



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Optimization of Cementitious Concrete Mix Design Containing Various Percentages of Recycled Tire Rubber Granules and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Din Mohammad Imani^{a*}

^aAssistant Professor, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-03-18

Revised: 2025-03-31

Accepted: 2025-04-06

Keywords:

Cementitious concrete,
Recycled additives,
RAP,
Tire rubber granules,
Crack resistance index,
Experimental design,
Optimal mix design,
Statistical methods.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used Mater. in civil engineering Struct., with large quantities being utilized globally each year. Incorporating recycled and waste Mater. into concrete mixtures is an effective and economical approach for producing green and cost-efficient concrete while also addressing environmental concerns related to industrial waste disposal and storage. Recycled tire rubber granules and reclaimed asphalt pavement (RAP) are two waste Mater. available in large quantities, and their substitution for natural aggregates can contribute to the development of eco-friendly and low-cost cementitious concrete. However, it is essential to ensure that concrete containing these recycled Mater. maintains adequate strength and mechanical properties. One of the key indicators of the durability and service life of concrete Struct. is their resistance to cracking, which is measured using the fracture toughness parameter. This study investigates the crack growth behavior of cementitious concrete mixtures incorporating different percentages of tire rubber granules and RAP in their mix designs. Using the Taguchi experimental design method, the rubber granule content was varied from 0% to 9% by volume, while the RAP content ranged from 0% to 40% by volume, resulting in 16 different concrete mixtures with varying proportions of rubber granules and RAP aggregates. Fracture toughness tests were conducted on pre-notched flexural disk specimens for different concrete mixtures. The results indicate a significant effect of the type and percentage of additives on the crack resistance of cementitious concrete. Statistical analyses were performed to assess the influence of RAP and rubber granules on the fracture toughness index. Initially, an analysis of variance (ANOVA) was conducted to evaluate the significance of the factors, followed by a Pareto chart to illustrate their effects. The statistical analysis revealed that both additives had a significant impact on the fracture behavior of cementitious concrete, with RAP having a greater effect than tire rubber granules. Additionally, based on the optimization results, the optimal mix design consisting of 30% RAP, 70% limestone aggregate, and 0% tire rubber granules exhibited the highest fracture toughness.

* Corresponding author.

E-mail address: imanidm11@gmail.com

How to cite this article: Imani, D. M. (2025). Optimization of Cementitious Concrete Mix Design Containing Various Percentages of Recycled Tire Rubber Granules and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 39-57. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37190.1720>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول لاستیک تایر و تراشه آسفالت بازیافتی (رپ)

دین محمد ایمانی^{*}

^۱ استادیار، گروه صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

بتن یکی از مواد بسیار متداول جهت ساخت سازه‌های عمرانی می‌باشد و در سرتاسر جهان هر ساله مقادیر زیادی از این ماده مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از مواد بازیافتی و ضایعاتی در طرح اختلاط مخلوط بتن‌ها یکی از روش‌های مناسب و اقتصادی جهت تولید بتن‌های سبز و با صرفه اقتصادی می‌باشد که می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی مربوط به امحا و انبارش ضایعات صنعتی را نیز کاهش دهد. گرانول لاستیک تایرهای بازیافتی و نیز تراشه‌های آسفالت بازیافتی و ضایعاتی است که در حجم‌های زیاد قابل تولید است و جایگزینی این دو ماده با سنگدانه‌های طبیعی می‌تواند به تولید بتن‌های سیمانی سبز و ارزان قیمت کمک نماید. با این وجود لازم است که بتن ساخته شده با این مواد بازیافتی به لحاظ استحکام و خواص مکانیکی نیز عملکرد مناسب داشته باشد. یکی از شاخص‌های تعیین کننده عملکرد دوام و عمر سازه‌های بتنی میزان مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط بتنی می‌باشد که با پارامتری به نام چقرمگی شکست اندازه‌گیری و سنجیده می‌شود. در این مقاله، به بررسی رفتار رشد ترک مخلوط‌های بتن سیمانی مختلف حاوی درصد‌های مختلفی از گرانول لاستیک و RAP (رپ) در طرح اختلاط آنها پرداخته می‌شود. بدین منظور، با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، محدوده افزودنی گرانول از صفر درصد حجمی تا ۹ درصد حجمی و محدوده افزودنی رپ از صفر درصد تا ۴۰ درصد حجمی تغییر داده شده و ۱۶ ترکیب مختلف از بتن حاوی درصد‌های مختلف سنگدانه گرانول و رپ مورد ارزیابی قرار گرفت. تست‌های چقرمگی شکست با استفاده از نمونه دیسک ترک‌دار خمشی روی مخلوط‌های مختلف بتنی انجام شد. نتایج تست‌ها نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه نوع و درصد افزودنی‌ها بر میزان مقاومت ترک‌خوردگی بتن‌های سیمانی است. برای بررسی اثرگذاری رپ و گرانول بر مقدار شاخص چقرمگی شکست از آزمون‌های آماری استفاده شد. در ابتدا از آنالیز واریانس (ANOVA) جهت بررسی تأثیرگذاری عامل استفاده شد و سپس این تأثیرگذاری با استفاده از نمودار پارتو نشان داده شد. بر اساس تحلیل‌های آماری، هر دو افزودنی تأثیر معنادار و قابل توجهی بر رفتار شکست بتن‌های سیمانی دارند؛ اما تأثیر افزودنی رپ از افزودنی گرانول لاستیک تایر بیشتر است. همچنین، بر اساس بهینه‌سازی انجام شده، طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد رپ، ۷۰ درصد سنگدانه آهکی و صفر درصد گرانول لاستیک، بیشترین مقدار چقرمگی شکست بتن را به دست می‌دهد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

واژگان کلیدی:

بتن سیمانی،

افزودنی‌های مواد بازیافتی،

رپ،

گرانول لاستیک تایر،

شاخص مقاومت ترک-

خوردگی،

طراحی آزمایش،

طرح اختلاط بهینه،

روش‌های آماری.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: imanidm11@gmail.com

استناد به این مقاله: ایمانی، دین محمد. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول

لاستیک تایر و تراشه آسفالت بازیافتی (رپ). مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۳۹-۵۷

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37190.1720>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

زیر ساخت‌های عمرانی هر کشور، از جمله جاده‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها و سیستم‌های حمل و نقل، نقش اساسی در توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی ایفا می‌کنند. کیفیت و دوام این زیرساخت‌ها تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، ایمنی و پایداری محیطی دارد (برادران و عامری، ۲۰۲۳). با توجه به افزایش چالش‌های زیست‌محیطی، از جمله تغییرات اقلیمی و کاهش منابع طبیعی، لازم است که در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی، ملاحظات زیست‌محیطی به‌طور جدی مد نظر قرار گیرد (برادران و عامری، ۲۰۲۳). بتن، خاک و آسفالت از مهم‌ترین مصالح مورد استفاده در زیر ساخت‌های عمرانی هستند. تولید این مواد، به‌ویژه سیمان در بتن و قیر در آسفالت، منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع طبیعی می‌شود. برای کاهش اثرات زیست‌محیطی، می‌توان از روش‌هایی مانند استفاده از مواد بازیافتی (عیار و همکاران، ۲۰۲۲؛ بازوبندی و همکاران، ۲۰۲۴؛ برادران و ضیایی، ۲۰۲۵؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۷)، بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط، و به کارگیری فناوری‌های نوین در تولید این مصالح بهره برد. به‌عنوان مثال، افزودن مواد پلیمری بازیافتی (ا سداالله تبار و همکاران، ۲۰۲۱؛ برادران و علی‌ها، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴؛ علی‌ها و همکاران، ۲۰۲۴؛ کرم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲) به آسفالت یا بتن و استفاده از خاک‌های تثبیت‌شده با افزودنی‌های پایدار (برادران و همکاران، ۲۰۲۳؛ طارقیان و همکاران، ۲۰۲۴؛ رجایی و همکاران، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۵؛ شجاع‌مقدم و همکاران، ۲۰۲۴؛ یزدی و همکاران، ۲۰۲۴) می‌تواند به کاهش مصرف منابع طبیعی و افزایش دوام زیرساخت‌ها کمک کند. توسعه زیرساخت‌های پایدار نه تنها به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری

کمک می‌کند، بلکه موجب کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و حفظ منابع برای نسل‌های آینده خواهد شد. در نتیجه، ادغام اصول مهندسی سبز در پروژه‌های عمرانی یک ضرورت غیرقابل انکار برای دستیابی به توسعه پایدار محسوب می‌شود (سیوینسکی، ۲۰۰۱).

بتن یکی از پُر استفاده‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است و تولید آن نیازمند به‌کارگیری مقادیر زیادی از منابع طبیعی است. اگرچه این منابع در اکثر مناطق در دسترس هستند، لیکن حجم بالای ساخت‌وساز و افزایش مصرف منابع طبیعی، تأثیرات منفی بر محیط‌زیست گذاشته است. بنابراین، برای تولید سازه‌های بتنی، ضروری است که مسائل پایداری و زیست‌محیطی در طرح اختلاط آنها مد نظر قرار گیرد. با توجه به تولید گسترده بتن، هرگونه تلاشی که منجر به کاهش حتی اندک مصرف مواد اولیه شود، می‌تواند نقش بزرگی در حفظ منابع طبیعی ایفا کند. در میان اجزای بتن، سنگدانه‌ها حداقل ۶۰ درصد از وزن و حجم آن را تشکیل می‌دهند. بنابراین، جایگزینی جزئی سنگدانه‌ها با مواد بازیافتی و یا ضایعات می‌تواند به حفظ منابع طبیعی کمک کند (گولوسکی، ۲۰۲۱؛ مرادی و همکاران، ۲۰۲۱). امروزه، پژوهشگران از بسیاری از محصولات جانبی تولیدات صنعتی (مانند سرباره کوره‌ها (دینگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ هانین و همکاران، ۲۰۲۰) یا گرد کوره سیمان (خاطر، ۲۰۱۹؛ روئنگ‌سیلاپانون و همکاران، ۲۰۲۱)، خاکستر بادی (خان و همکاران، ۲۰۲۰؛ گولو سکی، ۲۰۲۱)، خاک اره (نیلی و همکاران، ۲۰۲۱)، گرد سیلیس (گوپتا و همکاران، ۲۰۱۹) یا مواد بازیافتی مانند گرانول یا پودر لاستیک (گو و همکاران، ۲۰۲۱؛ مو و همکاران، ۲۰۲۰)، پودر شیشه (سرلیس و همکاران، ۲۰۲۱)، پودر سنگ یا آجر (جنسل و همکاران، ۲۰۲۰)، پودر سیلیس (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، قسمت‌هایی از

بتن بازیافتی (رحال و حسن، ۲۰۲۱)، خاکستر پو ست برنج (سالونی و همکاران، ۲۰۲۱)، الیاف فولادی (کریمی و همکاران، ۲۰۲۲)، الیاف پلاستیک (زالسکا و همکاران، ۲۰۱۸؛ گراوینا و همکاران، ۲۰۲۱) و یا الیاف طبیعی (چن و همکاران، ۲۰۲۳) در ترکیب و طرح اختلاط مواد بتن استفاده می‌کنند. بسیاری از این مواد می‌توانند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، ویژگی‌های عملکردی و رفتار مکانیکی بتن را نیز بهبود بخشند.

امحا و از بین بردن تایلرهای فرسوده خودروها یک مشکل عمده در سرتا سر نقاط جهان می‌باشد. سالانه میلیون‌ها تایلر دور انداخته می‌شوند و یا در زمین دفن می‌شوند که این امر به یک معضل زیست‌محیطی جدی تبدیل شده است. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰، سالانه حدود یک میلیارد و دویست میلیون تایلر دور ریخته شود و بیش از ۵۰ درصد از این تایلرها در محل‌های دفن زباله یا به‌عنوان زباله بدون هیچ‌گونه استفاده خاصی دفع شوند (عباس‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای امحای تایلرهای فرسوده، سوزاندن آنها است. اما چنین روش‌هایی منجر به خطرات جدی زیست‌محیطی می‌شوند. تایلرها از مواد اولیه پتروشیمیایی مانند استایرن و بوتادین ساخته می‌شوند. سوزاندن تایلرها، استایرن و چندین ترکیب بنزن را آزاد می‌کند که ترکیبات سرطان‌زا و سمی هستند. ضمناً پسماندهایی که پس از سوزاندن تایلرها باقی می‌ماند، خاک و آب را آلوده می‌کند. با این حال، یکی از راه‌حل‌های ممکن برای استفاده بهتر از تایلرهای ضایعاتی، ترکیب آنها با مواد پایه سیمانی و جایگزینی جزئی برخی از سنگدانه‌های طبیعی با ذرات تایلر است. از آنجا که بتن‌های حاوی مواد بازیافتی از حداقل چهار ماده تشکیل شده است (یعنی سیمان، سنگدانه‌های ریز

و درشت، مواد بازیافتی و گاهی افزودنی‌هایی مانند سوپرپلاستی‌سایزر) درصد و حجم هر یک از اجزا می‌تواند بر استحکام و سایر خواص مکانیکی بتن حاصل تأثیر بگذارد. در واقع، افزایش یا کاهش درصد اجزا می‌تواند شاخص انعطاف‌پذیری یا شکنندگی مخلوط بتن را تغییر دهد و به طور قابل‌توجهی بر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی ماده بتن تأثیر بگذارد (ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۲؛ توماس و چاندران گوپتا، ۲۰۱۶؛ یو و بانتیا، ۲۰۱۶). چندین مزیت (مانند افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش چگالی، بهبود ظرفیت جذب انرژی و افزایش مقاومت در برابر ضربه) برای استفاده از لاستیک بازیافتی در بتن گزارش شده است. به عنوان مثال، عیسی و سالم (۲۰۱۳) تأثیرات جایگزینی دانه‌های ریز با لاستیک خرد شده را ارزیابی کردند. آنها دریافتند که جایگزینی تا ۲۵٪ دانه‌های ریز با لاستیک خرد شده استحکام مناسبی برای مخلوط جدید حاوی پودر لاستیک ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر، تراشه‌های آسفالت بازیافتی دپو شده حاصل از به‌سازی و تعمیر رویه جاده‌ها و روسازی‌ها یکی از مواد ضایعاتی با حجم زیاد است که امکان استفاده از آن در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی و یا بتن وجود دارد. این تراشه‌ها به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها و مصالح نو و تازه در بتن می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه، مشکلات زیست‌محیطی انبارش و دپوی آسفالت‌های بازیافتی را نیز حل کند. وجود قیر با رفتار الاستیک و انعطاف‌پذیری مناسب نیز می‌تواند باعث بهبود عملکرد و خواص مکانیکی بتن‌های سیمانی گردد. محققین متعددی از مواد آسفالتی بازیافتی (RAP) در طرح اختلاط مخلوط‌های بتن آسفالتی و بتن سیمانی استفاده نموده و به بررسی کارایی و اثر این مواد بر خواص استحکام آنها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، دبرما و

همکاران (۲۰۲۰) به امکان سنجی استفاده از تراشه‌های آسفالت بازیافتی رپ در طرح اختلاط روسازی‌های بتنی پرداختند. دلوار و همکاران (۱۹۹۷) از افزودنی رپ به عنوان سنگدانه در بتن‌های سیمانی استفاده نمودند. سوبسوک و همکاران (۲۰۲۴) نیز با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، طرح اختلاط بهینه برای بتن‌های سیمانی حاوی رپ ارائه نمودند به طوری که مخلوط‌های حاصل دارای خواص مکانیکی و استحکامی مناسبی باشند. نجار و همکاران (۲۰۲۰)، نجار و همکاران (۲۰۲۲) الف و ب) از قیر امولسیون در طرح اختلاط بتن‌های سیمانی استفاده نمودند. آنها با استفاده از قطعات آزمایشگاهی ترک‌دار به بررسی رفتار شکست و خستگی بتن‌های ساخته شده از حاوی قیر امولسیونی در مودها و حالت‌های مختلف شکست پرداختند. ساهان و اونسال (۲۰۲۳) با انجام آزمایش‌ها و تحلیل‌های آزمایشگاهی، رفتار مقاومت به ضربه بتن‌های حاوی دانه‌بندی رپ را مورد ارزیابی قرار دادند. حقیقت‌پور و علیها (۲۰۲۳) به بررسی استفاده از سنگدانه‌های رپ در طرح اختلاط بتن‌های آسفالتی و در دماهای زیاد و کم پرداختند. آنها اثر قرارگیری مخلوط بتن در شرایط سیکل‌های ذوب و یخبندان را مورد ارزیابی قرار داده و میزان ظرفیت بارپذیری و مقاومت ترک‌خوردگی این بتن‌ها را با روش آزمایشگاهی تعیین کردند.

ترک‌خوردگی و رشد ترک در سازه‌های بتنی یکی از علل و عوامل شایع در واماندگی و تخریب کلی و اساسی این سازه‌هاست که ذاتاً دارای رفتار ترد و شکننده می‌باشند. به همین دلیل، بررسی رفتار شکست و رشد ترک در مخلوط‌های بتنی از اهمیت به سزایی در طراحی سازه‌ها و ساخته شده از بتن دارد. پارامتری به نام چقرمگی شکست (KIC) یکی از شاخصه‌های اصلی در بررسی میزان مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مواد

مهندسی دارای ترک می‌باشد. این پارامتر که یک خاصیت مکانیکی ذاتی مواد می‌باشد وابسته به طرح اختلاط و مواد تشکیل‌دهنده بتن می‌باشد. به دست آوردن طرح اختلاط مناسب و بهینه به منظور دستیابی به بتن‌های با بیشترین میزان مقاومت در برابر رشد ترک یکی از نیازمندی‌های اصلی در مهندسی ساخت و تولید سازه‌های عمرانی بتنی می‌باشد. هدف از این مقاله، بررسی تأثیر افزودن این مواد ضایعاتی در طرح اختلاط بتن سیمانی و دستیابی به مخلوط بهینه حاوی این افزودنی‌ها است، به طوری که بهترین عملکرد در برابر رشد ترک داشته باشند. در مواردی که تعداد متغیرها و پارامترهای ورودی متعدد بوده و سطوح و بازه تغییرات آنها بر خروجی (مانند مقاومت ترک‌خوردگی بتن) اثر گذار باشد، روش‌های مختلفی مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین، رگرسیون بردار پشتیبان، رگرسیون مبتنی بر درخت، رگرسیون جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و روش‌های مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها و تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرد (مجیدی‌فرد و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دائو و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به تعداد داده‌های در دسترس و موجود، دقت و عملکرد هر یک از روش‌های مذکور متفاوت می‌باشد و لذا بایستی از روش‌های مناسب‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر برای انجام بهینه‌سازی استفاده نمود. در این تحقیق، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، طرح اختلاط بهینه مخلوط بتن سیمان حاوی مواد بازیافتی گرانول لاستیک بازیافتی و آسفالت بازیافتی بدست آمده است. دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن حاوی چندین ماده افزودنی با روش‌های بهینه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، بر اساس طراحی آزمایش تعیین شده،

دانه‌بندی گرانول لاستیک نیز در محدوده ۰/۰۲ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر قرار داشت. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

۳. طراحی مخلوط‌های بتن سیمانی مطابق با روش طراحی آزمایش

برای تهیه یک ماده بتن با کیفیت خوب، باید دامنه‌های مناسبی از ترکیب‌ها در نظر گرفته شوند. انتخاب نادرست درصد مواد از این دامنه‌ها می‌تواند منجر به چسبندگی و پیوند ضعیف و نامناسب بین دانه‌ها و چسباننده، استحکام کم یا هزینه زیاد بتن شود. در این تحقیق، نسبت آب به سیمنان برای تمامی طراحی‌های مخلوط ثابت و برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. اما قسمت مصالح مخلوط بتن به صورت متغیر در نظر گرفته شد. در واقع، در صد حجمی سه جز شامل سنگدانه آهکی نو، گرانول لاستیک بازیافتی و دانه‌بندی مصالح آسفالت بازیافتی (RAP) به عنوان متغیرهای پژوهش در طرح اختلاط در نظر گرفته شدند. بر اساس بررسی‌های اولیه و مطالعات منابع موجود، محدوده درصد حجمی افزودنی گرانول لاستیک بازیافتی از صفر تا ۱۰ در صد و در صد حجمی افزودنی رپ از صفر تا ۴۰ درصد از کل حجم بخش مصالح سنگی در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر هر یک از این افزودنی‌ها در خواص مکانیکی بتن از روش طراحی آزمایش استفاده شد و سطوح پارامترها مطابق جدول ۱ انتخاب شد. ضمناً درصد سنگدانه (f) به عنوان پارامتر وابسته است که بر اساس مقادیر در صد رپ (RAP) و در صد گرانول لاستیک (Gran) با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

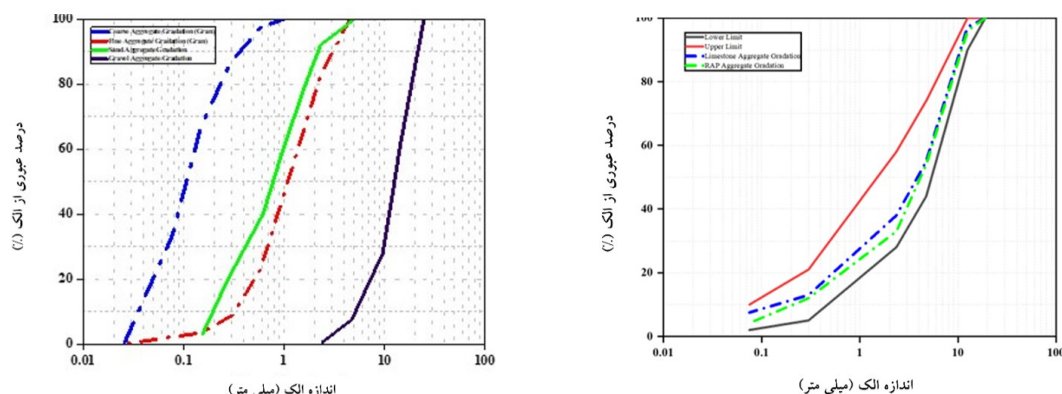
$$ff(RAP, Gran) = 100 - \%RAP - \%Gran \quad (1)$$

آزمایش‌های چقرمگی شکست روی طرح‌های اختلاط مختلف بتن سیمانی انجام می‌شود و با استفاده از تحلیل‌های آماری و بهینه‌سازی‌های مربوطه، طرح اختلاط مناسب و بهینه بتن ساخته شده با مواد بازیافتی تعیین می‌گردد. بدین منظور، ابتدا چندین مخلوط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلف از افزودنی‌های گرانول لاستیک تیر بازیافتی و آسفالت بازیافتی رپ (به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی) تهیه و تولید شده و مورد آزمایش شکست قرار می‌گیرد. نهایتاً طرح اختلاط مناسب و بهینه مخلوط‌های بتن سیمانی حاوی افزودنی‌های مواد ضایعاتی و بازیافتی ارائه می‌گردد. نشان داده می‌شود که استفاده از این مواد ضایعاتی در درصد‌های مشخصی حتی می‌تواند باعث بهبود عملکرد رفتار ترک‌خوردگی بتن‌های سیمانی گردد. در نتیجه، استفاده از این مواد ضایعاتی، علاوه بر حل مشکلات زیست‌محیطی و نیز کاهش هزینه، می‌تواند منجر به تولید بتن‌های سیمانی با مقاومت مناسب در برابر ترک‌خوردگی گردد (مجیدی‌فر و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دائو و همکاران، ۲۰۲۰).

۲. مواد و مصالح ساخت بتن

بتن‌های بررسی شده در این تحقیق شامل چندین جزء سیمنان، آب، مصالح سنگی آهکی (به عنوان سنگدانه اصلی)، گرانول لاستیک تیر بازیافتی و آسفالت بازیافتی رپ (RAP) دانه‌بندی شده می‌باشد. بدین منظور از سیمنان پورتلند نوع II معمولی طبق استاندارد ASTM C150 استفاده گردید. دانه‌بندی و اندازه سنگدانه‌های مربوط به مصالح نو و آسفالت بازیافتی بر اساس طراحی مخلوط انتخاب شدند که بر این اساس اندازه دانه‌بندی این دو جزء تقریباً یکسان و در محدوده ۰/۰۷۵ میلی‌متر تا ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شد. اندازه

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول لاستیک تایر و تراشه آسفالت ...



شکل ۱. تمامی دانه‌بندی‌های مصالح موجود در این پژوهش شامل مصالح سنگی آهکی، گرانول لاستیک تایر (Gran) و تراشه آسفالت بازیافتی (RAP)

جدول ۱. سطوح انتخاب شده برای درصد افزودنی‌های رپ و گرانول لاستیک تایر بازیافتی در طرح اختلاط بتن

سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
RAP	۰٪	۲۰٪	۴۰٪
Gran	۰٪	۳٪	۹٪

دایره‌ای شکل (دیسک و نیم‌دیسک) ترک‌دار (ارارسلان و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۸؛ بخشی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۴؛ ارارسلان و علیها، ۲۰۲۵؛ ارارسلان، ۲۰۱۹؛ ارارسلان، ۲۰۲۳) و قطعات تیر یا مستطیل شکل ترک‌دار (سومارچ و همکاران، ۲۰۰۳؛ اسکارژینسکی و تجچمن، ۲۰۲۱؛ سان و همکاران، ۲۰۱۹) تحت بارهای فشاری و یا خمشی از جمله پر تکرارترین نمونه‌های آزمایشی در این خصوص می‌باشند. در میان این نمونه‌ها، نمونه دیسک با ترک لبه‌ای و تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای که به اختصار قطعه ENDB نامیده می‌شود، یک روش آزمایشی ساده و مناسب برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست روی مواد سنگی، آسفالتی و بتنی می‌باشد (بهمنی و همکاران، ۲۰۲۰؛ هه و همکاران، ۲۰۲۲؛ معتدلی و

با استفاده از طراحی آزمایش ۱۶، طرح اختلاط برای قسمت مصالح و ساخت بتن جهت انجام آزمایش بررسی رفتار نمونه‌های بتنی در مقابل رشد ترک مطابق جدول ۲ تعیین گردید. در این جدول، کد نمونه بیانگر درصد افزودنی‌ها می‌باشد. به عنوان مثال، کد ۶-۲۰ مربوط به طرح اختلاطی است که دارای ۶ درصد حجمی گرانول و ۲۰ درصد حجمی رپ می‌باشد.

۴. انتخاب نمونه آزمایشگاهی، ساخت و

تست شکست قطعات بتنی

نمونه‌های آزمایشی مختلفی برای بررسی رفتار ترک‌خوردگی و اندازه‌گیری شاخص چقرمگی شکست (K_{IC}) در قطعات و مواد بتنی پیشنهاد شده و توسعه داده شده‌اند (ارارسلان و ویلیامز، ۲۰۱۲). قطعات

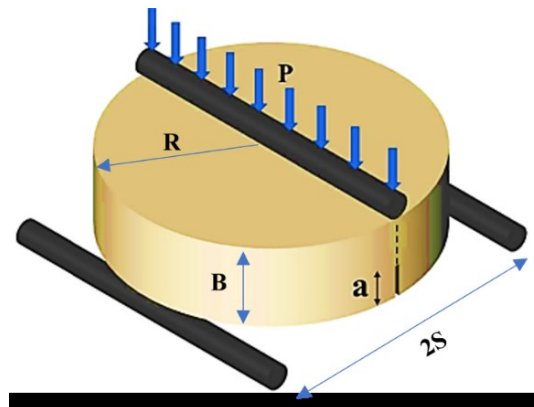
- General full factorial^۱

یا ضخامت B که دارای یک ترک به عمق a در امتداد قطر دیسک است، آزمایش چقرمگی شکست با اعمال بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای انجام می‌شود.

همکاران، ۲۰۲۰؛ بیدادی و همکاران، ۲۰۲۰؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۷). تصویر شماتیک هندسی و بارگذاری قطعه ENDB در شکل ۲ نمایش داده شده است. بر این اساس، با استفاده از یک دیسک به قطر $D=2R$ و ارتفاع

جدول ۲. طراحی آزمایش تاگوچی برای ترکیب مواد و مصالح طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی افزودنی‌های بازیافتی

شماره تست	کد نمونه	درصد حجمی ماده افزودنی RAP (%)	درصد حجمی ماده افزودنی Gran (%)	درصد حجمی سنگدانه (%)
۱	۰-۰	۰	۰	۱۰۰
۲	۲۰-۰	۲۰	۰	۸۰
۳	۳۰-۰	۳۰	۰	۷۰
۴	۴۰-۰	۴۰	۰	۶۰
۵	۰-۳	۰	۳	۹۷
۶	۲۰-۳	۲۰	۳	۷۷
۷	۳۰-۳	۳۰	۳	۶۷
۸	۴۰-۳	۴۰	۳	۵۷
۹	۰-۶	۰	۶	۹۴
۱۰	۲۰-۶	۲۰	۶	۷۴
۱۱	۳۰-۶	۳۰	۶	۶۴
۱۲	۴۰-۶	۴۰	۶	۵۴
۱۳	۰-۹	۰	۹	۹۱
۱۴	۲۰-۹	۲۰	۹	۷۱
۱۵	۳۰-۹	۳۰	۹	۶۱
۱۶	۴۰-۹	۴۰	۹	۵۱



شکل ۲. نمای شماتیک از قطعه و آزمایش ENDB برای به دست آوردن شاخص چقرمگی شکست در مواد بتنی

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول لاستیک تایر و تراشه آسفالت ...

تحقیق، برای انجام آزمایش چقرمگی شکست روی بتن سیمانی، ابعاد و اندازه قطعات ENDB مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شد.

$$K_{Ic} = \frac{3P_{max} S}{2RB^2} \cdot g(f) \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

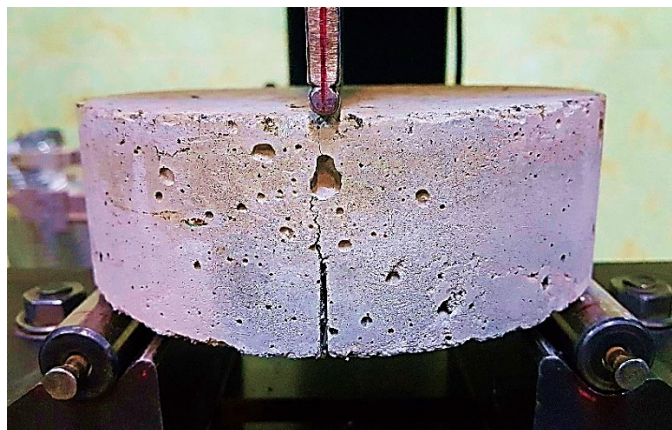
مقدار چقرمگی شکست با استفاده از رابطه (۲) محاسبه و تعیین می‌گردد که در آن P_{max} بیشترین بار اعمالی به قطعه ENDB در لحظه شکست و ترک‌خوردگی و $2S$ فاصله بین دو تکیه‌گاه پایینی در بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای می‌باشد. مقدار $g(f)$ که ضریب هندسه و یا ضریب شکل می‌باشد وابسته به فاصله تکیه‌گاهی و طول یا عمق ترک است. در این

جدول ۳. مقادیر پارامترهای هندسی و ابعادی قطعه ENDB در این تحقیق

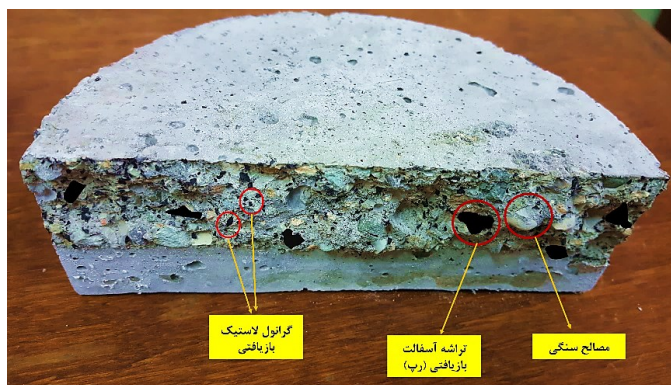
D (mm)	R (mm)	a (mm)	B(mm)	2S (mm)	g(f)
۱۵۰	۷۵	۲۰	۵۰	۱۳۵	۱/۲۱

سرعت و نرخ بارگذاری مشخص ۲ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۳ یکی از قطعات ENDB بتنی را در داخل دستگاه و فیکسچر خمشی نشان می‌دهد. بر اثر این نوع بارگذاری، با افزایش تدریجی نیروهای اعمالی به قطعه که به صورت خمشی به آن وارد می‌شود در یک مقدار حداکثری بار، رشد ترک از نوک شیار (یا ترک) در قطعه ایجاد شده و به سمت بالا حرکت می‌کند (شکل ۳-الف) و در نهایت پس از انجام تست شکست نمونه دیسکی شکل به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و همانطور که از سطح شکست نمونه‌های بتنی تست شده مشاهده می‌گردد (شکل ۳-ب)، توزیع مناسبی از افزودنی‌های ضایعاتی رپ و گرانول در داخل قطعه و لیگامنت آن وجود دارد. با استفاده از مقدار متناظر بار حداکثری برای هر نمونه (که به طرح اختلاط و درصد ترک عناصر تشکیل‌دهنده بتن سنگدانه گرانول و RAP) وابسته است، مقدار KIC هر مخلوط از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

مطابق جدول طراحی آزمایش‌های تعیین شده بر اساس متغیرهای ورودی و سطوح هر یک از آنها که از روش تاگوچی حاصل گردید (جدول ۲) تعداد ۴۸ نمونه ENDB با طرح‌های اختلاط مختلف (درصد‌های مختلف سنگدانه، گرانول لاستیک تایر و آسفالت بازیافتی) ساخته شد (۱۶ ترکیب و یا طرح اختلاط متفاوت و سه تکرار برای هر طرح اختلاط). مخلوط‌های بتن سیمانی در داخل قالب‌هایی از جنس PVC به قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۵۰ میلی‌متر ریخته شد و به روش دستی متراکم گردیدند. شیار و یا ترک اولیه نیز با قرار دادن ورق‌های بسیار نازک فلزی در یک طرف قطعات و سپس بیرون کشیدن آنها قبل از خشک شدن و گیرش کامل بتن ایجاد گردید. قطعات ساخته شده پس از ۲۸ روز نگهداری نمونه‌ها در داخل مخزن آب برای تست چقرمگی شکست آماده شدند. این قطعات در داخل دستگاه تست فشار و روی فیکسچر خمشی سه‌نقطه‌ای به دقت قرار داده شده و همگی با یک



الف



ب

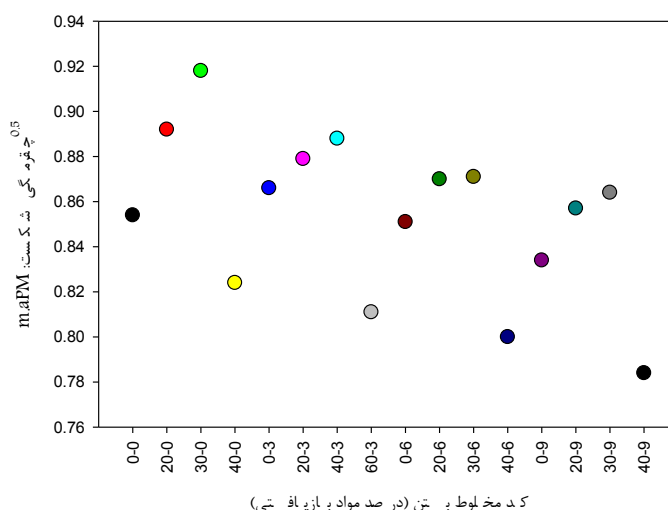
شکل ۳. الف) نمونه ENDB بتنی تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای و ب) سطح شکست نمونه‌ای از قطعات تست شده پس از انجام آزمایش چقرمگی شکست

۵. نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل داده‌ها

شکل ۴، تغییرات مقدار شاخص چقرمگی شکست (KIC) در مخلوط‌های بتن سیمانی مختلف تست شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در مقایسه با مخلوط نمونه شاهد (با کد ۰-۰) که بدون هیچ افزودنی مواد ضایعاتی و بازیافتی می‌باشد، اضافه کردن درصد‌های مختلف گرانول و RAP به عنوان مواد ضایعاتی تأثیرات متفاوتی بر عملکرد و میزان مقاومت در برابر رشد ترک بتن‌های سیمانی دارد، به طوری که برخی در صدها و ترکیب‌های حاوی مواد بازیافتی میزان مقاومت در برابر رشد ترک بتن‌های سیمانی را افزایش می‌دهند و برخی از آنها مقدار چقرمگی شکست را

کاهش می‌دهند. مقدار چقرمگی شکست مخلوط‌های بتن‌های سیمانی تست شده در محدوده 0.5 MPa.m تا 0.78 MPa.m تغییر می‌کند که این محدوده تغییرات نشانگر تأثیر نوع طرح اختلاط و عناصر تشکیل‌دهنده (و یا افزودنی‌های بازیافتی) بر عملکرد و استحکام شکست مخلوط‌های بتنی سیمانی می‌باشد. با وجود این، بر اساس این شکل، میزان تأثیر هر کدام از افزودنی‌ها و سطوح آنها (درصد افزودنی‌ها) متفاوت است. به منظور بررسی میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی و سطح آنها بر عملکرد و رفتار رشد ترک مخلوط‌های بتن سیمانی از تحلیل‌های آماری استفاده گردید.

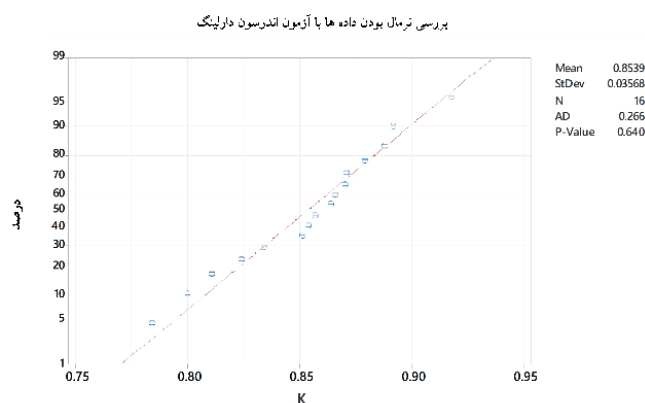
بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصدهای مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول لاستیک تایر و تراشه آسفالت ...



شکل ۴. تغییرات شاخص چقرمگی شکست برای طرح‌های اختلاط مختلف بتن تست شده در این تحقیق

این تست اگر مقدار p-value بزرگتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر مبنی بر نرمال بودن داده‌ها رد نمی‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقدار p-value برابر با ۰/۶۴ می‌باشد. بنابراین داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و تست های آماری به درستی عمل خواهند کرد.

در ابتدا قبل از تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. بررسی نرمال بودن داده‌ها قبل از اجرای آنالیز واریانس از بروز اشتباهات آماری و تفسیرهای نادرست جلوگیری می‌کند. از تست اندرسون دارلینگ در بازه اطمینان ۹۵ درصد برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. در



شکل ۵. بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون اندرسون دارلینگ اعمال شده بر نتایج آزمایشگاهی تست بتن سیمانی با افزودنی-های مختلف

۵-۱. آنالیز واریانس

در آنالیز واریانس، برای هر عامل، فرض می‌شود میانگین‌های متغیر پاسخ (تست شکست) در سطوح مختلف عامل برابر هستند و در صورتی که مقدار p-

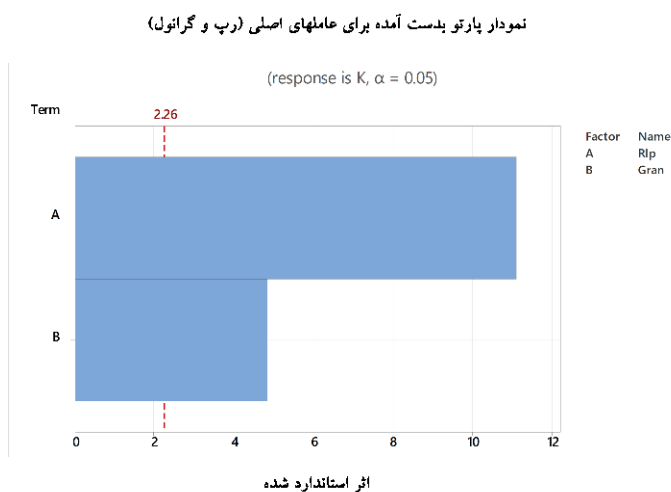
جهت بررسی اثرگذاری عامل‌های انتخابی بر خروجی تست شکست از آنالیز واریانس استفاده شد.

می‌دهد که RAP و Gran دو عامل بسیار تأثیرگذار بر نتایج تست شکست و میزان بار شکست و چقرمگی تحمل شده توسط نمونه‌ها می‌باشند. همچنین، نمودار پارتو به‌دست آمده از نتایج تحلیل (شکل ۶) نشان دهنده تأثیرگذاری عامل‌های تعیین شده بر خروجی می‌باشد. اگر چه هر دو عامل تأثیرگذار هستند، اما تأثیر افزودنی RAP بیشتر از افزودنی Gran است.

value کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر رد می‌شود. در واقع، عامل در نظر گرفته شده زمانی بر خروجی تأثیرگذار است که مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ باشد. جدول ۴، نشان‌دهنده نتایج آنالیز واریانس در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. با توجه به مقدار بسیار کم p-value، هر دو عامل انتخابی (افزودنی‌های رپ و گرانول لاستیک) بر خروجی‌ها مؤثر می‌باشند. این نشان

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس برای بررسی میزان اثرگذاری افزودنی‌های رپ و گرانول بر رفتار شکست بتن‌های سیمانی تست شده

پارامتر مورد نظر	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
RAP	۳	۰/۰۱۵۳۲۰	۰/۰۰۵۱۰۷	۷۰/۱۶	۰/۰۰۰
Gran	۳	۰/۰۰۳۱۱۸	۰/۰۰۱۰۳۹	۱۴/۲۸	۰/۰۰۱
خطا	۹	۰/۰۰۰۶۵۵	۰/۰۰۰۰۷۳		
جمع کل	۱۵	۰/۰۱۹۰۹۳			



شکل ۶. نمودار پارتو به‌دست آمده برای عامل‌های اصلی (رپ و گرانول) در بتن‌های تست شده

تأثیر سطوح مختلف عامل‌ها بر خروجی بررسی شد. نمودار اثر عامل‌های اصلی (شکل ۷) نشان می‌دهد که با افزایش درصد RAP، خروجی چقرمگی شکست

۲-۵. بررسی رفتار شکست با توجه به سطوح

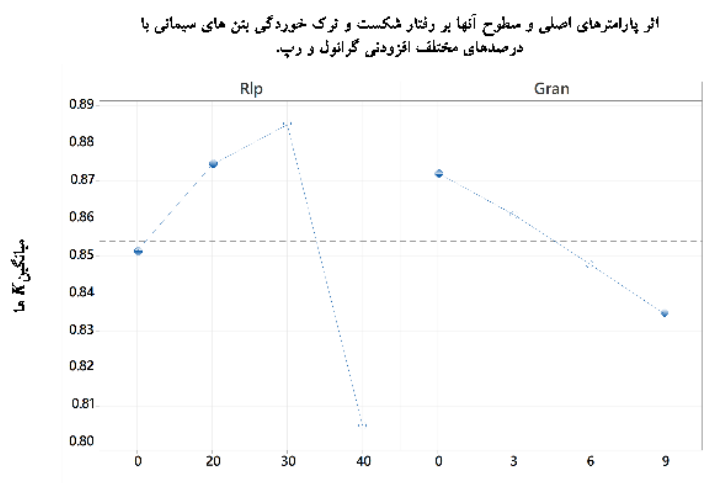
عامل‌ها

پس از بررسی تأثیرگذاری عامل‌ها، بررسی چگونگی

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد بازیافتی و ضایعاتی گرانول و تراشه آسفالت ...

دارد. بنابراین، توصیه می‌شود جهت دستیابی به بیشترین خروجی، سطح ۳۰ برای RAP و سطح صفر برای عامل Gran انتخاب شود. در بخش بعد، بررسی بیشتری برای انتخاب سطوح مناسب عامل‌ها انجام شد.

افزایش می‌یابد. اما افزایش در صد RAP از ۳۰ به ۴۰ به طور چشمگیری بر خروجی KIC تأثیر منفی خواهد داشت. همچنین، نمودار اثر سطوح عامل Gran نشان می‌دهد که افزایش این عامل تأثیر معکوس بر خروجی



شکل ۷. اثر پارامترهای اصلی و سطوح آنها بر رفتار شکست و ترک خوردگی بتن‌های سیمانی با درصد‌های مختلف افزودنی گرانول و رپ

(CI)، در صورت انتخاب سطوح صفر و ۳۰ برای عامل‌های RAP و Gran و چندین بار تکرار آزمایش، میانگین واقعی نتایج ۹۵٪ از این آزمایش‌ها در بازه (۰/۸۹۰۵۵ و ۰/۹۱۶۰۸) قرار دارد. همچنین، بازه پیش‌بینی ۲ (PI) نشان‌دهنده محدوده‌ای است که انتظار داریم یک مشاهده جدید از خروجی تست شکست در آن قرار بگیرد. در واقع، در صورت انتخاب سطوح پیشنهادی، مقدار جدید از خروجی تست شکست با ۹۵٪ احتمال در بازه (۰/۸۸۰۱۷ و ۰/۹۲۶۴۵) قرار می‌گیرد. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده است.

۳-۵. بهینه‌سازی

مطالعات زیادی در مورد روش‌های بهینه‌سازی و همچنین، اعتبارسنجی داده‌ها در سالان اخیر انجام شده است (سوری و همکاران، ۲۰۲۱؛ بووا و بوگایاتا، ۲۰۲۲؛ هوا نگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ زو و لیو، ۲۰۲۵؛ دی‌پا و همکاران، ۲۰۱۰؛ شریفی و همکاران، ۲۰۲۰؛ مطلق و نقی‌زاده رکنی، ۲۰۲۲). نتایج بهینه‌سازی این مطالعه نشان می‌دهد که برای حداکثر سازی خروجی‌ها، بهترین سطوح انتخابی صفر و ۳۰ به ترتیب برای RAP و Gran است و مقدار تخمین زده شده برای KIC تقریباً برابر با ۰.۵۰/۹۰۳ MPa.m می‌باشد. با توجه به بازه اطمینان ۱

جدول ۵. برآورد فاصله اطمینان و فاصله پیش‌بینی پس از انجام بهینه‌سازی

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
K	۰/۹۰۳۳۱	۰/۰۰۵۶۴	(۰/۹۱۶۰۸, ۰/۸۹۰۵۵)	(۰/۹۲۶۴۵, ۰/۸۸۰۱۷)

(در مجموع ۴۹ درصد حجمی کل مصالح) می‌باشد، تنها حدود ۱۰ درصد کاهش چقرمگی شکست به نسبت مخلوط شاهد مشاهده می‌گردد. این کاهش خواص مکانیکی در برابر مزایایی چون قیمت کمتر این مخلوط بتن سیمانی سبز قابل قبول و دارای توجیه اقتصادی-زیست‌محیطی می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر افزودن دو افزودنی حاصل از مواد بازیافتی صنعتی به نام‌های گرانول لاستیک تایر بازیافتی و آسفالت بازیافتی (رپ) به عنوان جایگزین جزئی از مصالح سنگی، در مقدار شاخص چقرمگی شکست که نشانگر میزان مقاومت بتن سیمانی در برابر رشد ترک می‌باشد مورد ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیل آماری قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد.

- از روش طراحی آزمایش تاگوچی، ۱۶ ترکیب (طرح اختلاط بتن سیمانی) با درصدهای متفاوتی از گرانول لاستیک تایر (در محدوده صفر تا ۹ درصد) و رپ (در محدوده صفر تا ۴۰ درصد) برای انجام آزمایش چقرمگی شکست استفاده شد.
- هر دو عامل (افزودنی رپ و گرانول لاستیک تایر) و درصد حجمی آنها، تأثیر معنی‌داری بر رفتار شکست و مقدار شاخص چقرمگی شکست داشتند، به طوری که باعث تغییر مقدار KIc در محدوده $0.5 \text{ MPa.m}^{0.5}$ تا $0.78 \text{ MPa.m}^{0.5}$ و $0.92 \text{ MPa.m}^{0.5}$ برای

مشاهده می‌شود که افزودن دانه‌های لاستیکی به طور کلی موجب کاهش مقادیر مقاومت شکست می‌شود و این کاهش با افزایش درصد حجمی مقدار گرانول لاستیک تایر باز یافتی ارتباط خطی دارد. این نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که پیوند مناسبی بین دانه‌های گرانول لاستیک و ماتریس سیمانی ایجاد نمی‌کند و ناحیه انتقال بین سطحی تولید شده ضعیف است، به طوری که دانه‌های لاستیک به عنوان فضاهای خالی عمل کرده و استحکام و مقاومت ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهند. در عوض، استفاده از افزودنی رپ حاوی قیر باعث ایجاد چسبندگی بهتر و پیوند قوی‌تر بین دانه رپ و ماتریس سیمانی می‌گردد و همچنین، انعطاف‌پذیری قیر نیز به افزایش ظرفیت بارپذیری کل مخلوط بتن کمک می‌کند. در نتیجه، طرح اختلاط حاوی تا ۳۰ درصد رپ و بدون افزودنی گرانول می‌تواند مقدار چقرمگی شکست بتن را به نسبت مخلوط شاهد و بدون افزودنی تا حدود ۷ درصد نیز افزایش دهد. از سوی دیگر، اضافه کردن همزمان و ترکیبی هر دو افزودنی در درصدهای مختلف اگرچه ممکن است باعث کاهش جزئی مقدار چقرمگی شکست مخلوط بتن سیمانی گردد اما با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی می‌تواند در کاربردهای عملی و واقعی مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، در مخلوط آسفالتی با کد ۹-۴۰ که دارای بیشترین درصد مواد ضایعاتی و بازیافتی رپ و گرانول

شرایط، مقدار چقرمگی شکست بتن سیمانی تا حدود ۸ درصد از مخلوط شاهد (بدون افزودنی) نیز بالاتر و بیشتر است.

- با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، در کاربردهای عملی و اجرایی می‌توان از بتن‌های سیمانی سبز (حاوی مواد بازیافتی و ضایعاتی رپ و گرانول) استفاده نمود چرا که طرح اختلاط حاوی بیشترین درصد حجمی افزودنی ضایعاتی (۴۹ درصد) در این تحقیق، تنها باعث کاهش حدود ۱۰ درصدی در مقدار چقرمگی شکست بتن سیمانی در مقایسه با مخلوط شاهد و بدون افزودنی می‌باشد.

مخلوط‌های مختلف بتن سیمانی حاوی مواد بازیافتی گردد.

- تحلیل‌های آماری و نتایج حاصل از ANOVA و پارتو نشان داد که مقدار چقرمگی شکست مخلوط بتن‌های سیمانی به درصد افزودنی رپ وابستگی و حساسیت بیشتری به نسبت افزودنی گرانول دارد. در حالی که اضافه نمودن گرانول باعث کم شدن مقاومت ترک‌خوردگی می‌گردد. افزودن رپ (تا ۳۰ درصد حجمی بخش مصالح) باعث بهبود عملکرد بتن سیمانی در برابر رشد ترک گردد.
- طرح اختلاط بهینه بتن سیمانی مربوط به مخلوط حاوی ۳۰ درصد رپ، صفر درصد گرانول لاستیک و ۷۰ درصد مصالح سنگی آهکی می‌باشد. در این

- Abbas-Abadi, M. S., Kusenberg, M., Shirazi, H. M., Goshayeshi, B. and Van Geem, K. M. 2022. "Towards full recyclability of end-of-life tires: Challenges and opportunities". *J. Clean. Prod.*, 374: 134036. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134036>
- Aliha, M. R. M., Sarbijan, M. J. and Bahmani, A. 2017. "Fracture toughness determination of modified HMA mixtures with two novel disc shape configurations". *Constr. Build. Mater.*, 155: 789-799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.093>
- Aliha, M. R. M., Razmi, A. and Mousavi, A. 2018. "Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen". *Constr. Build. Mater.*, 190: 612-622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.092>
- Aliha, M. R. M., Kouchaki, H. G., Mohammadi, M. H., Haghighatpour, P. J., Choupani, N., Asadi, P. and Sadowski, T. 2024. "Fracture toughness determination for epoxy-based polymer concrete mixtures: Applicability of different rectangular beam and circular disc specimens". *Compos. Part C: Open Access*, 14: 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100446>
- Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M. and Aliha, M. R. M. 2021. "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete". *Compos. Commun.*, 25: 100684. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100684>
- Ayar, P., Baradaran, S. and Abdipour Vosta, S. 2022. "A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)". *Road*, 30(110): 57-86.
- Bahmani, A., Aliha, M. R. M., Sarbijan, M. J. and Mousavi, S. S. 2020. "An extended edge-notched disc bend (ENDB) specimen for mixed-mode I+II fracture assessments". *Int. J. Solids Struct.*, 193: 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.015>
- Bakhshizadeh, M., Pirmohammad, S., Karimi, H. R. and Aliha, M. R. M. 2024. "Effect of support friction on pure mode I, II, and III fracture toughness of cement concrete tested with edge-notched disc bend specimen". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 129: 104247. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104247>
- Baradaran, S. and Ameri, M. 2023. "Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies". *Road*, 31(114): 53-70.
- Baradaran, S. and Aliha, M. R. M. 2025. "Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature". *Results Eng.*, 25: 103734. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103734>
- Baradaran, S. and Ziaee, S. A. 2025. "Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering". *Road*. Accepted.
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R. and Baradaran, S. 2023. "Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule". *Mater. Res. Exp.*, 10(5): 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A. and Underwood, B. S. 2024a. "Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature". *Constr. Build. Mater.*, 449: 138426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426>
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M. and Maleki, A. 2024b. "Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET". *Case Stud. Constr. Mater.*, 20: e02740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>
- Bazoobandi, P., Mousavi, S. R., Karimi, F., Karimi, H. R., Ghasri, M. and Aliha, M. R. M. 2024. "Cracking resistance of crumb rubber modified green asphalt mixtures, using calcium carbonate nanoparticles and two by-product wax-based warm mix additives". *Constr. Build. Mater.*, 424, 135848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135848>
- Bhuva, P. and Bhogayata, A. 2022. "A review on the application of artificial intelligence in the mix design optimization and development of self-compacting concrete". *Mater. Today: Proceed.*, 65: 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.248>
- Bidadi, J., Akbardoost, J. and Aliha, M. R. M. 2020. "Thickness effect on the mode III fracture resistance and fracture path of rock using ENDB specimens". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43(2): 277-291. <https://doi.org/10.1111/ffe.13124>
- Chen, L., Chen, Z., Xie, Z., Wei, L., Hua, J., Huang, L. and Yap, P. S. 2023. "Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities". *Develop. Built Environ.*, 16: 100255. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100255>
- Cywinski, Z. 2001. "Current philosophy of sustainability in civil engineering". *J. Prof. Issues Eng. Educ. Practice*, 127(1): 12-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1052-3928\(2001\)127%3A1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1052-3928(2001)127%3A1(12))

- Dao, D. V., Nguyen, N. L., Ly, H. B., Pham, B. T. and Le, T. T. 2020. "Cost-effective approaches based on machine learning to predict dynamic modulus of warm mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement". *Mater.*, 13(15): 3272. <https://doi.org/10.3390/ma13153272>
- Debbarma, S., Selvam, M. and Singh, S. 2020. "Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements? A critical review". *Constr. Build. Mater.*, 259: 120417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120417>
- Deepa, C., Sathiyakumari, K. and Sudha, V. P. 2010. "Prediction of the compressive strength of high-performance concrete mix using tree-based modeling". *Int. J. Comput. Appl.*, 6(5): 18-24. <https://doi.org/10.5120/1083-1415>
- Delwar, M., Fahmy, M. and Taha, R. 1997. "Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete". *Mater. J.*, 94(3): 251-256.
- Ding, Y., Yang, Y., Liu, R., Xiao, T. and Tian, J. 2019. "Study on pressure sensitivity of smart polymer concrete based on steel slag". *Measurement*, 140: 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.058>
- Erarslan, N. 2019. "Analysing mixed mode (I-II) fracturing of concrete discs including chevron and straight-through notch cracks". *Int. J. Solids Struct.*, 167: 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.03.005>
- Erarslan, N. 2023. "Investigation of the tensile-shear failure of asphalt concrete base (ACB) construction materials using a non-linear cohesive crack model and critical crack threshold analysis. *Constr. Build. Mater.*, 364: 129901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129901>
- Erarslan, N. and Williams, D. J. 2012. "The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks". *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 56: 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2012.07.015>
- Erarslan, N. and Aliha, M. R. M. 2025. "Fracture and damage analysis of cement-stabilized fine and coarse grain soils under static and cyclic loading using chevron-notched SCB specimen. *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* <https://doi.org/10.1111/ffe.14598>
- Erarslan, N., Obligado, R., Li, Z. and Ghamgosar, M. 2015. "Experimental and numerical investigations on mixed mode fracturing of concrete and rocks by using semi-circular disc (SCD) and disc specimens". In: *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2015). ARMA.
- Fakhri, M., Amosoltani, E. and Aliha, M. R. M. 2017. "Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber". *Eng. Fract. Mech.*, 180: 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.011>
- Gencel, O., Erdugmus, E., Sutcu, M. and Oren, O. H. 2020. "Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks". *Constr. Build. Mater.*, 255: 119362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
- Golewski, G. L. 2019. "Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash thanks to use of Digital Image Correlation (DIC) method". *Measurement*, 135: 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.039>
- Golewski, G. L. 2021. "Evaluation of fracture processes under shear with the use of DIC technique in fly ash concrete and accurate measurement of crack path lengths with the use of a new crack tip tracking method". *Measurement*, 181: 109632. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109632>
- Gou, Y., Zhang, L., Liu, C., Zhang, H., Wei, C. and Cai, X. B. 2021. "Investigation of freeze-thaw mechanism for crumb rubber concrete by the online strain sensor". *Measurement*, 174: 109080. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109080>
- Gravina, R. J., Xie, T., Giustozzi, F., Zhao, X. and Visintin, P. 2021. "Assessment of the variability and uncertainty of using post-consumer plastics as natural aggregate replacement in concrete". *Constr. Build. Mater.*, 273: 121747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121747>
- Gupta, T., Patel, K. A., Siddique, S., Sharma, R. K. and Chaudhary, S. 2019. "Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN". *Measurement*, 147: 106870. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106870>
- Haghighatpour, P. J. and Aliha, M. R. M. 2023. "The influence of recycled asphalt pavement materials on low and intermediate fracture behavior of asphalt concrete (AC) after exposing to different thawing and freezing periods". *Eng. Fract. Mech.*, 293: 109715. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109715>
- Hanein, T., Hayashi, Y., Utton, C., Nyberg, M., Martinez, J. C. and Quintero-Mora, N. I. 2020. "Pyro processing cement kiln bypass dust: Enhancing clinker phase formation". *Constr. Build. Mater.*, 259: 120420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120420>
- He, J., Liu, L., Yang, H. and Aliha, M. R. M. 2022. "Using two and three-parameter Weibull statistical model for predicting the loading rate effect on low-temperature fracture toughness of asphalt concrete with the ENDB specimen". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 121: 103471. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103471>

- Huang, Y., Zhang, J., Ann, F. T. and Ma, G. 2020. "Intelligent mixture design of steel fibre reinforced concrete using a support vector regression and firefly algorithm based multi-objective optimization model". *Constr. Build. Mater.*, 260: 120457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120457>
- Issa, C. A. and Salem, G. 2013. "Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design". *Constr. Build. Mater.*, 42: 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>
- Karamzadeh, N. S., Aliha, M. R. M. and Karimi, H. R. 2022. "Investigation of the effect of components on tensile strength and mode-I fracture toughness of polymer concrete". *Arab. J. Geosci.*, 15(13): 1213. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10450-8>
- Karimi, H. R., Ebneabbasi, P., Shahni Karamzadeh, N. and Khedri, E. 2022. "Effect of water to cement (W/C) ratio and age on mechanical behavior of tire-recycled steel fiber reinforced concrete". *Struct. Concrete*, 24(2): 2460-2474. <https://doi.org/10.1002/suco.202200007>
- Khan, E. U., Khushnood, R. A. and Baloch, W. L. 2020. "Spalling sensitivity and mechanical response of an ecofriendly sawdust high strength concrete at elevated temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 258: 119656. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119656>
- Khater, H. M. 2019. "Hybrid slag geopolymer composites with durable characteristics activated by cement kiln dust". *Constr. Build. Mater.*, 228: 116708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116708>
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Buttlar, W. G. and Alavi, A. H. 2019. "New machine learning-based prediction models for fracture energy of asphalt mixtures". *Measurement*, 135: 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.081>
- Mo, J., Zeng, L., Liu, Y., Ma, L., Liu, C. and Xiang, S. 2020. "Mechanical properties and damping capacity of polypropylene fiber reinforced concrete modified by rubber powder". *Constr. Build. Mater.*, 242: 118111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118111>
- Moradi, M. J., Khaleghi, M., Salimi, J., Farhangi, V. and Ramezaniannpour, A. M. 2021. "Predicting the compressive strength of concrete containing metakaolin with different properties using ANN". *Measurement*, 183: 109790. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109790>
- Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M. and Amiri, H. R. 2020. "Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen". *Constr. Build. Mater.*, 234: 117365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117365>
- Motlagh, S. A. T. and Naghizadehrokni, M. 2022. "An extended multi-model regression approach for compressive strength prediction and optimization of a concrete mixture". *Constr. Build. Mater.*, 327: 126828. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126828>
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A. and Aliha, M. R. M. 2020. "Low temperature fracture resistance of cement emulsified asphalt mortar under mixed mode I/III loading". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 110: 102800. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102800>
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A. and Aliha, M. R. M. 2022a. "Aging effect on the mixed-mode (I/III) fracture toughness of cement emulsified asphalt composite: Experimental and statistical investigation". *Eng. Fract. Mech.*, 264: 108292. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108292>
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A. and Aliha, M. R. M. 2022b. "Experimental and statistical exploring for mixed-mode (I&II) fracture behavior of cement emulsified asphalt mortar under freeze-thaw cycles and aging condition". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 122: 103643. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103643>
- Nili, M., Ramezaniannpour, A. A. and Sobhani, J. 2021. "Evaluation of the effects of silica fume and air-entrainment on deicer salt scaling resistance of concrete pavements: Microstructural study and modeling". *Constr. Build. Mater.*, 308: 124972. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124972>
- Rahal, K. N. and Hassan, W. 2021. "Shear strength of plain concrete made of recycled low-strength concrete aggregates and natural aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 311: 125317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125317>
- Rajaei, A., Davarpanah, Amirhosein, Pournoori, P. and Yousefi, M. 2023. "Influence of different types of fiber on fracture strength of asphalt mixtures using SCB specimens". In: 5th International Congress on Civil, Architecture and Urbanism in Asia, Bangkok, Thailand.
- Rajaei, A., Talebi, N. and Abrishami, S. 2025. "The impacts of freeze-thaw cycles on polypropylene fiber-reinforced clayey soil stabilized with alkali-activated fly ash". *Case Stud. Constr. Mater.*, 22: e04439. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04439>
- Richardson, A. E., Coventry, K. A. and Ward, G. 2012. "Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content". *J. Clean. Prod.*, 23(1): 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.013>
- Ruengsillapanun, K., Udtaranakron, T., Pulngern, T., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2021. "Mechanical properties, shrinkage, and heat evolution of alkali activated fly ash concrete". *Constr. Build. Mater.*, 299: 123954. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123954>

- Sahan, M. F. and Unsal, I. 2023. "An experimental analysis for impact behavior of Portland cement concrete substituted with reclaimed asphalt pavement aggregate". *Iran. J. Sci. Tech., Trans. Civ. Eng.*, 47(4): 2113-2130. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01053-5>
- Saloni, A., Parveen, J., Lim, Y. Y. and Pham, T. M. 2021. "Influence of Portland cement on performance of fine rice husk ash geopolymer concrete: Strength and permeability properties". *Constr. Build. Mater.*, 300: 124321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124321>
- Serelis, E., Vaitkevicius, V., Hilbig, H., Irbe, L. and Rudzionis, Z. 2021. "Effect of ultra-sonic dispersion time on hydration process and microstructure development of ultra-high performance glass powder concrete". *Constr. Build. Mater.*, 298: 123856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123856>
- Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M. and Moniri, A. 2020. "Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method". *Constr. Build. Mater.*, 236: 117547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117547>
- Shojamoghadam, S., Rajaei, A. and Abrishami, S. 2024. "Impact of various additives and their combinations on the consolidation characteristics of clayey soil". *Sci. Reports*, 14(1): 31907. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-31907-2>
- Skarżyński, Ł. and Tejchman, J. 2021. "Investigations on fracture in reinforced concrete beams in 3-point bending using continuous micro-CT scanning". *Constr. Build. Mater.*, 284: 122796. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122796>
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Phunpeng, V., Panpipat, P., Chaidachatorn, K., Kroehong, W. and Somna, R. 2024. "Concrete mix design: Optimizing recycled asphalt pavement in Portland cement concrete". *Constr. Build. Mater.*, 455: 139180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139180>
- Sumarac, D., Sekulovic, M. and Krajcinovic, D. 2003. "Fracture of reinforced concrete beams subjected to three-point bending". *Int. J. Damage Mech.*, 12(1): 31-44. <https://doi.org/10.1177/1056789503012001002>
- Sun, X., Gao, Z., Cao, P., Zhou, C., Ling, Y., Wang, X. and Diao, M. 2019. "Fracture performance and numerical simulation of basalt fiber concrete using three-point bending test on notched beam". *Constr. Build. Mater.*, 225: 788-800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.135>
- Suri, R. S., Dubey, V., Kapoor, N. R., Kumar, A. and Bhushan, M. 2021. "Optimizing the compressive strength of concrete with altered compositions using hybrid PSO-ANN". In *International Conference on Information Systems and Management Science* (pp. 163-173. Springer Int. Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86290-9_13
- Tareghian, B., Baradaran, M. S. and Akhtarpour, A. 2024. "The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil". *Discover Geosci.*, 2(1): 11. <https://doi.org/10.1007/s44188-024-00011-8>
- Thomas, B. S. and Chandra Gupta, R. 2016. "Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber". *J. Clean. Prod.*, 113: 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
- Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M. and Baradaran, M. S. 2024. "Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement". *Transport. Infrastruct. Geotech.*, 11(3): 1008-1031. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00291-6>
- Yoo, D. Y. and Banthia, N. 2016. "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review". *Cement Concrete Compos.*, 73: 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
- Záleská, M., Pavlíková, M., Pokorný, J., Jankovský, O., Pavlík, Z. and Černý, R. 2018. "Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics". *Constr. Build. Mater.*, 180: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250>
- Zhang, M., Cheng, W. and Wang, Y. 2018. "Multiple-fault classification for hot-mix asphalt production by machine learning". *J. Constr. Eng. Manag.*, 144(5): 04018024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001478](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001478)
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J. and Sun, B. 2020. "Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete". *Constr. Build. Mater.*, 241: 117980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>
- Zuo, S. and Liu, B. 2025. "Optimization design of concrete mix proportion based on support vector machine regression and enhanced genetic algorithm". *Discover Appl. Sci.*, 7(3): 200. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06012-8>