



Semnan University



Research Article

## Experimental and Numerical Evaluation of Fracture Characteristics of Stabilized Cement Base Containing Reclaimed Asphalt Pavement

Mansoorzadeh, S.M.<sup>a</sup> , Mahjoob, A.<sup>a\*</sup> , Rooholamini, H.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Assistant Professor, Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, I.R. Iran.

<sup>b</sup> Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar Abbas, I.R. Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 2024-08-18

Revised: 2024-09-17

Accepted: 2024-09-21

#### Keywords:

Cement treated base;  
Fracture mechanic; Edge  
notched disk beam;  
Statistical analysis.

### ABSTRACT

The stabilization of the foundational layer utilizing cement facilitates the formation of a robust stratum that supports the upper layer of the pavement. Nevertheless, to accurately ascertain the precise properties of this composite material under various loading scenarios, it is imperative to establish a dependable and accessible methodology for assessing the failure characteristics. Consequently, the investigation undertaken in this study has introduced a loading configuration referred to as the grooved bending disc (ENDB), which has been scrutinized and implemented within the domain of fracture mechanics pertaining to cement-stabilized base layers. In this inquiry, stress intensity factors were derived from the principles of linear elastic fracture mechanics, employing three-dimensional analysis and the ABAQUS software across diverse loading conditions and geometric parameters. Furthermore, to derive stress intensity factors without resorting to numerical methodologies, the outcomes procured in the preceding phase were integrated into a comprehensive model utilizing machine learning techniques, specifically through the application of artificial neural networks. The cement base formulation utilized for experimental purposes is of the Portland cement variety, augmented with an inorganic polymer additive to enhance performance characteristics. To assess the fracture toughness, three distinct failure modes were examined, including pure mode I, pure mode II, and pure mode III, each subjected to four repetitions. Based on the findings, the ENDB configuration proposed in this study has been demonstrated to serve as a credible method for evaluating the fracture characteristics of cement-stabilized base mixtures. The incorporation of inorganic polymer enhances fracture resistance across various modes by 8%. The statistical evaluation of residual life indicates that a transition in the loading mode from tensile opening (mode I) to in-plane shear (mode II) results in a substantial decrease in the likelihood of failure. In contrast, the probability of failure in the out-of-plane shear mode (mode III) is considerably elevated relative to the tensile opening (mode I).

\* Corresponding author.

E-mail address: [a.mahjoob@bhrc.ac.ir](mailto:a.mahjoob@bhrc.ac.ir)

**How to cite this article:** Mahjoob, A., mansoorzadeh, S. M., & Rooholamini, H. (2024). Experimental and Numerical Evaluation of Fracture Characteristics of Stabilized Cement Base Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(2), 97-120.  
doi: [10.22075/jtie.2024.35055.1684](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35055.1684)



Semnan University

## مجله زیرساخت‌های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

### ارزیابی آزمایشگاهی و عددی مشخصات شکست اساس تثبیت شده سیمانی حاوی خرده مصالح آسفالتی

سید محمد منصورزاده<sup>۱</sup>، امیر محبوب<sup>۱\*</sup>، حامد روح الامینی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

#### چکیده

تثبیت لایه اساس با سیمان منجر به ایجاد یک لایه مقاوم جهت کمک به لایه رویه روسازی می‌گردد. با این وجود، جهت دستیابی به مشخصات دقیق این مخلوط در شرایط مختلف بارگذاری، نیاز به یک روش مطمئن و در دسترس جهت ارزیابی مشخصات شکست است. از اینرو، تحقیق صورت پذیرفته با پیشنهاد یک هندسه بارگذاری تحت عنوان دیسک خمشی شیاردار (ENDB) اقدام به تحلیل و بکارگیری آن در زمینه مکانیک شکست لایه‌های اساس سیمانی تثبیت شده نموده است. در این تحقیق، از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی بصورت تحلیل سه بعدی و با استفاده از نرم افزار ABAQUS در شرایط مختلف بارگذاری و ابعاد مختلف هندسی، ضرایب شدت تنش استخراج گردید. همچنین به منظور دستیابی به ضرایب شدت تنش بدون نیاز به استفاده از تحلیل عددی، نتایج حاصله در مرحله قبلی با استفاده از روش یادگیری ماشین (بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی) بصورت یک مدل جامع ساخته شد. مخلوط اساس سیمانی مد نظر جهت آزمایش از نوع سیمان پرتلند بوده که از افزودنی ماده پلیمری معدنی جهت بهبود عملکرد استفاده شد. به جهت ارزیابی چقرمگی شکست سه حالت مختلف شکست شامل مود خالص I، مود خالص II و مود خالص III با چهار بار تکرار آزمایش شد. مطابق با نتایج بدست آمده هندسه ENDB پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک روش اطمینان بخش در جهت ارزیابی مشخصات شکست مخلوط‌های اساس تثبیت شده سیمانی استفاده گردد. استفاده از پلیمر معدنی باعث افزایش مقاومت شکست در مودهای مختلف به میزان ۸٪ می‌گردد. تحلیل آماری عمر باقی مانده نشان می‌دهد که تغییر مود بارگذاری از حالت بازشدگی کششی (مود I) به برش درون صفحه (مود II) منجر به کاهش قابل توجه احتمال خرابی می‌شود. این در حالی است که احتمال شکست در مود برش بیرون صفحه (مود III) به مراتب نسبت به بازشدگی کششی (مود I) بیشتر است.

#### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

واژگان کلیدی:

اساس تثبیت شده سیمانی،

مکانیک شکست،

نمونه دیسک شکل شیاردار،

تحلیل آماری.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [a.mahjoob@bhrc.ac.ir](mailto:a.mahjoob@bhrc.ac.ir)

استناد به این مقاله: محبوب، امیر، منصورزاده، سید محمد & روح الامینی، حامد. (۱۴۰۳). ارزیابی آزمایشگاهی و عددی مشخصات شکست اساس تثبیت شده سیمانی حاوی خرده مصالح آسفالتی. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۰ (۲)، ۹۷-۱۲۰.

doi: 10.22075/jtie.2024.35055.1684

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

## ۱. مقدمه

همکاران در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر RAP در کیفیت لایه‌های اساس و زیراساس پرداختند. درصد RAP مورد استفاده در مطالعه آنها از صفر تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. این پژوهشگران دریافتند که با افزایش RAP در مخلوط‌های اساس و زیراساس تثبیت شده، چگالی خشک مخلوط به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی میزان CBR دریافتند که در لایه زیر اساس با افزایش ۱۰۰ درصدی RAP به عنوان سنگدانه‌های این لایه، باز هم حداقل CBR مورد نیاز قابل تأمین است. اما این مقدار برای لایه اساس به ۱۰ درصد RAP برای نیل به CBR حدود ۸۰ درصدی محدود گردید (Taha et al., 2002). از منظر اقتصادی، هزینه لایه اساس حاوی RAP به طور چشمگیری کاهش یافته و همچنین این لایه از نفوذپذیری بیشتری نسبت به لایه اساس متداول بدون RAP برخوردار خواهد بود (Trzebiatowski & Benson, 2005).

غنی زاده و همکاران (۲۰۱۸) با انجام مطالعه آزمایشگاهی در خصوص احیاء تمام عمق روسازی؛ با تهیه نمونه‌های مختلف با درصد‌های مختلف RAP و مصالح دانه‌ای GW-GC و تثبیت کننده سیمان و با انجام آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های تهیه شده گزارش کردند که با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد (Ghanizadeh et al., 2018). در مطالعه تجربی دیگری، با تهیه و آزمایش بر روی نمونه‌های CTB حاوی ۱۰٪ مصالح RAP و سیمان و یک افزودنی شیمیایی، به ارزیابی فناوری احیای تمام عمق FDR پرداخته شد. در این مطالعه آزمایشگاهی به منظور شناسایی اثر محتوای سیمان و تثبیت کننده شیمیایی، خواص مهندسی مختلف مخلوط CTB مورد ارزیابی قرار گرفت و در این راستا چهار محتوای سیمان ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ درصد و پنج

امروزه استفاده از خرده مصالح آسفالتی (RAP) در لایه‌های روسازی اعم از لایه زیراساس، اساس و لایه آسفالتی بدلیل مقبولیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی شتاب روزافزونی به خود گرفته است. برای تأمین مقاومت مورد نیاز لایه اساس روسازی حاوی RAP و برآورده شدن دیگر الزامات فنی و عملکردی، لازم است که مصالح RAP با افزودنی سیمان یا دیگر مصالح تثبیت کننده سستی یا نوین تثبیت شوند. در گذشته پژوهشگران متعددی در مورد بهبود عملکرد لایه‌های روسازی با استفاده از مصالح RAP با مخلوط کردن آن با سنگدانه‌های بکر<sup>۲</sup> و یا با استفاده از تثبیت کننده‌های شیمیایی مانند آهک، سیمان و خاکستر بادی مطالعه نموده‌اند. این مطالعات توصیه می‌کنند که مخلوط RAP و سنگدانه بکر با استفاده از مواد افزودنی سیمانی به راحتی در اساس روسازی قابل استفاده می‌باشد. آدرسی و همکاران با ساخت نمونه‌هایی حاوی RAP و سیمان و انجام آزمایش تراکم، نتیجه گرفتند که دلیل افزایش رطوبت بهینه، زبری سطح مصالح دانه‌های RAP در مخلوط و دلیل کاهش حداکثر چگالی خشک، چگالی کم قیر نسبت به مصالح سنگی است (Adresi et al., 2019). چیرانجیوی و همکاران در هند، تلاش کردند تا از مصالح بتن بازیافتی (RCA) به دست آمده از ضایعات ساخت و ساز و تخریب، در لایه اساس تثبیت شده سیمانی استفاده کنند. کارایی RCA در سطوح مختلف جایگزینی از ۰٪ تا ۱۰۰٪ با تثبیت سیمان ۳٪، ۵٪ و ۷٪ بررسی شد. مشخصات مقاومتی مانند مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت خمشی و دوام مورد ارزیابی قرار گرفت. آنها نتیجه گرفتند که بالاترین پتانسیل RCA را تا ۵۰٪ با محتوای سیمان ۵٪، مطابق با معیارهای کنگره جاده هند می‌توانند در لایه CBT استفاده کنند (Chiranjeevi et al., 2023). طاها و

<sup>3</sup> pavement bases

<sup>4</sup> Full Depth Reclamation (FDR)

<sup>1</sup> Reclaimed Asphalt pavement

<sup>2</sup> virgin aggregate

نمونه آزمایشی اخیراً با روشی به نام دیسک فشرده قطری شیاردار (ENDC) برای مطالعات چقرمگی شکست در مود ترکیبی I/III ارزیابی شده است. این نمونه از هندسه ساده بهره می‌برد و به پیکربندی آزمایشی پیچیده نیاز ندارد. تجزیه و تحلیل اجزای محدود این نمونه نشان داد که مودهای خالص I و III، و همچنین تغییر شکل‌های مختلف مود ترکیبی I/III، با تغییر جهت ترک لبه نسبت به بار فشاری قطری اعمال‌شده به راحتی به دست می‌آیند. شدت تنش و ضرایب شکل مودهای I و III به صورت عددی در قسمت میانی نمونه ENDC با استفاده از چندین تحلیل المان محدود سه بعدی برای عمق‌های مختلف ترک و زوایای انحراف مختلف محاسبه شد. زاویه ترک مود خالص III نیز برای هر نسبت عمق ترک به دست آمد. این ارزیابی‌ها نشان داد که نمونه ENDC می‌تواند گزینه مناسبی برای مطالعه چقرمگی شکست در مود ترکیبی I/III باشد (Aliha & Aliha et al., 2015; Aliha et al., 2015; Fattahi Amirdehi, 2017; Ayatollahi et al., 2011). استفاده از یک نمونه آزمایشی ساده و مناسب به نام نمونه خمش دیسک با شیارد لبه (ENDB)، بررسی اثر درصدهای مختلف الیاف بر چقرمگی شکست مخلوط بتنی، به صورت تجربی در هر دو مود خالص I و مود خالص III مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج این تحقیق حاکی از رفتار شکست نمونه‌های ENDB ساخته‌شده از کامپوزیت‌های بتن است که این رفتار به نوع حالت بارگذاری یعنی مود I یا III و همچنین میزان افزودنی بستگی دارد (Aliha et al., 2015; Fakhri et al., 2017). علیها و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار شکست بتن حاوی الیاف مصنوعی در مود I و مود III پرداختند. با آزمایش کردن نمونه‌های ENDB، تاثیر میزان الیاف با درصدهای مختلف بر میزان چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که شروع و مراحل رشد ترک متأثر از میزان الیاف به‌کاررفته می‌باشد. براساس

محتوای افزودنی شیمیایی ۰، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ درصد وزنی سیمان برای ساخت نمونه‌ها اعمال شد. براساس داده‌های آزمایش، مشخص شد که مخلوط تهیه شده با ۴/۵ درصد سیمان و ۴ درصد تثبیت کننده شیمیایی بهترین نتیجه را از نظر پارامترهای مقاومتی و خواص دوام نمونه‌های مورد مطالعه دارا هستند. نتایج نشان دادند که بازیافت ۱۰۰٪ مصالح RAP در روش FDR یک راه حل مناسب است و حدود ۴۵٪ کاهش هزینه را در پی دارد (Chhabra & Ransinchung Rongmei Naga, 2023).

سیمان متداول‌ترین افزودنی تثبیت کننده است. استفاده از آن در سراسر جهان بسیار فراتر از تمامی افزودنی‌های تثبیت کننده دیگر است. دلایل اصلی این امر هزینه و در دسترس بودن است. سیمان در اکثر کشورهای جهان تولید می‌شود و نسبتاً ارزان است. دلیل دیگر سابقه اثبات شده آن به عنوان یک مصالح ساختمانی است. استانداردها، روش‌های آزمایش و مشخصات فراوانی در زمینه تثبیت با سیمان وجود دارد و لایه‌های تثبیت شده با سیمان، عملکرد عالی را در هزاران کیلومتر جاده ارائه کرده‌اند. با این حال، تثبیت سیمان به یک رویکرد طراحی مناسب نیاز دارد. عملکرد اصلی افزودن سیمان افزایش مقاومت است و مقاومت فشاری محدود نشده<sup>۱</sup> (UCS) به عنوان معیار اصلی طراحی، به پذیرش جهانی دست یافته است. با این وجود، عوامل متعددی غیر از UCS نیز باید در نظر گرفته شوند، مانند نرخ افزایش استحکام، مقاومت کششی غیرمستقیم<sup>۲</sup> (ITS)، پتانسیل ترک خوردگی و مکانیک شکست.

مطالعات صورت پذیرفته بر روی شکست با حالت ترکیبی مود I/II متمرکز شده‌اند و مقالات بسیار محدودی برای بررسی پاسخ اعضای مرکب بتن ترک خورده تحت مود خالص III یا مود ترکیبی داخل/خارج بارگذاری صفحه‌ای وجود دارد (Aliha & Saghafi, 2013). یک

<sup>۲</sup>Indirect Tensile Strength<sup>۱</sup>Unconfined Compressive Strength

آنچه از تحقیقات صورت گرفته بالا می‌توان جمع-بندی نمود جایگاه ویژه‌ای است که نوع هندسه و بارگذاری نمونه‌های مورد استفاده جهت ارزیابی مشخصات شکست در مخلوط‌های بتنی دارد. همچنین مرور منابع در زمینه آزمایشات انجام شده در ملات‌های سیمانی حاکی از عدم ارزیابی مود پارگی در این نوع از ترکیبات می‌باشد. در این پژوهش هدف اصلی ارائه یک هندسه مناسب و کاربردی جهت ارزیابی مشخصات شکست در مود پارگی در خاک‌های تثبیت شده سیمانی با ارزیابی تحلیل عددی و آزمایشگاهی است. روندنمای مربوط به تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.

## ۲. مواد و مصالح

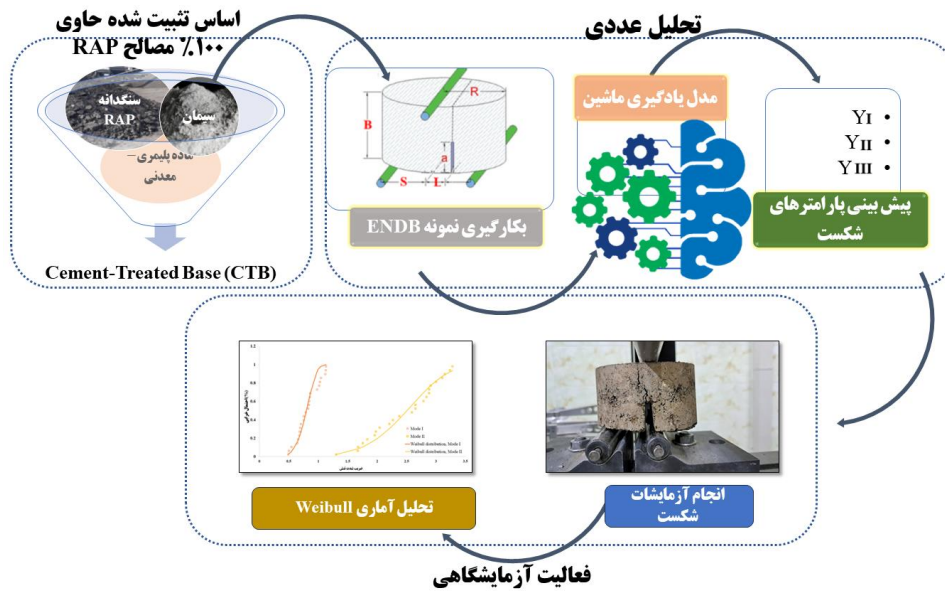
### ۱-۲. سیمان

در این تحقیق، سیمان مصرفی از نوع تیپ ۱ پرتلند کارخانه آبیگ مطابق استاندارد ASTM C150 استفاده گردید. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مذکور در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۲. تراشه آسفالتی

تراشه‌های آسفالتی استفاده شده در این پژوهش از آسفالت تراشیده شده از معابر شهر تهران توسط شرکت توزینگر تهیه شدند. به منظور تعیین مشخصات تراشه‌های آسفالتی، دستورالعمل‌های ASTM D2172 و ASTM D5444 به ترتیب برای تعیین درصد قیر تراشه‌ها و تعیین دانه‌بندی آنها استفاده شد. براساس نتایج این آزمایش‌ها، درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی ۴/۵۰ درصد تعیین و دانه‌بندی آن در شکل ۲ ارائه شده است.

نتایج آزمایشگاهی، تاثیر الیاف مصنوعی بر چقرمگی شکست در مود III بارگذاری به طور قابل توجهی بزرگتر از مود I بارگذاری بود و در هر دو مود بارگذاری بیشترین مقدار K در حالتی که ۳٪ الیاف به کاررفته بود، مشاهده گردید. بهمنی و همکاران در سال ۲۰۲۰ مود ترکیبی I/III را برای نمونه‌های ENDB مورد بررسی قرار دادند. چقرمگی شکست دو نمونه‌ی ENDC و ENDB هم به صورت عددی و هم به صورت آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. هرچند که وضعیت هندسی دو نمونه مشابه است اما تفاوت در نوع بارگذاری (که خمشی و فشاری است) بر مود ترکیبی I/III تاثیر گذار بوده است. یک ترک با عمق و زاویه انحراف بهینه در نمونه ENDB با یک گستره چقرمگی در مود ترکیبی I/III با توجه به تاثیر بارگذاری و وضعیت هندسی قابل اندازه‌گیری است. در حالی که این مهم در نمونه ENDC، طول ترک بهینه فقط در مود III بارگذاری وجود داشته است. بارهای مرتبط با شکست و نیز زوایای شروع شکست برای هر دو نمونه بدست آمد (Bahmani et al., 2020). در سال ۲۰۲۴، لیو و همکاران از نمونه‌های دیسک خمشی شیاردار لبه (ENDB) و نمونه‌های فشرده‌شده قطری شیاردار (ENDC) برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی و شکست مواد دو-ماده‌ای سنگ‌مانند در حالت خالص I، III، و حالت ترکیبی I/III استفاده کردند. به طور کلی، آنها نتیجه گرفتند نمونه‌های ENDB ویژگی‌های شکست کششی/پیچشی بارزتری نسبت به نمونه‌های ENDC نشان می‌دهند و توصیه کردند که در آزمایش چقرمگی شکست حالت I/III برای مواد سنگ‌مانند دو-ماده از این هندسه استفاده شود. (Liu et al., 2024)



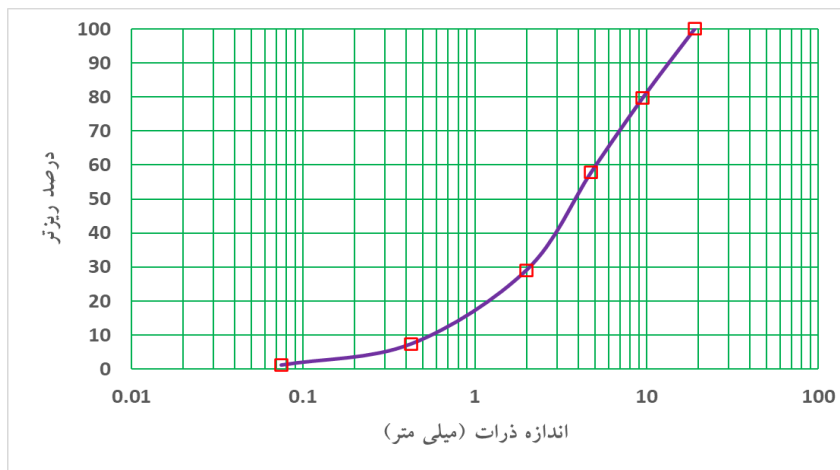
شکل ۱. روندنمای مطالعه

جدول ۱. مشخصات سیمان مصرفی (تیپ یک پرتلند)

| محدوده مجاز طبق استاندارد ملی - ۳۸۹ | مقدار (%) | آنالیز شیمیایی                                     |                  |
|-------------------------------------|-----------|--|------------------|
| -                                   | ۱۹/۹۸     | Silicon Dioxide ( SiO <sub>2</sub> )               | اکسید سیلیسیم    |
| -                                   | ۳/۵       | Aluminium Oxide ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | اکسید آلومینیوم  |
| -                                   | ۴/۱۱      | Ferric Oxide ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | اکسید آهن        |
| -                                   | ۶۴/۷۳     | Calcium Oxide ( CaO )                              | اکسید کلسیم      |
| حداکثر ۵                            | ۲/۰۷      | Magnesium Oxide (MgO )                             | اکسید منیزیم     |
| حداکثر ۳                            | ۳/۷۹      | Sulfur TriOxide (SO <sub>3</sub> )                 | سولفور تری اکسید |
| -                                   | ۰/۱۵      | Sodium Oxide ( Na <sub>2</sub> O )                 | اکسید سدیم       |
| -                                   | ۰/۶۳      | Potassium Oxide ( K <sub>2</sub> O )               | اکسید پتاسیم     |
| -                                   |           | Chloride (Cl )                                     | کلر              |
| حداکثر ۳                            | ۰/۳۵      | Loss on Ignition ( LOI )                           | افت حرارتی       |
| -                                   | ۵۸/۸      | Tricalcium-silicate (C3S )                         | سه کلسیم سیلیکات |
| -                                   | ۱۹/۸۹     | Dicalcium-silicate                                 | دو کلسیم         |

ارزیابی آزمایشگاهی و عددی مشخصات شکست اساس تثبیت شده سیمانی حاوی خرده مصالح آسفالتی

|                          |       |  |                          |
|--------------------------|-------|--|--------------------------|
|                          |       | (C2S)                                      | سیلیکات                  |
| -                        | ۸/۶۵  | Tricalcium-aluminate (C3A)                 | سه کلسیم آلومینات        |
| -                        | ۱۰/۶۵ | Tetracalcium-aluminoferrite(C4AF)          | چهار کلسیم آلومینم فریت  |
| محدوده مجاز              | مقدار | آنالیز فیزیکی                              |                          |
| حداقل ۲۸۰۰               | ۳۴۰۰  | Fineness (Blaine Test, gr)/cm <sup>2</sup> | سطح مخصوص                |
| ۱۲                       | ۲۲/۳  | ۳ روزه                                     | مقاومت فشاری (مگاپاسکال) |
| ۲۰                       | ۲۵/۶  | ۷ روزه                                     |                          |
| حداقل ۳۲/۵ - حداکثر ۵۲/۵ | ۳۵/۱  | ۲۸ روزه                                    |                          |



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح تراشه آسفالت

موجود در این سنگدانه‌ها حدود ۱۰٪ می‌باشد. از این رو، جنس و ترکیبات مصالح سنگی، با یکدیگر همسان بوده و نتایج را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. این نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج آزمایش XRF بر روی مصالح RAP به دست آمده از تراشه آسفالتی نشان داد که عنصر غالب موجود در سنگدانه‌های معدنی و سنگدانه‌های به دست آمده از تراشه آسفالتی، سیلیس می‌باشد. همچنین ذرات آلی

جدول ۲. نتایج آزمایش XRF بر روی مصالح RAP

| میزان عناصر (درصد) | محتویات   |
|--------------------|---|
| ۱۰/۲               | درصد افت وزنی در حرارت ۹۵۰ درجه سانتیگراد (L.O.I) |
| ۲/۰۱۶              | سدیم اکسید (Na <sub>2</sub> O)                    |
| ۳/۲۵۳              | اکسید منیزیم (MgO)                                |
| ۷/۳۵۹              | آلومینیوم اکسید (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |

| میزان عناصر<br>(درصد) | محتویات                                     |
|-----------------------|---|
| ۵۱/۵۱۸                | سیلیسیم دی اکسید (SiO <sub>2</sub> )        |
| ۲/۸۸۸                 | پتاسیم اکساید (K <sub>2</sub> O)            |
| ۱۵/۸۵۵                | کلسیم اکساید (CaO)                          |
| ۴/۷۸۴                 | اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |
| ۲/۱۲۷                 | دیگر محتویات                                |

### ۳-۲. افزودنی معدنی - پلیمری

نمایش داده شده است. همانطور که از تصاویر پیداست این ماده ترکیبی از ذرات آمورف و کریستالی می باشد که درصد سیلیس موجود در آن قابل ملاحظه است که می تواند در جهت افزایش مقاومت، نقش بسزائی داشته باشد. همچنین، مطابق با شکل ۴، انجام طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) بر روی نمونه نیکوفلاک حاکی از سهم عمده عناصر اکسیژن، کلسیم و سیلیس است که منجر به ایجاد پیوستگی مناسب بین ذرات نیکوفلاک و سطح سنگدانه و در نتیجه افزایش مشخصات مکانیکی ترکیب سیمانی حاوی نیکوفلاک می گردد. این میکروآنالیز صورت پذیرفته از قسمت های مختلف ماده نتایج یکسانی را نشان داد.

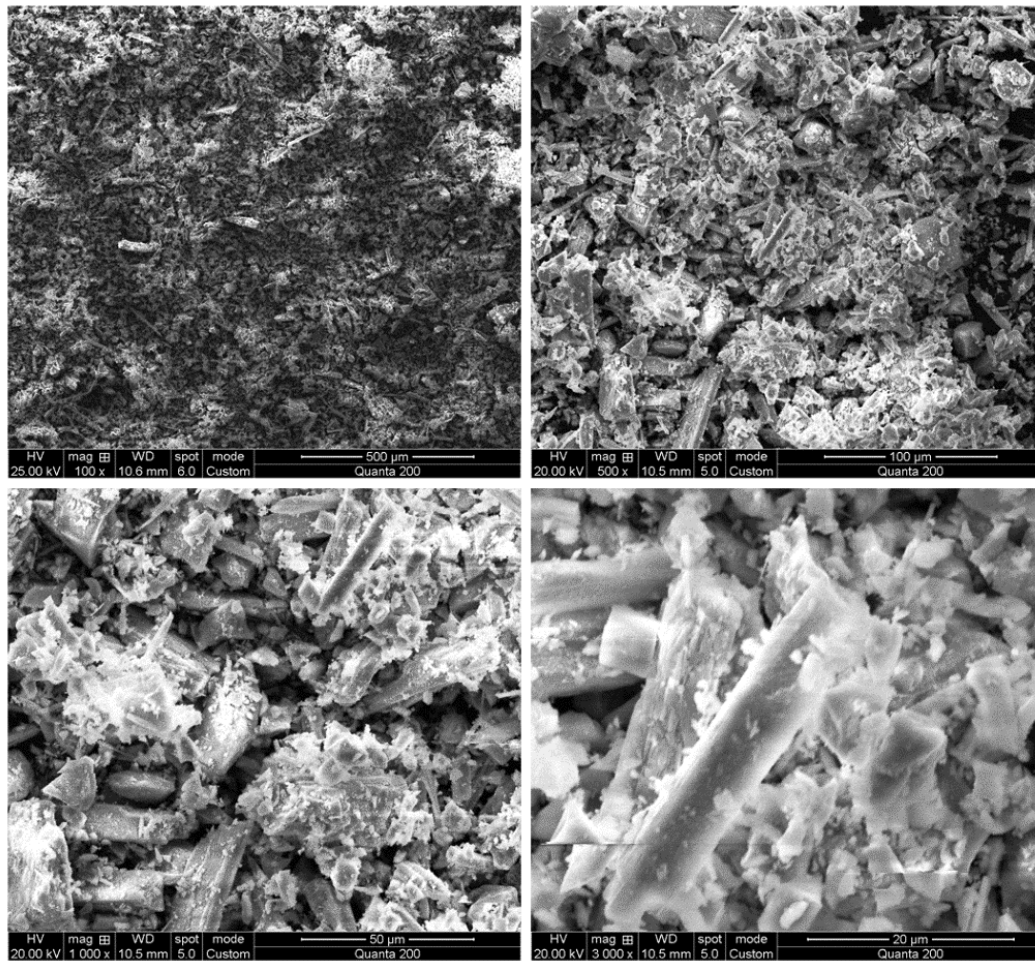
افزودنی معدنی پلیمری نیکوفلاک (NMP) است که می تواند باعث افزایش مشخصات مکانیکی و بهبود دوام در مصالح تثبیت شده سیمانی گردد. نیکوفلاک به صورت مخلوطی از سیلیکای فعال شده، سیمان فعال شده، نمک -کلسیم، نمک سدیم و مخلوط پودرهای باز پخش شده بر مبنای لیگنین و به ویژه لیگنین تغییر یافته، اسیدهای کربن دار، نفتالن سولفونیک اسید و فرمالدهید می باشد. این مواد بصورت خاکستر با وزن مخصوص ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد، همچنین بیشتر از ۹۰ درصد این مواد از الک شماره ۳۱۵ / ۰ عبور می کنند. همچنین بر روی مصالح آزمایش XRF و SEM انجام گرفته است که نتایج آن به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۳

جدول ۳. نتایج آزمایش XRF بر روی پلیمر NMP

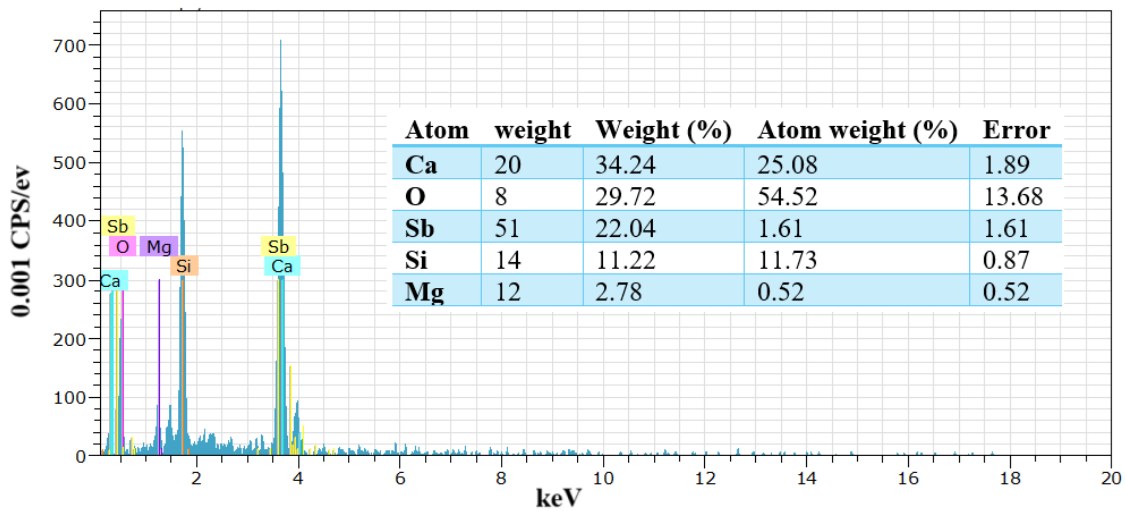
| درصد اکسیدها (%) | SiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | MgO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SO <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO | K <sub>2</sub> O | F    | LOI  |
|------------------|------------------|------------------|-------|------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----|------------------|------|------|
| پلیمر NMP        | 48.65            | 0.5              | 33.14 | 1.45 | 0.12                          | 2.97            | 0.79                           | 0.78                           | 2.93              | -                | -   | 0.51             | 4.09 | 4.03 |

<sup>1</sup> Nicoflack mineral polymer





شکل ۳. تصاویر SEM از پلیمر معدنی نیکوفلاک



شکل ۴. نتایج آنالیز EDAX بر روی پلیمر معدنی نیکوفلاک

### ۳. روش ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در این پژوهش برای اساس تثبیت شده سیمانی، سیمان با درصد‌های ۴، ۵ و ۶ درصد با/ بدون افزودن ۱۰ درصد نیکوفلاک استفاده گردید. همچنین با توجه به مطالعه پیشین نویسندگان، از روش آزمایش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557)، درصد آب مصرفی ۶/۵٪ انتخاب شد. طرح مخلوط‌های بکارگرفته شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است. در نام گذاری نمونه‌ها، حروف C نشان دهنده سیمان و CN نشان دهنده سیمان حاوی نیکوفلاک است. عدد ذکر شده بعد از هر حرف نشان دهنده درصد مصرفی آن ماده است. بطور مثال، در نمونه C4 از ۴ درصد سیمان و در نمونه CN4، ۴ درصد سیمان به همراه ۰/۴ درصد افزودنی نیکوفلاک استفاده شده

است. نمونه‌های استوانه‌ای در اتاق رطوبت در دمای ۲۳ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد ASTM D1632 و در دوره ۹۰ روزه عمل‌آوری شدند.

نمونه‌های استوانه‌ای تثبیت شده با سیمان با قطر ۴ cm و ارتفاع ۱۱/۶ cm در ۳ لایه با ضخامت یکسان توسط ویبراتور مطابق با استاندارد ASTM D1633 کوبیده شدند. پس از تراکم هر لایه، سطح آن مضرص گردیده تا از ایجاد پیوستگی بین لایه‌های متوالی تراکم اطمینان حاصل شود. این نمونه‌ها پس از عمل‌آوری توسط دستگاه کاتر به دو دیسک ۵۲ میلی‌متری تقسیم شدند. یک شیار به ارتفاع ۲۰/۸ میلی‌متر در وسط نمونه تعبیه شد تا نمونه دیسک خمشی شیار دار جهت آزمایشات شکست آماده سازی شود.

جدول ۴. طرح مخلوط اساس تثبیت شده سیمانی

| شماره | نام مخلوط | سیمان مصرفی (%) | نیکوفلاک (%) | آب مصرفی (%) | میزان مصالح RAP به عنوان سنگدانه (%) |
|-------|-----------|-----------------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| ۱     | C4        | ۴               | -            | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |
| ۲     | C5        | ۵               | -            | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |
| ۳     | C6        | ۶               | -            | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |
| ۴     | CN4       | ۴               | ۰/۴          | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |
| ۵     | CN5       | ۵               | ۰/۵          | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |
| ۶     | CN6       | ۶               | ۰/۶          | ۶/۵          | ۱۰۰                                  |

### ۴. روش انجام آزمایش

بمنظور ایجاد مود ترکیبی I و II مطابق با شکل ۵، با تغییر موقعیت ترک بسمت یکی از تکیه‌گاه‌ها، شرایط بارگذاری متقارن حفظ و با نزدیک شدن ترک به سمت تکیه‌گاه اعمال نیروی برشی در نمونه افزایش یافت.

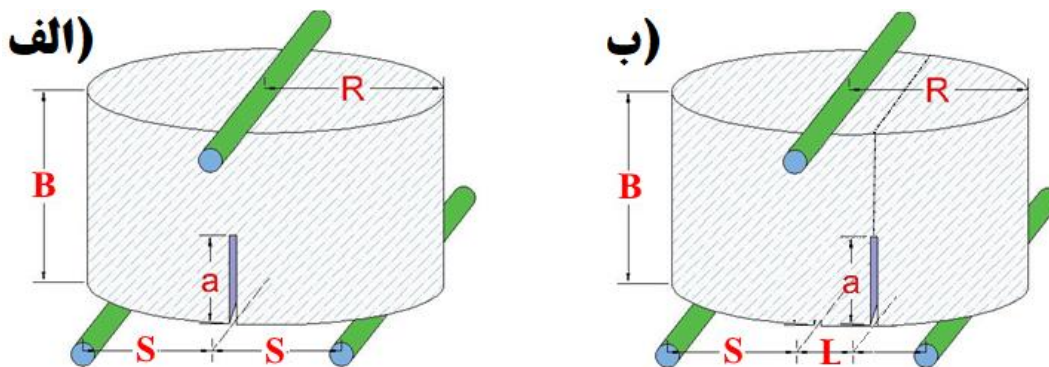
بمنظور امکان استفاده از شیوه ذکر شده در شکل بالا ابتدا نیاز به اکتساب ضرایب شکل است. در این تحقیق، از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی بصورت تحلیل سه بعدی و با استفاده از نرم افزار ABAQUS در شرایط مختلف بارگذاری و ابعاد مختلف هندسی، ضرایب شدت تنش استخراج گردید. به جهت دستیابی به ضرایب شدت

تنش از روش انتگرال-J در ناحیه نوک ترک مطابق با مش‌بندی نمایش داده شده در شکل ۶ استفاده شد. مطابق با تئوری الاستیک خطی، کرنش‌ها و تنش‌های ناحیه اطراف نوک ترک به صورت رابطه‌ای از  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  تغییر می‌کنند که r فاصله از نوک ترک است. به این ترتیب کرنش‌ها و تنش‌ها در نوک ترک، قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. بنابراین برای بالا بردن دقت حل و دستیابی به نتایج مطلوب، مناسب‌تر خواهد بود اگر در مش‌بندی نوک ترک از المان‌هایی استفاده شود که قابلیت مدل نمودن تکین شدن تنش و کرنش را داشته باشند. به این منظور در تحلیل‌های سه بعدی برای مش‌بندی ناحیه نوک ترک از المان‌های منفرد استفاده شد. برای یافتن پارامترهای دقیق

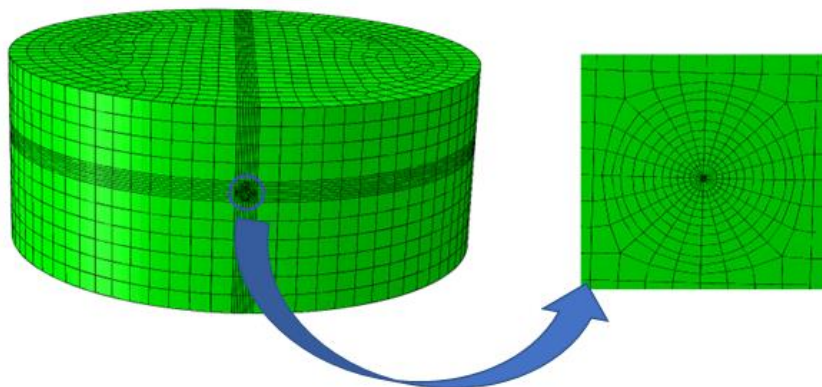
مدلسازی، نتایج مطالعات پیشین (Aliha et al., 2015, 2016a, 2016b) محاسبه و منجر به اطمینان از صحت مدلسازی صورت پذیرفته گردید.

بمنظور ایجاد مود ترکیبی I و III، اینبار بجای تغییر تکیه‌گاه، اقدام به چرخش ترک حول محور قائم جهت ایجاد شرایط تنش برشی خارج از صفحه شد. شکل ۷ شرایط و چیدمان این نوع بارگذاری را نشان می‌دهد. مطابق با تحلیل صورت پذیرفته در قسمت قبل، تحلیل عددی در نرم افزار آباکوس انجام شد. ساخت مدل برای نمونه‌های ENDB، در زاویه چرخش ترک ( $\beta$ ) از مقدار ۰ تا ۷۰ درجه با طول گام ۱۰ درجه و نسبت طول دهانه بارگذاری به شعاع (S/R)، ۰/۹۰، ۰/۹۲۵ و ۰/۹۵ با سه حالت مختلف عمق ترک به ارتفاع نمونه (a/B)، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ صورت پذیرفت.

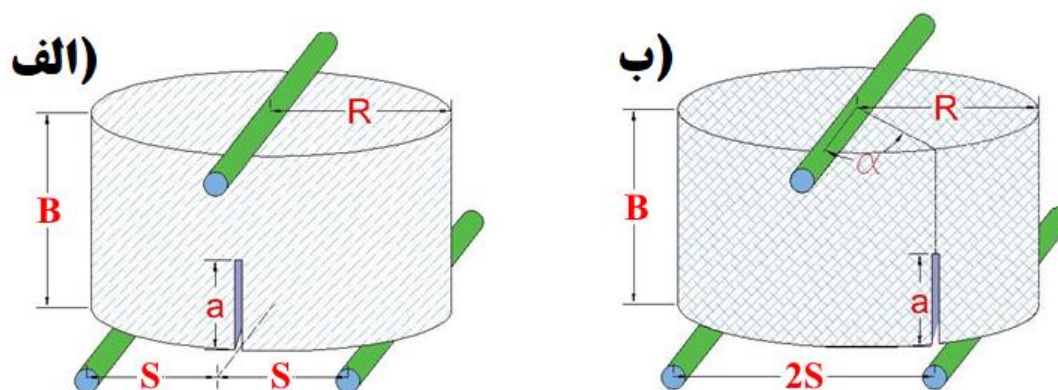
شکست، مش‌بندی‌های مجاور نوک ترک با ظرافت بیشتری ایجاد شدند و آنهایی که دورتر از نوک ترک هستند (برای کاهش زمان اجرا) نسبتاً درشت در نظر گرفته شد. به جهت دوری از ناحیه پلاستیک نوک ترک، شعاع دایره اول ۰/۵ و شعاع دایره دوم ۱/۵ میلی متر تنظیم گردید. ناحیه بین دو قسمت دوار در نظر گرفته شده در نزدیکی نوک ترک به ۸ بخش با ضریب (Bias) ۲/۵ تقسیم گردید و مجموعاً ۲۸۸ مش با ساختار مکعبی غالب ساخته شد. محدوده مربع شکل دورتر از ترک داخل محدوده به ۳ بخش و اطراف محدوده به ۵ بخش تقسیم شده و مجموعاً ۱۲۰ مش با ساختار مکعبی ایجاد گردید. با تقسیم بندی نوک ترک به پنج بخش دوار متحد المركز از شعاع ۰/۵ تا ۲ میلی متر همگرایی لازم در نتایج شدت تنش حاصل گردید. به منظور اطمینان از صحت



شکل ۵. نحوه ایجاد مود ترکیبی I و II در نمونه ENDB



شکل ۶. نمونه ENDB، مش‌بندی مد نظر جهت دستیابی به پارامترهای شکست



شکل ۷. نحوه ایجاد مود ترکیبی I و III در نمونه ENDB

### ۵. پیش بینی نتایج پارامترهای شکست

مطالعه، مدل ANN سنتی با انجام یک روش انتخاب مدل بهینه‌سازی شده و سپس از نتایج برای تولید مدل پیش‌بینی با استفاده از رویکرد شبکه‌های عصبی الگوریتم ژنتیک ترکیبی (GA-ANN) استفاده شد. در این الگوریتم ژنتیک (GA) برای جایگزینی الگوریتم لونیبرگ-مارکووارت (LM) در شبکه عصبی مصنوعی سنتی و آموزش مدل GA-ANN استفاده می‌شود که منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر می‌گردد. برای این منظور، از یک کد باینری برای مدل‌سازی کروموزوم استفاده می‌شود که شامل تعداد ویژگی‌های مجموعه داده و تعداد گره‌ها در لایه پنهان GA-ANN است. کفایت مدل با عوامل آماری مختلفی مانند  $R$ ، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی مشخص می‌شود. GA-ANN مطابق شکل ۸-الف برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها بر اساس الگوی آموزش داده شده به طور تصادفی، استفاده می‌شود (Li et al., 2020). لایه‌های ورودی، خروجی و پنهان دارد که در آن لایه‌های دوم ممکن است یک یا چند لایه داشته باشند که نورون‌های لایه ورودی را با استفاده از تعداد مناسب نورون به لایه خروجی منتقل می‌کنند (Behnood & Golafshani, 2018). مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده از فعالیت‌های عددی توسط نورون‌های

بخش مدل‌سازی المان محدود (FE) در این کار تحقیقاتی با ارائه یک ابزار محاسباتی برای افزایش دقت و کاربرد یافته‌های ارائه شده برای فعالیت‌های بیشتر، انجام پذیرفت. از آنجایی که بهره برداری از نمودارهای نشان داده شده ممکن است گمراه کننده و/یا وقت گیر باشد، از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیشنهاد یک مدل پیش‌بینی استفاده شد. تاریخچه مختصری از نظریه‌های رویکرد مورد استفاده در بخش‌های قبلی ارائه شد و در ادامه با بررسی دقیق مقادیر جمع‌آوری شده از تحلیل‌های FE ارائه شد. شایان ذکر است که برخلاف آنچه که در سایر تحقیقات (Li et al., 2020; Vishnu et al., 2022; Wang et al., 2016) معمولاً انجام می‌شود، هدف این مطالعه ارائه پیش‌بینی نتایج تجربی نیست. در عوض، برای پیش‌بینی، از نتایج فعالیت‌های عددی استفاده می‌کند که فقط محدود به محدوده این پژوهش نیست.

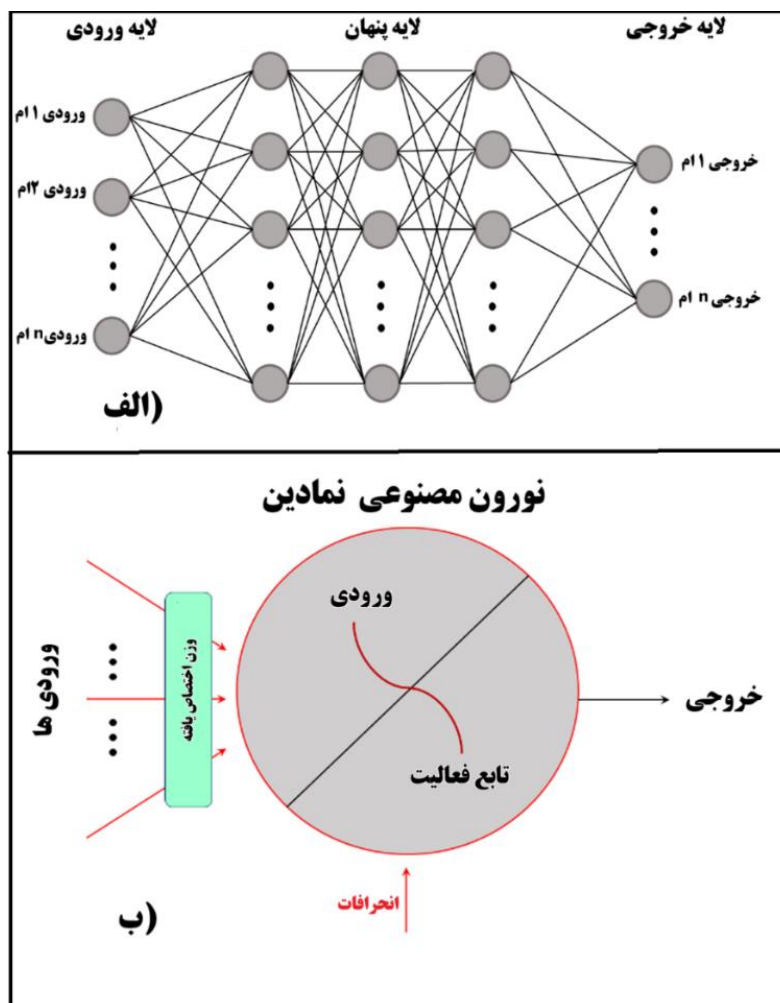
دستیابی به یک معماری شبکه بهینه به دلیل تعداد بی نهایت تکرار ممکن بسیار چالش برانگیز است. از این رو، این پژوهش از یک الگوریتم تکراری برای ارزیابی ساختارهای مختلف ANN، هر کدام در زمان‌های مختلف استفاده می‌کند و مدل دقیق‌تری ارائه می‌کند. در این

<sup>1</sup>genetic algorithm neural networks

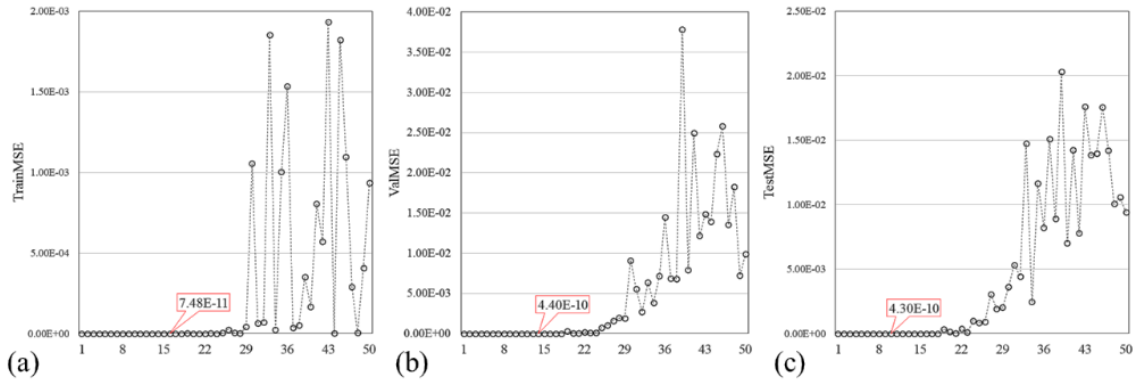


شکل ۹ تنوع عملکرد مدل GA-ANN به دست آمده از مجموعه داده‌های  $Y_I$  را در مقابل تعداد پذیرفته شده نورون‌های پنهان نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل با افزایش تعداد نورون‌های بیش از ۲۲ کارایی خود را از دست می‌دهد. با ارزیابی میانگین مقادیر MSE مدل‌های آموزش دیده، می‌توان دریافت که کمترین مقدار MSE برای پیش‌بینی  $Y_I$  را می‌توان از مدل شامل ۱۰ نورون پنهان استفاده کرد. این فرآیند همچنین برای بهینه‌سازی پیش‌بینی  $Y_{II}$  و  $Y_{III}$  انجام شد که در نتیجه می‌توان مدل بهینه را با استفاده از سه نورون پنهان ساخت.

لایه ورودی نشان داده می‌شوند که به عنوان واحدهای غیرعملیاتی طبقه‌بندی می‌شوند، اما آن‌هایی که به لایه‌های مخفی و خروجی تعلق دارند، عملیاتی هستند و سیگنال‌های دریافتی را پردازش می‌کنند. از موارد قبلی با انجام عملیات خطی و غیر خطی، سپس با در نظر گرفتن وزن‌ها و انحرافات، دومی‌ها تعریف و به شکل ریاضی ترجمه می‌شوند (شکل ۸-ب). بدین منظور، حداکثر تعداد نورون‌های پنهان روی ۵۰ تنظیم شد و تعداد تکرار در هر نقطه ۱۰ انتخاب شد. بر این اساس، کارآمدترین ANN را می‌توان با محاسبه میانگین مقدار  $R$ ، میانگین مربعات خطا (MSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر ساختار در هر پاسخ بدست آورد.



شکل ۸. تشریح مدل GA-ANN، الف) نمای شماتیک کلی مدل و ب) نمای کلی یک نورون عملکردی



شکل ۹. میانگین عملکرد مدل‌های ANN مقدار (Y<sub>I</sub>) متشکل از نورون‌های مخفی مختلف

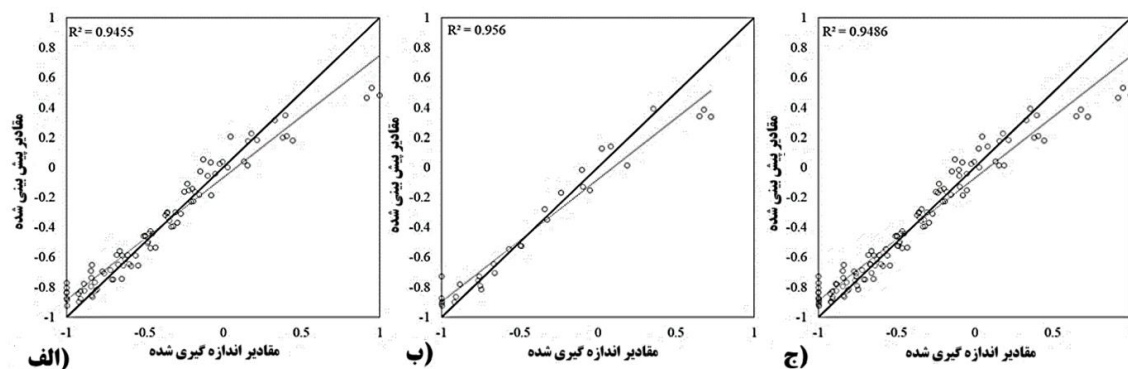
جدول ۵ مقادیر محاسبه شده MSE، به دست آمده برای هر مقادیر Y<sub>I</sub>، Y<sub>II</sub> و Y<sub>III</sub> مدل‌های GA-ANN را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نتایج ساختار انتخابی مدل پیش‌بینی را نشان می‌دهد که در آن شیب مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی، دقت پیش‌بینی را نشان می‌دهد. اگرچه قابلیت پیش‌بینی هر سه مدل پیشنهادی به اثبات رسید، اما مدل پیش‌بینی Y<sub>I</sub> و Y<sub>III</sub> در مقایسه با مدل Y<sub>II</sub> نتایج معقول‌تری را نشان داد. در پیوست ۱ معادلات مدل به جهت پیش‌بینی ضرایب شکل ارائه شده است.

سیس، مدل ترکیبی GA-ANN بر روی مقادیر عددی با در نظر گرفتن نتایج ایجاد شد. در واقع، مقادیر Y<sub>I</sub>، Y<sub>II</sub> و Y<sub>III</sub> با استفاده از GA-ANN متشکل از ۱۰ نورون پنهان، با اعمال اندازه جمعیت و حداکثر نسل‌های برابر با ۴۰، ۲۰۰ و ۲۰۰ مدل‌سازی شدند. لازم به ذکر است که مقادیر بیشتر اندازه جمعیت و حداکثر نسل منجر به افزایش هزینه‌های محاسباتی می‌شود، بنابراین در مواردی که دقت مدل رضایت‌بخش نباشد، این مقادیر افزایش می‌یابد. در طول تولید مدل، عملکرد محاسبه و ترسیم شد تا به تصمیم‌گیری در مورد دقت مدل کمک کند.

جدول ۵. مقادیر محاسبه شده MSE، به دست آمده برای هر مقادیر Y<sub>I</sub>، Y<sub>II</sub> و Y<sub>III</sub>

| پاسخ             | MSE            |                 |            | R              |                 |            |
|------------------|----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|------------|
|                  | داده‌های آموزش | داده‌های آزمایش | کل داده‌ها | داده‌های آموزش | داده‌های آزمایش | کل داده‌ها |
| Y <sub>I</sub>   | 0.0151         | 0.0180          | 0.0158     | 0.97           | 0.98            | 0.97       |
| Y <sub>II</sub>  | 0.0644         | 0.1030          | 0.0741     | 0.85           | 0.76            | 0.82       |
| Y <sub>III</sub> | 0.0083         | 0.0091          | 0.0086     | 0.94           | 0.96            | 0.95       |



شکل ۱۰. نمودار مقادیر پیش بینی شده در برابر اندازه گیری شده: (الف) داده‌های آموزش (ب) داده‌های آزمون (ج) کل داده‌ها

بکارگیری نرم افزار ABAQUS، شرایط مختلف بارگذاری و وضعیت شیار در نمونه‌های ENDB ارزیابی شد. با استفاده از نتایج تحلیل عددی آزمایشات مناسب شکست طراحی و اجرا گردید. با توجه به آزمایشات صورت گرفته‌ی شکست برای نمونه‌های ENDB، نتایج و تحلیل‌های صورت گرفته و همچنین تطبیق نتایج با استفاده از توزیع آماری ویبول در این پژوهش استفاده شده است.

## ۷. نتایج و تفسیر

۷-۱. نتایج مودهای خالص I، II و III و مود

ترکیبی I/II و I/III

با توجه به تحلیل عددی انجام شده، نمونه ENDB به قطر ۱۰۰ و به ارتفاع ۵۲ میلی‌متر جهت انجام آزمایش شکست با عمل آوری ۹۰ روزه آماده گردید. شیار به عمق ۲۰/۸ میلی‌متر توسط کاتر بر روی نمونه اعمال گردید. فاصله تکیه‌گاهی ۸۰ میلی‌متر انتخاب شد. برای ایجاد مود دو فاصله ۴/۸ میلی‌متر از تکیه‌گاه و برای ایجاد مود III زاویه چرخش ترک، ۶۲/۵ درجه لحاظ گردید. این آزمایش بصورت بارگذاری مونوتنیک با نرخ ۳ میلی-متر بر دقیقه انجام شد. مقادیر KIC، KIIC و KIIC با چهار بار تکرار برای هر نمونه در جدول ۶ آورده شده است. بر این اساس تاثیر درصد سیمان مصرفی و افزودنی نیکوفلاک در وضعیت مودهای مختلف بارگذاری در

## ۶. تحلیل آماری-تابع توزیع احتمال Weibull

مدل توزیع احتمال Weibull که در این تحقیق به اختصار Weibull PDF<sup>۱</sup> نامیده می‌شود به منظور برازش تابع احتمال بر روی داده‌های آزمایشگاهی و تعیین احتمال وقوع خرابی در مخلوط‌ها استفاده می‌شود. این آزمون در دسته آزمون‌های Survival analysis قرار داشته و بر اساس برازش تابع احتمال Weibull، احتمال وقوع خرابی را شناسایی می‌نماید. در این تحقیق از این آزمون به منظور تعیین اثر متغیرهای آزمایشگاهی بر وقوع خرابی در مخلوط‌های سیمانی استفاده شد. به این روش اثر سطوح مختلف متغیرهای آزمایشگاهی با ترسیم تابع احتمال آن تعیین می‌شود. تابع احتمال Weibull دو متغیره توسط رابطه ۱ تعیین می‌شود.

$$P_f = 1 - \exp\left(-\left[\frac{X}{\beta}\right]^\alpha\right) \quad (1)$$

که در آن

$P_f$ : احتمال وقوع خرابی می‌باشد.

$X$ : مقادیر متغیر مورد نظر

$\alpha$  و  $\beta$ : ضرایب ثابت مدل بوده که توسط روش حداقل مربعات تعیین می‌شوند.

مهمترین هدف در این پژوهش ارائه هندسه شکست مناسب به جهت انجام آزمایشات شکست در مود I، II و III است. بمنظور دستیابی به شرایط هندسه و بارگذاری ایده‌آل ابتدا با استفاده از تئوری مکانیک شکست خطی و

<sup>1</sup> Weibull probability distribution function (PDF)

تحت عنوان Weibull PDF، مورد استفاده قرار گرفت تا نقش دقیق هر یک از متغیرهای آزمایشگاهی را بر روی داده‌ها و نتایج تحلیل تعیین نماید. به طور کلی، استفاده از این نوع تحلیل، که تحلیل طول عمر نامیده می‌شود، اجازه تشریح نقش هر یک از متغیر با در نظرگیری نقش متغیرهای پنهان را می‌دهد. رابطه و نحوه عملکرد این تحلیل در بالا ارائه شده است.

احتمال وقوع خرابی شکست در مودهای I، II و III در نمونه‌های ENDB تعیین شد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تغییر مود بارگذاری از حالت بازشدگی کششی (مود I) به برش درون صفحه (مود II) منجر به کاهش قابل توجه احتمال خرابی می‌شود. این تغییر در حالت بارگذاری و نتیجتاً افزایش ضریب شدت تنش در اساس تثبیت شده سیمانی منجر به افزایش احتمال وقوع خرابی ترک‌خوردگی می‌شود. همچنین شکل ۱۴ نشان می‌دهد که احتمال شکست در مود برش برون صفحه (مود III) به مراتب نسبت به بازشدگی کششی (مود I) بیشتر است. بنابراین ایجاد حالت تنش برون صفحه در گسترش ترک‌های لایه اساس تثبیت شده سیمانی به مراتب خطرناک‌تر و مخرب‌تر از دو حالت دیگر است.

شکل ۱۱ آورده شده است. همچنین در شکل ۱۲ نمودار بار-جابجایی در مودهای مختلف بارگذاری ارائه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده افزودن پلیمر NMP باعث افزایش مقاومت شکست در مودهای I، II، III بارگذاری به ترتیب به میزان ۸، ۶ و ۸٪ می‌گردد.

## ۲-۷. تعیین احتمال ترک خوردگی بر اساس نتایج

### شاخص‌های تحلیلی

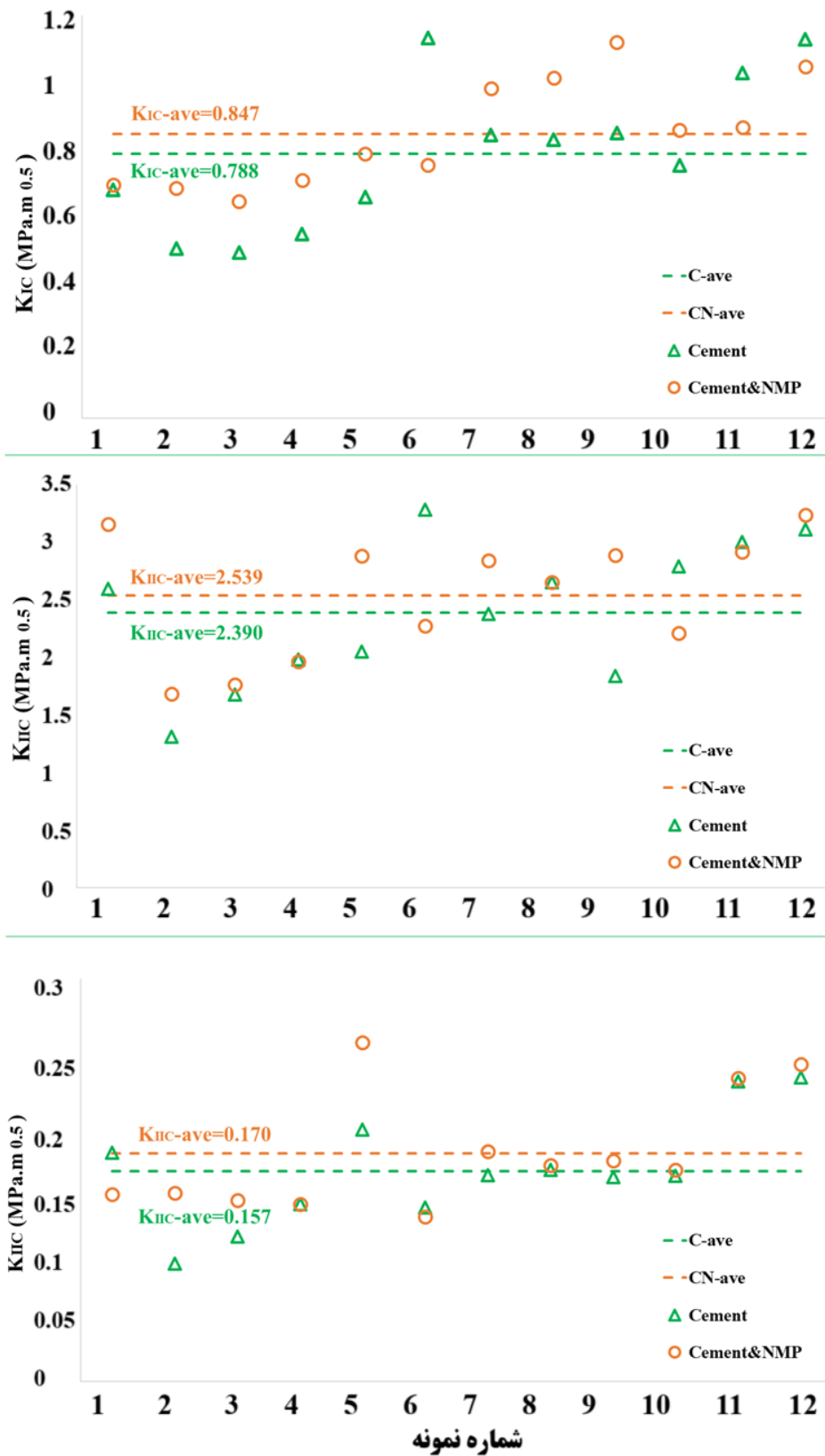
تابع توزیع احتمال Weibull PDF به منظور برازش بر روی داده‌های آزمایشگاهی و تعیین احتمال خرابی مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور احتمال وقوع خرابی ترک‌خوردگی تحت تأثیر متغیرهای مختلف تعیین شد. این توابع احتمال برای مودهای مختلف بارگذاری و یا در دو حالت استفاده از پلیمر نیکوفلاک و عدم استفاده از آن برازش داده شدند. نتایج به دست آمده از این تحلیل در ادامه آورده شده است. مشاهدات بخش قبل نشان داد که عملکرد مخلوط‌های تولید شده توسط درصد/نوع تثبیت کننده‌های مختلف را نمی‌توان با مقایسه نمودارها و به صورت بصری تعیین نمود. بنابراین، روشی آماری که در دسته تحلیل‌های طول عمر دسته‌بندی می‌شود،

جدول ۶: نتایج آزمایشات شکست بر روی نمونه ENDB

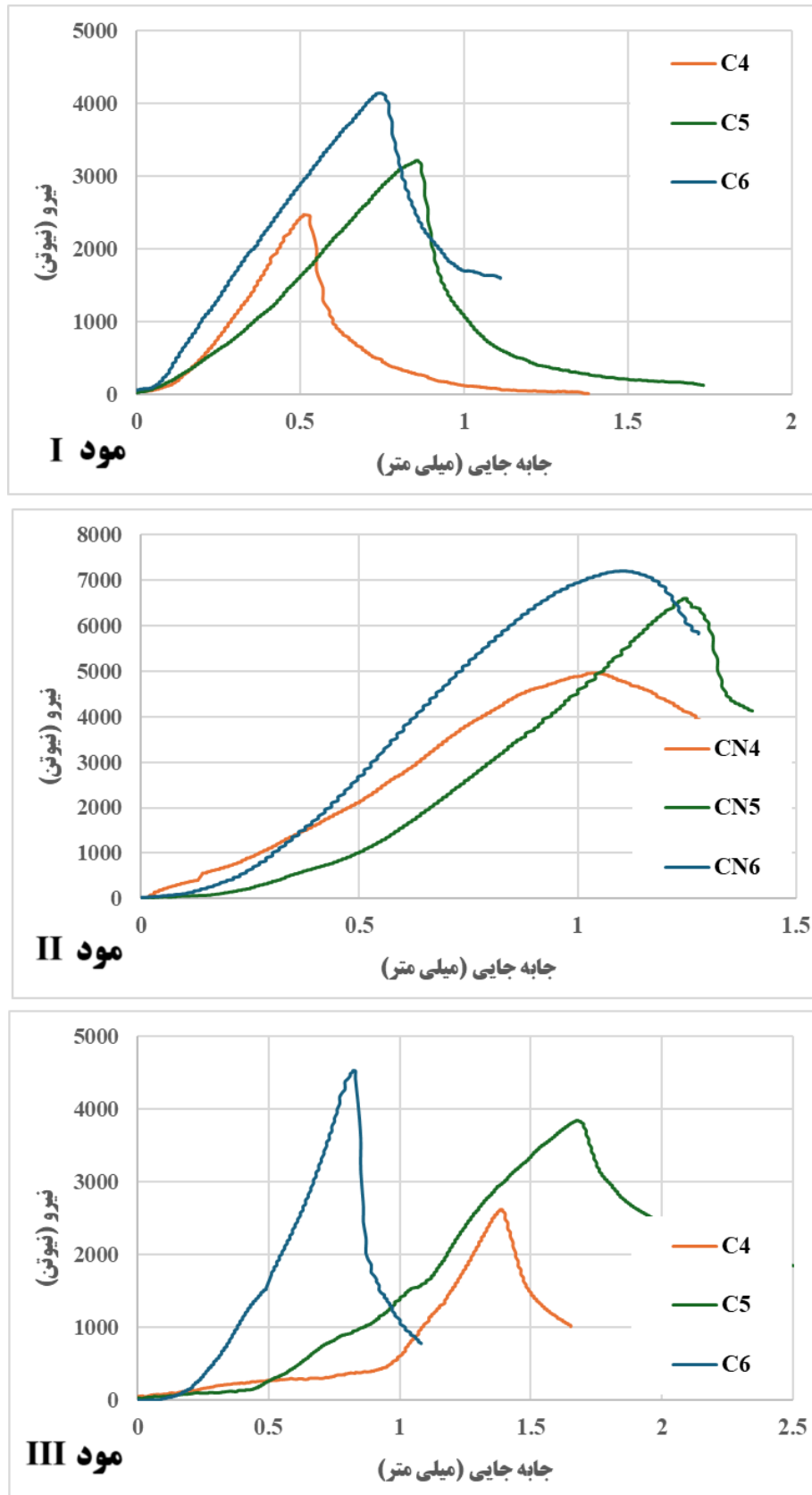
| نوع مخلوط | MODE I |                 |       |       | MODE II |                   |      |       | MODE III |                    |       |       |
|-----------|--------|-----------------|-------|-------|---------|-------------------|------|-------|----------|--------------------|-------|-------|
|           | P max  | K <sub>IC</sub> | Mean  | S t.d | P max   | K <sub>IIIC</sub> | Mean | S t.d | P max    | K <sub>IIIIC</sub> | Mean  | S t.d |
| C4        | 3      | 0               | 0.556 | 0.09  | 5       | 2                 | 1.89 | 0.54  | 5        | 0                  | 0.124 | 0.04  |
|           | 315    | .68             |       |       | 891     | .59               |      |       | 055      | .17                |       |       |
|           | 2      | 0               |       |       | 2       | 1                 |      |       | 2        | 0                  |       |       |
|           | 456    | .50             |       |       | 970     | .31               |      |       | 595      | .09                |       |       |
| CN4       | 2      | 0               | 0.684 | 0.03  | 3       | 1                 | 2.14 | 0.69  | 3        | 0                  | 0.137 | 0.00  |
|           | 398    | .49             |       |       | 809     | .68               |      |       | 200      | .11                |       |       |
|           | 2      | 0               |       |       | 4       | 1                 |      |       | 3        | 0                  |       |       |
|           | 668    | .55             |       |       | 505     | .98               |      |       | 914      | .13                |       |       |
| CN4       | 3      | 0               | 0.684 | 0.03  | 7       | 3                 | 2.14 | 0.69  | 4        | 0                  | 0.137 | 0.00  |
|           | 383    | .69             |       |       | 169     | .16               |      |       | 136      | .14                |       |       |
|           | 3      | 0               |       |       | 3       | 1                 |      |       | 4        | 0                  |       |       |
|           | 338    | .69             |       |       | 818     | .68               |      |       | 166      | .14                |       |       |
|           | 3      | 0               |       |       | 4       | 1                 |      |       | 4        | 0                  |       |       |
|           | 150    | .65             |       |       | 003     | .76               |      |       | 003      | .13                |       |       |



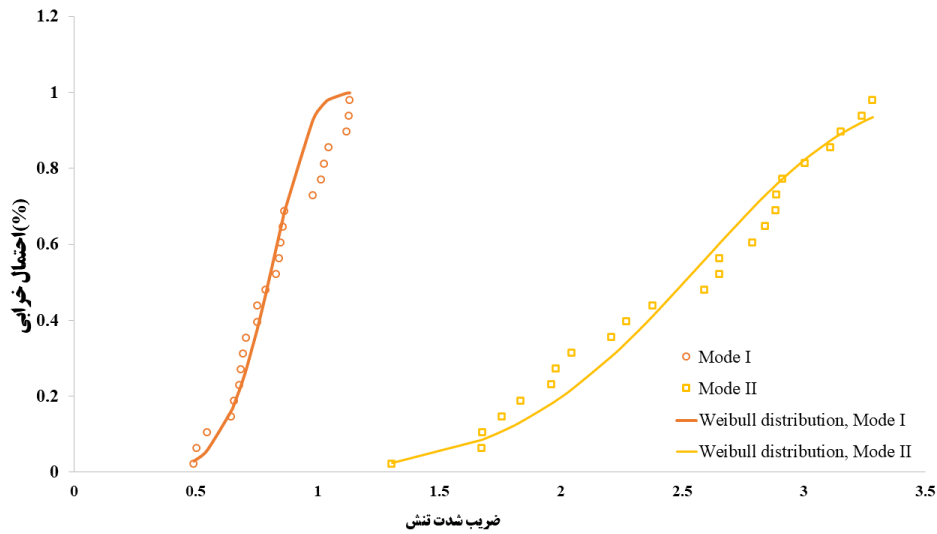
|     |          |          |           |          |          |          |          |          |          |          |           |          |
|-----|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
|     | 3<br>452 | 0<br>.71 |           |          | 4<br>461 | 1<br>.96 |          |          | 3<br>917 | 0<br>.13 |           |          |
| C5  | 3<br>206 | 0<br>.66 | 0.<br>866 | 0<br>.20 | 4<br>654 | 2<br>.05 | 2.<br>59 | 0<br>.52 | 5<br>565 | 0<br>.19 | 0.<br>157 | 0<br>.02 |
|     | 5<br>520 | 1<br>.13 |           |          | 7<br>461 | 3<br>.28 |          |          | 3<br>840 | 0<br>.13 |           |          |
|     | 4<br>113 | 0<br>.84 |           |          | 5<br>405 | 2<br>.38 |          |          | 4<br>552 | 0<br>.15 |           |          |
|     | 4<br>040 | 0<br>.83 |           |          | 6<br>033 | 2<br>.66 |          |          | 4<br>666 | 0<br>.16 |           |          |
| CN5 | 3<br>836 | 0<br>.79 | 0.<br>885 | 0<br>.13 | 6<br>555 | 2<br>.89 | 2.<br>66 | 0<br>.28 | 7<br>489 | 0<br>.25 | 0.<br>177 | 0<br>.05 |
|     | 3<br>671 | 0<br>.75 |           |          | 5<br>164 | 2<br>.27 |          |          | 3<br>641 | 0<br>.12 |           |          |
|     | 4<br>782 | 0<br>.98 |           |          | 6<br>457 | 2<br>.84 |          |          | 5<br>081 | 0<br>.17 |           |          |
|     | 4<br>941 | 1<br>.01 |           |          | 6<br>033 | 2<br>.66 |          |          | 4<br>780 | 0<br>.16 |           |          |
| C6  | 4<br>140 | 0<br>.85 | 0.<br>940 | 0<br>.17 | 4<br>173 | 1<br>.84 | 2.<br>69 | 0<br>.58 | 4<br>514 | 0<br>.15 | 0.<br>189 | 0<br>.04 |
|     | 3<br>668 | 0<br>.75 |           |          | 6<br>341 | 2<br>.79 |          |          | 4<br>539 | 0<br>.15 |           |          |
|     | 5<br>012 | 1<br>.03 |           |          | 6<br>830 | 3<br>.01 |          |          | 6<br>623 | 0<br>.22 |           |          |
|     | 5<br>498 | 1<br>.13 |           |          | 7<br>071 | 3<br>.11 |          |          | 6<br>713 | 0<br>.23 |           |          |
| CN6 | 5<br>453 | 1<br>.12 | 0.<br>973 | 0<br>.13 | 6<br>566 | 2<br>.89 | 2.<br>81 | 0<br>.43 | 4<br>871 | 0<br>.16 | 0.<br>196 | 0<br>.04 |
|     | 4<br>178 | 0<br>.86 |           |          | 5<br>024 | 2<br>.21 |          |          | 4<br>675 | 0<br>.16 |           |          |
|     | 4<br>219 | 0<br>.87 |           |          | 6<br>623 | 2<br>.92 |          |          | 6<br>708 | 0<br>.23 |           |          |
|     | 5<br>099 | 1<br>.05 |           |          | 7<br>363 | 3<br>.24 |          |          | 7<br>010 | 0<br>.24 |           |          |



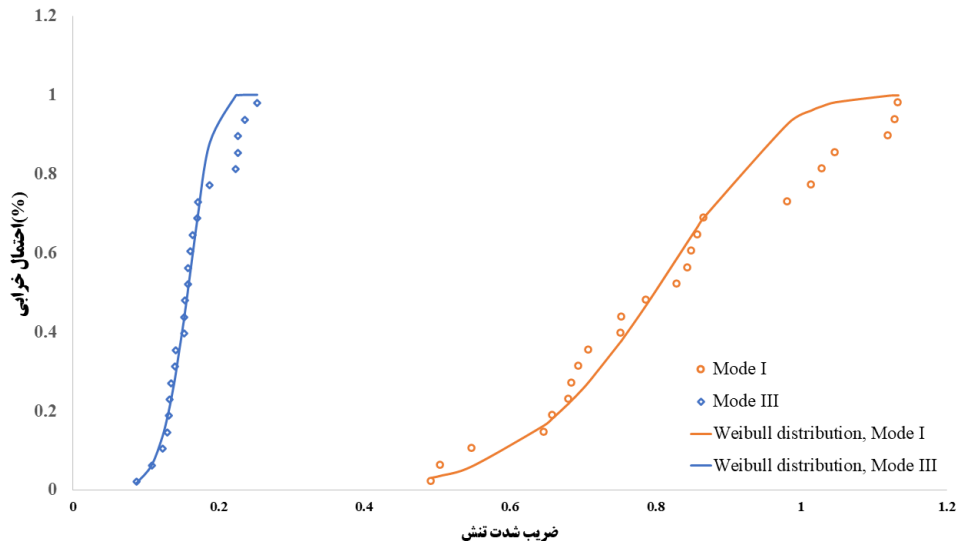
شکل ۱۱. میانگین ضرایب شدت تنش در نمونه‌های سیمانی با و بدون نیکوفلاک



شکل ۱۲. نمودار بار-جاب‌جایی نمونه ENDB در مودهای مختلف بارگذاری



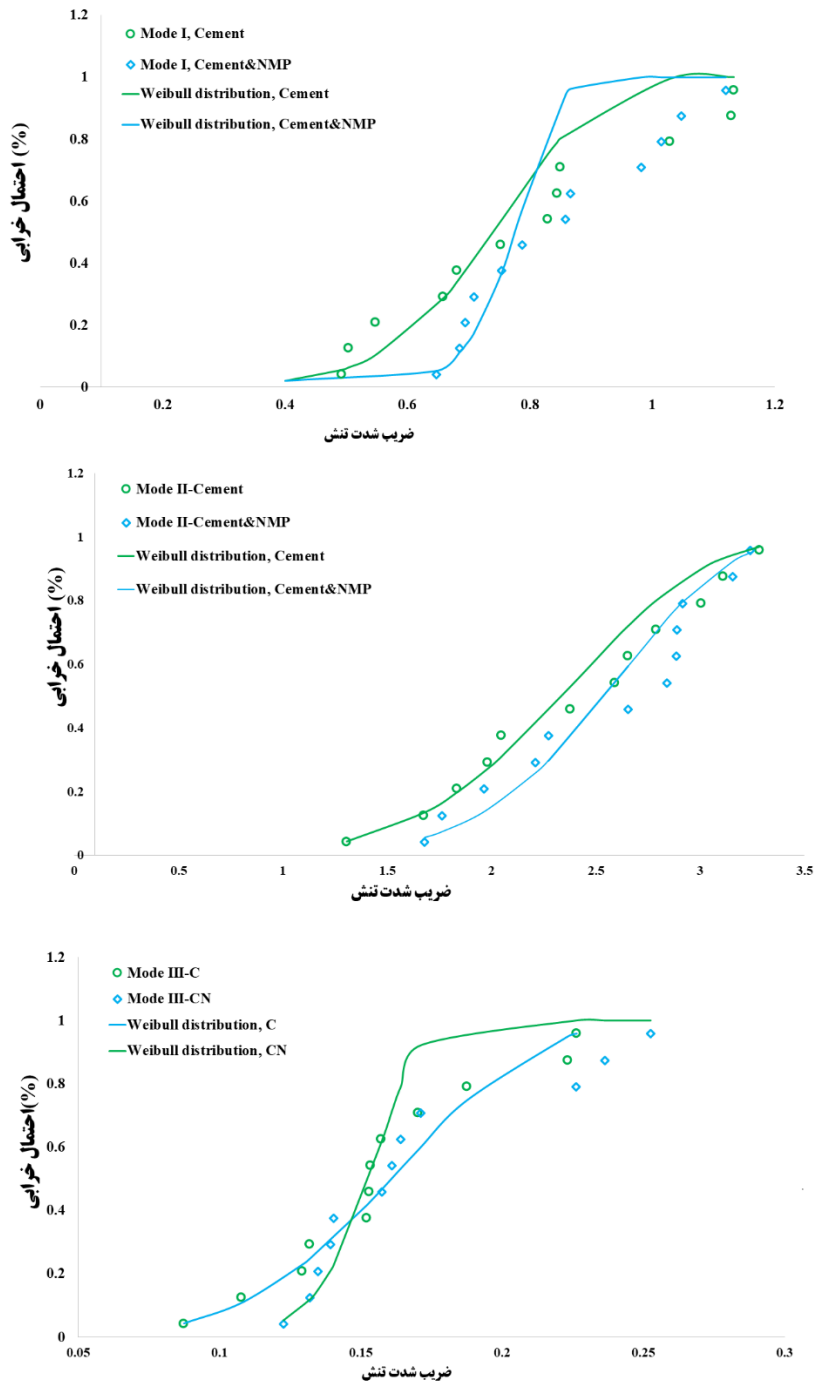
شکل ۱۳. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش (K) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های ENDB در مود I و II



شکل ۱۴. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش (K) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های ENDB در مود I و III

احتمال خرابی بیشتر در نمونه‌های حاوی نیکوفلاک است. دلیل این نتیجه را می‌توان در نزدیکی نتایج مود III و احتمال پایین بودن تعداد نتایج جستجو کرد. بمنظور نتیجه‌گیری بهتر در این زمینه، انجام آزمایشات مود ترکیبی و افزایش تعداد تکرار آزمایشات می‌تواند راهگشا باشد.

در ادامه به تقسیم‌بندی نتایج در دو دسته با و بدون حضور ماده نیکوفلاک پرداخته می‌شود. شکل ۱۵ نتایج توزیع ویبول را برای این دو حالت نشان داده است. در ضرایب شدت تنش کم می‌توان نتیجه گرفت که احتمال خرابی در نمونه‌های حاوی نیکوفلاک کمتر است. اما نکته قابل توجه در ارتباط با منحنی‌های بدست آمده در مقادیر حد بالای ضرایب شدت تنش است که نشان از



شکل ۱۵. احتمال شکست بر اساس ضریب شدت تنش (K) با استفاده از توزیع ویبول برای نمونه‌های ENDB برای نمونه‌های تثبیت شده سیمانی با/بدون نیکوفلاک

### ۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحلیل عددی صورت پذیرفته و فعالیت آزمایشگاهی و در ادامه بکارگیری مدل‌های پیش بینی شبکه عصبی مصنوعی منجر به نتایج زیر گردید:

- یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که نمونه‌های ENDB را می‌توان بصورت قابل اطمینان برای ارزیابی

در این پژوهش، از نمونه دیسک خمشی شیار دار (ENDB) بمنظور ارزیابی مشخصات شکست مخلوط-های اساس تثبیت شده سیمانی حاوی ۱۰۰ درصد مصالح RAP استفاده گردید. ارزیابی این نمونه با استفاده از

• تغییر مود بارگذاری از حالت بازشدگی کششی (مود I) به برش درون صفحه (مود II) منجر به کاهش قابل توجه احتمال خرابی می‌شود. این تغییر در حالت بارگذاری و نتیجتاً افزایش ضریب شدت تنش در اساس تثبیت شده سیمانی منجر به افزایش احتمال وقوع خرابی ترک خوردگی می‌شود. همچنین احتمال شکست در مود برش برون صفحه (مود III) به مراتب نسبت به بازشدگی کششی (مود I) بیشتر است. بنابراین ایجاد حالت تنش برون صفحه در گسترش ترک‌های لایه اساس تثبیت شده سیمانی به مراتب خطرناک‌تر و مخرب‌تر از دو حالت دیگر است.

• در تحلیل نتایج شکست با استفاده از تابع عمر باقی مانده ویبول مشخص شد که احتمال خرابی در نمونه‌های حاوی نیکوفلاک کمتر است. اما نکته قابل توجه در ارتباط با منحنی‌های بدست آمده در مقادیر حد بالای ضرایب شدت تنش است که نشان از احتمال خرابی بیشتر در نمونه‌های حاوی نیکوفلاک است. دلیل این نتیجه را می‌توان در نزدیکی نتایج مود III و احتمال پایین بودن تعداد نتایج جستجو کرد. بمنظور نتیجه‌گیری بهتر در این زمینه انجام آزمایشات مود ترکیبی و افزایش تعداد تکرار آزمایشات می‌تواند راهگشا باشد.

اساس‌های تثبیت شده سیمانی مورد استفاده قرار داد. از ویژگی‌های ایده آل این هندسه می‌توان به سهولت ساخت و انجام آزمایش شکست از طریق بکارگیری این هندسه اشاره نمود. علاوه بر این، نتایج تحلیل عددی نشان از توانمندی این هندسه شکست در ایجاد مودهای ترکیب بارگذاری در حالات مود I، II و III دارد.

• در تحلیل عددی صورت پذیرفته برای مود ترکیبی I و II که با جابه جایی محل ترک بسمت تکیه‌گاه ایجاد شد، مشخص شد که با افزایش طول دهانه (S1) بارگذاری، ضریب شکل در مود I و II به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق ترک میزان ضرایب شکل در هر دو مود بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. موارد ذکر شده در ارتباط با تنش مماسی نیز صدق می‌کند.

• بکارگیری ماده پلیمر معدنی نیکوفلاک به عنوان افزودنی سیمان منجر به افزایش چقرمگی شکست در مودهای مختلف می‌گردد. این افزایش به ترتیب برای مودهای I، II و III ۸، ۷ و ۸ درصد بوده است. شایان ذکر است در تحلیل ویبول عمر باقی مانده، نتایج در ضرایب شدت تنش بالا مویید این موضوع نبوده که نیازمند انجام تعداد آزمایشات بیشتر بر روی این نوع مخلوط است.

## ۸. مراجع

- Adresi, M., khishdari, A., Ahmadi, A., & Rooholamini, H. (2019). Influence of high content of reclaimed asphalt on the mechanical properties of cement-treated base under critical environmental conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(9), 1098–1105. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1388508>
- Aliha, M. R. M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2015). Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 134, 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.12.010>
- Aliha, M. R. M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2016a). A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites--Experimental and theoretical study. *International Journal of Solids and Structures*, 90, 167–177.
- Aliha, M. R. M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2016b). Mixed mode fracture toughness testing of PMMA with different three-point bend type specimens. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 58, 148–162. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.01.012>
- Aliha, M. R. M., & Fattahi Amirdehi, H. R. (2017). Fracture toughness prediction using Weibull statistical method for asphalt mixtures containing different air void contents. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 40(1), 55–68. <https://doi.org/10.1111/ffe.12474>

- Aliha, M. R. M., & Saghafi, H. (2013). The effects of thickness and Poisson's ratio on 3D mixed-mode fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 98(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.11.003>
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M., & Saghafi, H. (2011). An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(1), 110–123.
- Bahmani, A., Aliha, M. R. M., Jebalbarez Sarbijan, M., & Mousavi, S. S. (2020). An extended edge-notched disc bend (ENDB) specimen for mixed-mode I+II fracture assessments. *International Journal of Solids and Structures*, 193–194, 239–250. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2020.02.017>
- Behnood, A., & Golafshani, E. M. (2018). Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves. *Journal of Cleaner Production*, 202, 54–64. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.065>
- Chhabra, R. S., & Ransinchung Rongmei Naga, G. (2023). Stabilization of cement-treated base mixes incorporating high reclaimed asphalt pavement materials using stabilizer rich in SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Construction and Building Materials*, 365, 130089. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130089>
- Chiranjeevi, K., Hemanth Kumar, D., Yathish, R. G., & Ravi Shankar, A. U. (2023). Laboratory investigation on cement-treated recycled concrete aggregate bases for flexible pavements. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.509>
- Fakhri, M., Amosoltani, E., & Aliha, M. R. M. (2017). Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 43–59. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.011>
- Ghanizadeh, A. R., Rahrovan, M., & Bafghi, K. B. (2018). The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation. *Construction and Building Materials*, 161, 165–174. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.124>
- Li, D., Armaghani, D. J., Zhou, J., Lai, S. H., & Hasanipanah, M. (2020). A GMDH Predictive Model to Predict Rock Material Strength Using Three Non-destructive Tests. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S10921-020-00725-X/METRICS>
- Liu, Z., Ma, C., & Wei, X. (2024). Assessment of mode I/III fracture toughness of bi-material rock-like ENDB and ENDC specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 129, 104235. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2023.104235>
- Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. (2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 239–245. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(239))
- Trzebiatowski, B. D., & Benson, C. H. (2005). Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Recycled Asphalt Pavement. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 514–519. <https://doi.org/10.1520/GTJ12698>
- Vishnu, B. S., Simon, K. M., & Raj, B. (2022). Fatigue Life Prediction of Reinforced Concrete Using Artificial Neural Network. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 171, 265–271. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80312-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80312-4_22)
- Wang, C., Zhu, Z. M., & Liu, H. J. (2016). On the I–II mixed mode fracture of granite using four-point bend specimen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 39(10), 1193–1203. <https://doi.org/10.1111/FFE.12422>

### پیوست

با حل معادلات (۱)، (۲) و (۳) که برای مدل‌های  $Y_I$ ،  $Y_{II}$  و  $Y_{III}$  برای پیش‌بینی پارامترهای شکست ایجاد شده‌اند، امکان تقریب مقادیر ضریب شکل در شرایط آزمایشی مطلوب فراهم می‌گردد.

$$(۱) [Y_I] = \begin{bmatrix} \{0 \times 0 \text{ double}\} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \\ LW_{21} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{bmatrix} \times \left( \text{Tansig} \left[ \begin{matrix} IL_{11} \\ \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{matrix} \right] \times \begin{bmatrix} a/B \\ S1/R \\ L/R \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \right)^T + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}$$

$$LW_{21} = [-0.1387 \quad -0.0958 \quad -0.9319 \quad -0.7681 \quad 0.1692 \quad -0.2361 \quad 0.1332 \quad -0.0741 \quad 0.2561 \quad -0.0766]$$

$$, b_{21} = -0.1400 \quad , b_{11} = \begin{bmatrix} 0.0323 \\ 0.3682 \\ 0.5806 \\ 0.3889 \\ -0.0969 \\ -0.4620 \\ 0.0279 \\ -0.5194 \\ 0.3940 \\ -0.1857 \end{bmatrix} \quad IL_{11} = \begin{bmatrix} -0.0191 & 0.0444 & 0.0758 \\ -0.3111 & -0.6827 & -0.4567 \\ -0.7275 & -0.0485 & 0.4942 \\ 0.3990 & 0.3981 & 0.7521 \\ -0.5079 & 0.6498 & 0.1485 \\ -0.1476 & 0.1889 & 0.1447 \\ 0.1157 & 0.3375 & -0.7225 \\ 0.5837 & 0.1982 & -0.0287 \\ 0.1634 & 0.0465 & -0.4006 \\ 0.1259 & -0.6236 & -0.3823 \end{bmatrix}$$

$$(۲) [Y_{II}] = \begin{bmatrix} \{0 \times 0 \text{ double}\} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \\ LW_{21} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{bmatrix} \times \left( \text{Tansig} \left[ \begin{matrix} IL_{11} \\ \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{matrix} \right] \times \begin{bmatrix} a/B \\ S1/R \\ L/R \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \right)^T + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}$$

$$LW_{21} = [-0.1237 \quad -0.2632 \quad 0.4575 \quad -0.4679 \quad 0.2939 \quad -0.3105 \quad -0.1108 \quad -0.0255 \quad 0.4338 \quad -0.0636]$$

$$, b_{21} = -0.2946 \quad , b_{11} = \begin{bmatrix} -0.2575 \\ -0.5006 \\ 0.5001 \\ 0.5289 \\ 0.0453 \\ -0.3879 \\ 0.2198 \\ 0.0483 \\ 0.4491 \\ 0.0037 \end{bmatrix} \quad IL_{11} = \begin{bmatrix} -0.7022 & 0.6979 & -0.2430 \\ -0.1359 & -0.0133 & 0.5388 \\ 0.6157 & 0.3371 & 0.4392 \\ 0.0121 & -0.0025 & 0.1895 \\ -0.7901 & -0.6985 & -0.6768 \\ -0.5500 & -0.0333 & -0.1490 \\ -0.3382 & 0.3070 & 0.3797 \\ -0.4946 & 0.7727 & 0.6518 \\ -0.2373 & 0.0681 & 0.3640 \\ -0.4170 & -0.4528 & -0.2609 \end{bmatrix}$$

$$(۳) [Y_{III}] = \begin{bmatrix} \{0 \times 0 \text{ double}\} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \\ LW_{21} & \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{bmatrix} \times \left( \text{Tansig} \left[ \begin{matrix} IL_{11} \\ \{0 \times 0 \text{ double}\} \end{matrix} \right] \times \begin{bmatrix} a/B \\ S1/R \\ L/R \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \right)^T + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}$$

$$LW_{21} = [-0.1313 \quad -0.1007 \quad -0.9126 \quad -0.6140 \quad 0.3055 \quad -0.3105 \quad -0.5637 \quad -0.2335 \quad 0.3311 \quad -0.5306]$$

$$, b_{21} = -0.0933 \quad , b_{11} = \begin{bmatrix} -0.0351 \\ -0.3414 \\ 0.5365 \\ 0.5900 \\ 0.0453 \\ -0.1753 \\ 0.2198 \\ -0.0731 \\ 0.1482 \\ -0.1154 \end{bmatrix} \quad IL_{11} = \begin{bmatrix} -0.5491 & 0.4919 & -0.8082 \\ -0.6005 & -0.1284 & 0.1111 \\ 0.7395 & 0.9370 & 0.8397 \\ 0.1088 & -0.0105 & 0.1225 \\ -0.6606 & -0.6582 & -0.7689 \\ -0.4670 & -0.1336 & -0.1722 \\ -0.1478 & 0.3860 & 0.5970 \\ -0.6441 & 0.9277 & 0.5177 \\ -0.3732 & 0.8016 & 0.5012 \\ -0.4701 & -0.2873 & -0.6940 \end{bmatrix}$$