبود دهد.

۴. نتیجه‌گیری

آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت شکست برای بتن غلتکی دارای الیاف طبیعی جوت نشان داد که:

- نمونه‌های نیم دایره‌ای ترک‌دار، نمونه‌های مناسبی برای مدل‌سازی در آباکوس هستند
- افزایش درصد الیاف طبیعی، مقاومت فشاری بتن غلتکی را در هر دو حالت ۷ و ۲۸ روزه افزایش می‌دهند.
- افزایش مقاومت در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه از ۱۲ تا ۳۹ درصد و در ۲۸ روزه بین ۱۰ تا ۳۷ درصد است که می‌توان گفت تأثیر الیاف طبیعی بر عمل‌آوری بتن غلتکی ۷ روزه کمی بیشتر از عمل‌آوری بتن غلتکی ۲۸ روزه است.
- در تمام مدهای بارگذاری، زمانی که درصد الیاف طبیعی افزایش می‌یابد، مقدار مقاومت شکست در تمام نمونه‌ها بیشتر می‌شود. این بدان معناست که افزایش الیاف طبیعی، مقاومت در برابر ترک را افزایش می‌دهد.

- compacted concrete pavement modified with synthetic fibers”, Amirkabir Journal of Civil Engineering, Vol. 52, No. 5, pp. 273-275. (In Persian)
- Chaleshi, R. Golchin, B., Meshkabadi, R. (2024) “Experimental Evaluating the Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Roller-compacted Concrete”, Ferdowsi Civil Engineering. (In Persian)
- Razmi, A., and Mirsayar, M. (2017) “On the mixed mode I/II fracture properties of jute fiber-reinforced concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 148, pp. 512-520.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R., (2007) “Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading”, Computational materials science, Vol. 38, pp. 660–670.
- Smith, D. J., Ayatollahi, M. R., Pavier, M. J. (2001) “The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 24, pp. 137–150.
- Islam, M. S., and Ahmed, S. J. (2018) “Influence of jute fiber on concrete properties”, Construction and Building Materials, Vol. 189, pp. 768-776.
- Ahmad, J., Arbili, M. M., Majdi, A., Althoey, F., Farouk Deifalla, A., and Rahmawati, C. (2022) “Performance of concrete reinforced with jute fibers (natural fibers): A review”, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Vol. 17, pp. 15589250221121871.
- pavements”, TRB 1078, National Research Council, Washington D.C.
- Naidu, P. G., Kumar, J., Adishes, S. and Satayanarayana, P.V. (2012) “A study on strength properties of roller compacted concrete with 30% replacement of OPC 53 grade cement by flyash”, International Journal of computational Engineering Research, Vol. 2, No. 3, pp. 912-918.
- Brotman, I., Michael, C., and John, G. (2007) “Roller compacted concrete pavement: Properties, design, and construction.” Soil and material inputs for mechanistic-empirical pavement design, pp. 1-10.
- Jahanbakhsh, P., Saberi K. F., Soltaninejad, M. (2023) “Laboratory Investigation of Modified Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) Containing Macro Synthetic Fibers”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 745–759.
- Sengun, E., Alam, B., Shabani, R., Yaman, I.O. (2021) “Strength and fracture properties of roller compacted concrete (RCC) prepared by an in-situ compaction procedure”, Construction and Building Materials, Vol. 271, pp. 121563.
- Fakhri, M., Ershad, A. (2017) “Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 180.
- Zhou, X., Ghaffar, S., Dong, H., Oladiran, O. Fan, M. (2013), “Fracture and impact properties of short discrete jute fiber-reinforced cementitious composites”, Materials and Design, Vol. 49, pp. 35–47.
- Yousefi, A., and Golchin, B. (2020) “Investigation of fracture resistance of roller-

تحلیل تجربی استحکام شکست بتن غلتکی حاوی الیاف طبیعی جوت تحت مدهای مختلف بارگذاری

بابک گلچین، مدرک رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه ارومیه و مدرک کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. او در سال ۱۳۹۳ درجه دکتری را در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه یواسام مالزی اخذ. وی هم اکنون تحقیقات خود را در زمینه تکنولوژی آسفالت و بتن ادامه می‌دهد. ایشان در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه محقق اردبیلی است.



بهنام رمزی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان در زمینه مخلوط‌های آسفالتی و بتنی می‌باشد.



رامین مشک آبادی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ از دانشگاه تبریز اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک از دانشگاه تهران گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان مکانیک شکست است و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد.

