

ارزیابی رفتار مخلوط آسفالت گرم و نیمه گرم در مناطق سردسیر با استفاده از

اصول مکانیک شکست

بابک گلچین (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

Email: b.golchin@uma.ac.ir

زریر کوزه‌گر کالجی، کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

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

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

چکیده

در این پژوهش، مقاومت مخلوط‌های آسفالت گرم و نیمه گرم دارای سه درصد ساسوبیت در دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد با استفاده از اصول مکانیک شکست بررسی شد. بدین منظور تاثیر مدهای مختلف بارگذاری (کشش خالص و برش خالص) بر مقدار مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمونه نیم دایره ای با ترک لبه ای تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای مورد بررسی قرار گرفت. آنگاه ضریب شدت تنش بحرانی از نتایج آزمایش شکست و ضرایب شکل از آنالیز المان محدود در نرم افزار آباکوس تعیین شدند. نتایج نشان داد که در آسفالت گرم و نیمه گرم حاوی سه درصد ساسوبیت با کاهش دما، ضریب شدت تنش بحرانی در مدهای کشش و برش خالص افزایش می‌یابد. همچنین مخلوط آسفالت گرم در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد مقاومت شکست قابل ملاحظه ای نسبت به مخلوط آسفالت نیمه گرم در تمام مدهای بارگذاری از خود نشان می‌دهد. با کاهش دما، مقاومت شکست هر دو نوع آسفالت (آسفالت گرم و نیمه گرم) افزایش می‌یابد.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، مخلوط آسفالت نیمه گرم، مقاومت شکست، مدهای بارگذاری

۱. مقدمه

دهد [Gong, et al. 2020 and Li, Zhang and Chen

2020] و قادر به کاهش درجه حرارت تولید آسفالت به میزان

۱۰ الی ۳۰ درجه سانتی گراد است [Xu, et al. 2017].

برای بررسی رفتار آسفالت در دماهای پایین، روش های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش ها، استفاده از علم مکانیک شکست

است. در این علم با استفاده از انواع مدهای بارگذاری در اجسام ترک دار، به بررسی نحوه جدا شدن و از هم گسیختگی عضو

می پردازند. این بارگذاری ها شامل مود I (مود کششی)، مود II

(مود برشی) و ترکیبی از مود های ذکر شده است. در این راستا

با به کارگیری اصول و مفاهیم مکانیک شکست می توان تشکیل

و گسترش ترک را مورد بررسی قرار داد.

بر اساس پژوهش های انجام شده، آزمایش نمونه ترک دار با

مقطع نیم دایره ای خمشی می تواند آزمایش خوبی برای محاسبه

خواص شکست مخلوط های آسفالتی باشد [Yousefi, et al.

2021 and Fuan, et al. 2021]. استفاده از آزمایش نمونه

ترک دار با مقطع نیم دایره ای خمشی هم برای سنگ ها و هم

برای مخلوط های آسفالتی مفادیر صحیح تری از چقرمگی

شکست به دست می دهد.

زینگزو و همکاران در تحقیقی مقاومت شکست مخلوط های

آسفالتی را در مد I و II در دماهای پایین (-۵، -۱۵ و -۲۵-

درجه سانتیگراد) و در ضخامت های مختلف برای نمونه با مقطع

نیم دایره ای حاوی ترک بررسی کردند. نتیجه تحقیق نشان داد

که بار شکست مد II بزرگتر از مد I بوده ولی ضخامت نمونه

تاثیر مشخصی بر مقدار مقاومت شکست نمی گذارد

[Xiongzhou, et al. 2021].

در یک تحقیق دیگر مقاومت شکست در مد I برای نمونه های

آسفالتی تهیه شده با قیر حاوی پلی اتیلن با چگالی پایین در

دماهای زیر صفر درجه و در سرعت های مختلف بارگذاری

بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش نمونه ها نشان داد که

مقاومت شکست با کاهش دما، افزایش سرعت بارگذاری و در

یکی از خرابی های مهم در رویه های آسفالتی در مناطق سردسیر،

ترک های ناشی از تنش های حرارتی هستند. با کم شدن دمای

آسفالت و در اثر تنش های ناشی از آن آسفالت دچار انقباض

می شود در این حالت، اصطکاک بین لایه های آسفالت و اساس

زیاد می شود. اگر مقدار تنش های حاصل در آسفالت از مقدار

استحکام کششی مخلوط آسفالتی زیاد شود، ترک هایی در لبه و

سطح آسفالت به وجود خواهد آمد [Rubio, et al. 2012].

بالا بودن محدوده دمائی تولید مخلوط های آسفالتی گرم (۱۴۰ تا

۱۷۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش هزینه سوخت مصرفی و

اثرات زیست محیطی ناشی از آن می گردد [Ye, Yang, and

Huang, 2006]. از این رو یکی از راهکارهای مقابله با این

مشکل، استفاده از آسفالت نیمه گرم است [Prowell,

Hurley, and Frank 2011]. در آسفالت نیمه گرم، کاهش

دمای تولید می تواند میزان پیرشدگی قیر را در فرایند تولید در

کارخانه های آسفالت تا حدودی کاهش دهد. چنین تصور می

شود که این کاهش پیرشدگی بتواند مقاومت مخلوط آسفالتی

نیمه گرم را در وقوع ترک های حرارتی بهبود دهد [Rubio,

et al. 2012]. هر چند که این موضوع در یک مطالعه دیگر، به

دلیل احتمال کاهش چسبندگی قیر به مصالح سنگی در دمای تولید

پایین مورد سوال قرار گرفته است [Hamzah, et al. 2015].

در کارخانه های تولید آسفالت نیمه گرم، ویسکوزیته قیر با

استفاده از افزودنی و یا بهبود فرایند اختلاط، پایین آورده می شود.

از این رو امکان تولید مخلوط های آسفالتی در درجه حرارت

پایین تر (معمولا ۷۵-۱۰۰ درجه سانتی گراد پایین تر با توجه به

نوع تکنولوژی استفاده شده) فراهم می گردد. در یکی از این

تکنولوژی ها از ساسوبیت به عنوان یک افزودنی در تولید مخلوط

های آسفالتی نیمه گرم استفاده شده است. تحقیقات صورت

گرفته نشان می دهد که ساسوبیت ویسکوزیته قیر را کاهش می

خالص برش نشان می دهد. همچنین افزایش فضای خالی سبب کاهش مقاومت شکست بتن آسفالتی می گردد.

لازم به ذکر است که آزمایش مقاومت شکست، به صورت گسترده در بررسی رفتار مخلوط های بتن سیمانی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال کریم زاده و همکاران [Karimzadeh et al. 2019] از الیاف مصنوعی و طبیعی برای تسلیح مخلوط بتنی استفاده کردند و مقاومت شکست این مخلوط ها را تعیین کردند. اسد الله تبار و همکاران [Sdollah-Tabar, Heidari-Rarani, and Aliha 2021] رفتار شکست بتن های پلیمری را در حضور مواد بازیافتی در مد I بارگذاری بررسی کردند. این مفهوم در مکانیک شکست سنگها نیز استفاده شده است. میرسیار و همکاران [Mirsayar et al. 2018]، از ترکیب مد I و II بارگذاری برای بررسی رفتار شکست سنگ ها استفاده نمودند. رضوی و همکاران [Razavi, Aliha, and Berto 2018] رفتار شکست سنگ های گرانیتی را در بارگذاری خمشی چهار نقطه ای با معیار متوسط چگالی انرژی بررسی کردند.

یکی از روش های افزایش کارایی مخلوط های آسفالتی، اصلاح رفتار قیرها می تواند باشد. به عنوان مثال، افزودنی های مختلف با توجه به نوع واکنش شیمیایی یا فیزیکی با قیر می توانند به بهبود عملکرد رئولوژیکی قیر در دمای بسیار بالا (دمای تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه)، دمای بالا (شرایط شیارافتادگی)، دمای میانی (شرایط وقوع پدیده خستگی) و دمای پایین (شرایط ایجاد ترک حرارتی) کمک کنند [Hamzah, et al. 2015]. افزودنی ساسویت می تواند ویسکوزیته قیر را در دمای بسیار بالا کاهش دهد و منجر به کاهش دمای تولید آسفالت در کارخانه ها گردد [Gong, et al. 2020 and Li, Zhang and Chen 2020]. حال این سوال می تواند مطرح شود که این افزودنی چه تغییراتی در رفتار مخلوط های آسفالتی در دمای های دیگر می تواند داشته باشد. از آنجا که، ترک خوردگی در

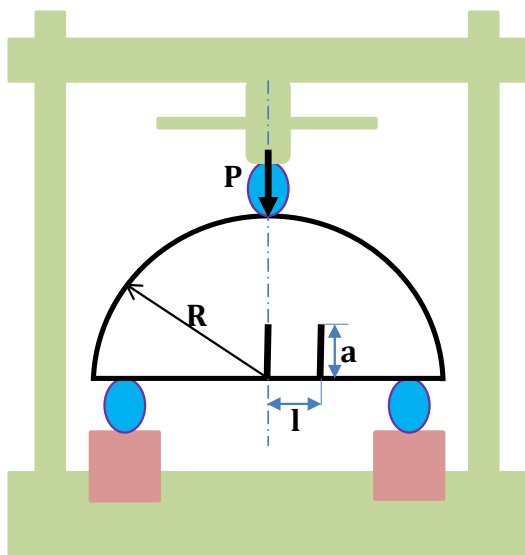
حضور افزونی افزایش می یابد [Artamendi, and Khalid 2006].

مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی در نمونه های با مقطع نیم دایره ای که حاوی ترک بودند در بک پژوهش دیگر تعیین گردید. در این تحقیق مخلوط هایی با ترکیبات مختلفی از پارامترهایی مانند نوع قیر، سنگدانه، افزودنی قیر و میزان درصد فضای خالی ساخته شد و همچنین تاثیر نرخ بارگذاری و طول ترک نیز ارزیابی شد [Li, and Marasteanu 2010].

آیت اللهی و پیر محمد تاثیر تغییرات دما بر مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی را بررسی کردند. ایشان از نمونه ترک دار با مقطع نیم دایره ای خمشی با بارگذاری سه نقطه ای استفاده شد. در تحقیق آنها ضریب شدت تنش مخلوط های آسفالتی تابعی از دما بود بطوریکه با کاهش دما میزان ضریب شدت تنش تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می یافت. همچنین، ضریب شدت تنش در حات بارگذاری برش خالص بیشتر از وضعیت کشش خالص به دست آمد [Ayatollahi, and Pirmohammad 2013]. در سال ۲۰۱۴، ایشان [Pirmohammad, and Ayatollahi 2014] در تحقیقی دیگر، اثر متغیرهای بارگذاری و دما را بر استحکام شکست مخلوط های آسفالتی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند پایین ترین مقدار چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی در مد بارگذاری ترکیبی و در سهم کشش زیادتر به وقوع می پیوندد.

در تحقیقی دیگر پیر محمد و آیت اللهی [Pirmohammad, and Ayatollahi 2015] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر انواع مختلف قیر، انواع دانه بندی و مقدار فضای خالی با استفاده از آزمایش نمونه ترک دار با مقطع نیم دایره ای خمشی در مد های خالص I, II و ترکیبی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس پرداختند. نتایج آزمایش ها بیان کرد که قیر نرم تر، مقاومت شکست بیشتری نسبت به سایر قیرها و دانه بندی درشت تر مقاومت شکست بیشتری نسبت به دانه بندی ریزتر بخصوص در مد

در این بخش انتخاب نمونه آزمایشگاهی و تحلیل المان های محدود، روش طرح اختلاط آسفالت نیمه گرم و مراحل عملیات آزمایشگاهی به همراه نوع مصالح سنگی، قیر مصرفی و خصوصیات افزودنی های استفاده شده بیان خواهد شد. انتخاب نمونه آسفالتی برای انجام آزمایش های شکست تحت بارگذاری- های مختلف، اولین گام است. پس از انتخاب هندسه نمونه، تحلیل های اجزای محدود به منظور محاسبه ضرایب شکل انجام می شود. در این تحقیق از نمونه های ترک دار با مقطع نیم دایره ای خمشی که محل ترک نسبت به مرکز نیم استوانه می تواند تغییر کند استفاده شده است. شکل ۱ نحوه بارگذاری و انجام آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۱. نحوه بارگذاری و انجام آزمایش نمونه ترک دار با مقطع نیم دایره ای خمشی

با توجه به رفتار الاستیک مخلوط آسفالت گرم در دماهای پایین، در این تحقیق فرض گردید آسفالت نیمه گرم در دماهای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد دارای رفتار الاستیک و ضریب پواسون آن برابر ۰/۳۵ باشد. شکل نمونه های مورد ارزیابی در تحلیل به روش المان محدود به صورت SCB در نظر گرفته شد. از جمله دلایل انتخاب ساختار نمونه به صورت SCB عبارت بودند از:

دمای پایین به عنوان یکی از مهم ترین خرابی های مخلوط آسفالتی در مناطق سردسیر شناخته می شود. در این تحقیق رفتار مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با ساسوبیت در دمای پایین بررسی می شود.

یکی از مهمترین دلایل خرابی روسازی های آسفالتی در نواحی سردسیر، ترک خوردگی روسازی می باشد. بطوریکه سالانه بودجه زیادی برای بازسازی روسازی های آسفالتی آسیب دیده پرداخت می شود. فهمیدن مکانیسم ترک خوردگی در اثر تغییرات کاهش دمایی در مناطق سردسیر می تواند برای جلوگیری از ایجاد چنین خرابی هایی در روسازی در اینگونه مناطق مفید واقع گردد. بررسی تحقیقات گذشته در زمینه رفتار شکست مخلوط های آسفالتی نشان می دهد که آزمایش نیم دایره خمشی در مود های مختلف بارگذاری در بررسی رفتار دمای پایین مخلوط های آسفالتی مورد استفاده قرار می گیرد. از طرفی تکنولوژی آسفالت نیمه گرم در صنعت راهسازی کشور با توجه به رویکرد زیست محیطی و کاهش مصرف انرژی می تواند مورد توجه قرار گیرد. از این رو در این تحقیق، با توجه به وجود مناطقی با آب و هوای سرد در کشور، رفتار شکست مخلوط های آسفالتی نیمه گرم با مصالح محلی در مقایسه با آسفالت گرم مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. بنابراین هدف اصلی این پژوهش ارزیابی مقاومت شکست مخلوط های آسفالت گرم و نیمه گرم در دماهای پایین در مناطق سردسیر است. برای این منظور پس از انتخاب نمونه مناسب آزمایشگاهی، آنالیزهای المان محدود و آزمایش شکست برای تحلیل اثر مدهای بارگذاری کشش و برش خالص بر مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی گرم و نیمه گرم انجام خواهد شد و اثر دمای آزمایش بر مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی گرم و نیمه گرم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. مواد و روش ها

برای اینکه بتوان نتایج حاصل از یک مدل سازی را در موارد مشابه هندسی و بارگذاری استفاده کرد، باید آنها را به طریقی بی بعد نمود که مستقل از هندسه و بارگذاری باشند. برای بی بعد کردن نتایج بدست آمده برای قطعه نیم دیسک تحت بارگذاری خمشی می توان از روابط (۲) و (۳) استفاده کرد.

$$Y_I = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (2)$$

$$Y_{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (3)$$

که Y_I و Y_{II} ضریب شکل مدهای I و II و متغیرهای t, P, R و a به ترتیب بار متمرکز اعمالی بر قطعه، ضخامت نمونه، شعاع نمونه و طول ترک است که این مقادیر در تحلیل های اجزای محدود به ترتیب ۱۰۰۰ نیوتن، ۳۲، ۷۵ و ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. ضرایب شکل (K_{If}, K_{IIIf}) با استفاده از روابط (۴) و (۵) قابل محاسبه هستند که P_{Cr} بار بحرانی شکست بوده و از نتایج تست ها مشخص می شود. پارامتر K_{eff} یا ضریب شدت تنش موثر در ادامه بحث برای بیان ضریب شدت تنش بحرانی معادل در حالتی که نمونه ها تحت بارگذاری ترکیبی کششی - برشی قرار دارند، مورد استفاده قرار می گیرد و به صورت رابطه (۶) تعریف می شود. بدیهی است موقعی که قطعه تحت بارگذاری مد I خالص یا مد II خالص است، K_{eff} به ترتیب برابر K_{If} و K_{IIIf} خواهد بود.

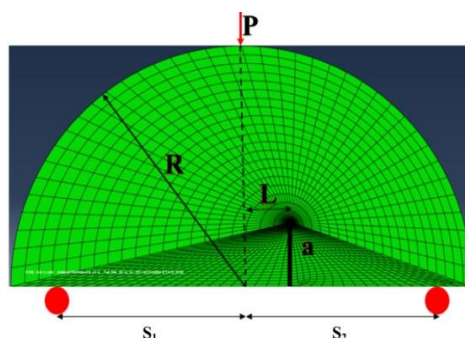
$$K_{If} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (4)$$

$$K_{IIIf} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II} \quad (5)$$

$$K_{eff} = \sqrt{K_{If}^2 + K_{IIIf}^2} \quad (6)$$

میزان مصالح سنگی موجود در مخلوط آسفالتی، سختی، تیزی گوشه، تمیزی، امکان جذب قیر و غیره در رفتار مخلوط آسفالتی موثر هستند. در این تحقیق از مصالح سنگی کوهی از یک معدن شن و ماسه با درصد بالای سیلیس استفاده شد. در جدول (۱) خواص مصالح سنگی مورد استفاده ارائه شده است.

سهولت تهیه این نوع نمونه با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری، سهولت ایجاد ترک لبه ای در این نوع قطعه، بارگذاری راحت آن، قابلیت ایجاد حالت های مختلف مودهای خالص کششی و برشی و حالت ترکیبی کششی-برشی. مطابق آنچه در شکل ۲ نمایش داده می شود، برای ایجاد مدهای مختلف کشش یا برش می توان فاصله تکیه گاه های پایینی را نسبت به ترک (فواصل S_1 و S_2)، یا محل ترک از وسط قطعه (فاصله L) را تغییر داد.



شکل ۲. ساختار کلی نمونه در تحلیل به روش المان محدود

با استفاده از نرم افزار آباکوس مقادیر S_1, S_2 و L برای ایجاد مود I، مود II به دست آمد. برای المان بندی کل مدل از المان مستطیلی ۸ گرهی استفاده شد. این المان ها در نوک ترک به صورت سینگولار بودند. در نهایت پس از انجام تحلیل های عددی در نرم افزار آباکوس، مقادیر ضرایب شدت تنش با استفاده از تکنیک J انتگرال محاسبه و استخراج گردید. به منظور تعیین نسبت مشارکت هر یک از مدهای I و II در حالت های مختلف بارگذاری مود ترکیبی پارامتر M^e به صورت رابطه (۱) تعریف می شود:

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

که در آن K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش (برحسب $MPa\sqrt{m}$) به ترتیب در مدهای I و II هستند. برای حالت مود I مقدار M^e برابر یک و برای حالت مود II مقدار این پارامتر برابر صفر خواهد بود.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه ها

مقدار	استاندارد	نوع آزمایش
۲/۴۱	ASTM C-127	وزن مخصوص
۲۳	AASHTO T-96	درصد سایش لس آنجلس
۱/۵	AASHTO T-85	جذب آب درشت دانه
۱	AASHTO T-84	جذب آب ریز دانه
۹۸	ASTM D5821	درصد شکستگی (یک جهت)
۹۰	ASTM D5821	در صد شکستگی (دو جهت)

شده است. در این پژوهش از افزودنی ساسوبیت نشان داده شده در شکل (۳) در ساخت مخلوط آسفالت نیمه گرم به منظور بررسی مقاومت شکست این مخلوط استفاده شده است. عمل اختلاط ساسوبیت با ۳ درصد وزنی با قیر در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد با مخلوط کن معمولی صورت پذیرفت. مشخصات مربوط به افزودنی ساسوبیت در جدول (۴) نشان داده شده است.

از طرح اختلاط مارشال که برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده و اصلاح نشده مناسب است برای تعیین قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. در این روش نمونه‌هایی با درصدهای مختلف قیر ساخته شده و با انجام آزمایش‌ها، مناسب ترین نمونه‌ای که پاس‌خگویی معیارهای طراحی باشد انتخاب می‌گردد. درصد قیر بهینه مصالح سیلیسی بر اساس نشریه ۱۰۱ و پیشنهادات نشریه انستیتو آسفالت MS-2، برای مصالح سیلیسی معادل با ۴/۹ درصد بدست آمد.

در این پژوهش از دانه بندی شماره چهار آیین نامه (نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور) با بزرگترین اندازه اسمی مصالح سنگی ۱۹ میلی‌متر در ساخت نمونه های آسفالتی استفاده شده است. در جدول (۲) جزئیات مربوط به دانه بندی مصالح سنگی نشان داده شده است.

قیر به عنوان عضو چسبنده در مخلوط با اینکه درصد وزنی پایینی به خود اختصاص می دهد، به دلیل رفتار ویسکوالاستیک تاثیر زیادی بر رفتار مخلوط آسفالتی دارد. این رفتار قیر باعث عملکرد متفاوت مخلوط های آسفالتی در دماهای مختلف شده است. با افزایش دما، قیر به مانند یک ماده ویسکوز عمل می کند که باعث بروز خرابی هایی مانند قیرزدگی، شیارافتادگی و کاهش استحکام برشی آسفالت می شود. در دماهای پایین، رفتار الاستیک قیر باعث شکنندگی مخلوط های آسفالتی و بیشتر شدن احتمال ترک خوردگی می شود. در پژوهش حاضر اثر قیر بر مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی قیر خالص ۶۰-۷۰ دیده شده است. مشخصات مربوط به قیرهای مورد استفاده در جدول (۳) ذکر

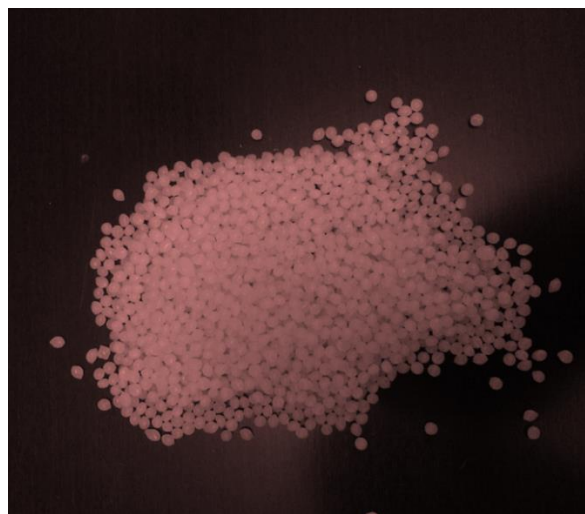
ارزیابی رفتار مخلوط آسفالت گرم و نیمه گرم در مناطق سردسیر با استفاده از اصول مکانیک شکست

جدول ۲. دانه بندی مخلوط مصالح سنگی در مقایسه با حدود مشخصات

اندازه الک (میلیمتر)	حدود مشخصات دانه بندی ۴ جدول ۹-۱-۹ نشریه ۲۳۴	دانه بندی استفاده شده
۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۹۴
۴/۷۵	۴۴-۷۴	۶۹
۲/۳۶	۲۸-۵۸	۴۶
۰/۳	۵-۲۱	۱۴
۰/۰۷۵	۲-۱۰	۵

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر ۶۰-۷۰ مورد استفاده در ساخت مخلوط های آسفالتی

شرح آزمایش	واحد	استاندارد	۶۰-۷۰
چگالی	$\frac{gf}{cm^3}$	ASTM D70	۱,۰۳
درجه اشتعال	°C	ASTM D92	۳۰۸
درجه نفوذ	°C	ASTM D5	۶۲
انگمی	Cm	ASTM D113	بیش از ۱۰۰
نقطه نرمی	°C	ASTM D36	۴۹
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه	$\frac{mm^2}{S}$	ASTM D2170	۸۱۰
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه	$\frac{mm^2}{S}$	ASTM D2170	۴۲۰
ویسکوزیته در ۱۵۰ درجه	$\frac{mm^2}{S}$	ASTM D2170	۲۳۲
نشانه درجه نفوذ (PI)	-	-	- ۱,۱۲



شکل ۳. ساسوبیت مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۴. مشخصات افزودنی ساسوبیت مورد استفاده در پژوهش

مشخصات	توضیحات
اجزای سازنده	هیدرو کربن پلی اتیلن آلفا تیک
حالت فیزیکی	پریل
رنگ	سفید
بو	بی بو
چگالی حجمی	۶۲۲ الی ۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب
نقطه اشتعال	۲۹۰ درجه سانتیگراد
حلالیت در آب	غیر قابل حل

تراکم به کار گرفته شده) بدست می آید که در نتیجه با برش هر نمونه ساخته شده با دستگاه ژیراتوری ۸ نمونه نیم دایره ای با ضخامت ۳,۲ سانتیمتر حاصل می شود. در ادامه نمونه های استوانه ای به نمونه های نیم دیسک تبدیل شده و ترک های لبه ای بر روی آنها ایجاد گردید.

در این تحقیق ابتدا، مخلوط های آسفالتی به شکل استوانه با ارتفاع ۱۶ سانتیمتر و در قطر ۱۵ سانتیمتر آماده شدند. سپس نمونه ها به شکل استوانه هایی کوچکتر در ضخامت ۳,۲ سانتیمتر برش پیدا کردند. بدین منظور از یک دستگاه برش با یک دیسک گردان برای بریدن نمونه ها استفاده گردید. برای حفظ خواص مکانیکی نمونه ها، عملیات برش با دقت بسیار زیاد و با پاشیدن آب خنک صورت گرفت. از هر استوانه ۱۶ سانتیمتری، ۴ قطعه کوچکتر با ضخامت ۳,۲ سانتیمتر تهیه گردید، در واقع نمونه ها به دیسک هایی نازکتر تبدیل شدند.

در مرحله بعد، برای بدست آوردن نمونه های نیم دایره ای دارای ترک از دستگاه برش برای تبدیل هر قطعه به دو نیم دایره استفاده گردید. محصول ایجاد شده، نمونه های آسفالتی در شکل های نیم دیسک بودند. در گام سوم، ترک هایی به مقدار ۲۰ میلیمتر در نیم دیسک ها با دقت زیاد ایجاد شدند. بدین ترتیب، ۱۱۰ نمونه نیم دایره ای ترک خورده برای انجام آزمایش های شکست تهیه شد.

در مرحله بعد، نمونه هایی با ۴ درصد فضای خالی توسط دستگاه متراکم کننده چرخشی ساخته می شود. برای این کار نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۶ سانتیمتر با وزن تقریبی ۶۱۰۰ گرم ساخته شد و با برش هر نمونه استوانه ای تعداد ۸ عدد نمونه نیم دایره ای تهیه گردید. در ادامه ترکی به طول ۲ سانتیمتر در مرکز، به فاصله ۵ میلیمتر، ۱۱ میلیمتر و ۱۶ میلیمتر از مرکز نیم دیسک ها ایجاد شد.

به منظور حذف رطوبت مصالح فراهم کردن شرایط مناسب اختلاط، قبل از تهیه نمونه های استوانه ای، مخلوط های آسفالتی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. پیش از اختلاط ساسوبیت به قیر، قیر تا دمای ۱۲۵ درجه سانتیگراد گرم می شود، سپس ۳ درصد وزن قیر، ساسوبیت به قیر اضافه می شود، در ادامه عمل اضافه کردن قیر حاوی ساسوبیت به مصالح سنگی در ظرفی که از پیش گرم شده است با رعایت میزان قیر بهینه صورت می گیرد.

متراکم کننده ژیراتوری دستگاهی است که قابلیت ثبت داده هایی از قبیل ارتفاع، درصد فضای خالی، وزن مخصوص بتن آسفالتی و تنش تراکم را دارد. نمونه ها با دور ۹۰ چرخش ژیراتوری با زاویه داخلی قالب ۱,۱۶ و با فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال متراکم گردیدند. با توجه به وزن مصالح ریخته شده در داخل قالب ارتفاع نمونه حاصله در حدود ۱۶ الی ۱۷ سانتیمتر (بسته به انرژی

جدول های (۶) الی (۸) برای مخلوط های آسفالتی نشان داده شده است.

۲-۳ بار بحرانی شکست نمونه های آسفالتی در

حالت برش خالص

در حالت بارگذاری برش خالص تکیه گاه های پایین به صورت متقارن نسبت به ترک و ترک در وسط لبه پایینی قرار گرفت. با ثبت بار شکست بحرانی نمونه ها، ضرایب شدت تنش بحرانی (K_{III}) از رابطه (۵) محاسبه گردید. این مقادیر به همراه میانگین بارهای بحرانی در جدول های (۹) الی (۱۱) برای مخلوط های آسفالتی نشان داده شده است.

در آسفالت گرم و نیمه گرم حاوی ۳ درصد ساسوبیت با کاهش دما، ضریب شدت تنش بحرانی در مد خالص کشش و برش (K_{IC} , K_{IIC}) افزایش می یابد. این رفتار مخلوط آسفالتی در برابر دما را می توان به تغییر در ساختار خرابی آسفالت و اجزای آن شامل مصالح سنگی، قیر و ارتباط قیر و مصالح سنگی نسبت داد. خرابی مصالح سنگی تحت تاثیر دما نیست، در حالی که قیر و ارتباط قیر و مصالح سنگی به میزان قابل توجهی تحت تاثیر دما هستند. با کاهش دما، مقدار قیر موجود در مخلوط آسفالتی منقبض و منجر به افزایش ویسکوزیته شده، در نتیجه مقاومت قیر افزایش می یابد. با توجه به مطالب گفته شده می توان نتیجه گرفت که با کاهش دما، مقاومت قیر و چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر افزایش پیدا کرده که منجر به افزایش مقاومت شکست آسفالت نیمه گرم حاوی ساسوبیت در مد خالص کشش و برش شده است.

آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن و تحت بارگذاری استاتیک و با نرخ ثابت بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت ترسیم منحنی نیرو-جابجایی، اندازه گیری بار بحرانی شکست و تعیین میزان چقرمگی شکست هر یک از مخلوط های آسفالتی را داراست. چقرمگی شکست میزان مقاومت در مقابل شکست ناگهانی یا سریع مواد را در حضور ترک بیان می کند. مخلوط های آسفالتی باید مقاومت شکست قابل قبولی داشته باشند تا بتوانند در برابر تنش های اعمال شده در دماهای مختلف مقاومت کنند. قبل از شروع آزمایش هر یک از مخلوط های آسفالتی مورد نظر به مدت ۱۲ ساعت در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد قرار داده شدند تا تمام جسم نمونه ها از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشند.

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش های صورت گرفته بر روی مخلوط های آسفالتی نیمه گرم مورد تحلیل قرار گرفته است. متغیرهای مساله شامل مد بارگذاری و دمای انجام آزمایش هستند. مقادیر ضریب شدت تنش و ضرایب شکل در مد های مختلف بارگذاری در جدول (۵) آورده شده است.

۳-۱ بار بحرانی شکست نمونه های آسفالتی در

حالت کشش خالص

با ساخت سه نمونه برای هر آزمایش، نمونه ها در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد هم دما شده و بر اساس شرایط بارگذاری نشان داده شده در جدول (۵) تحت بارگذاری سه نقطه ای قرار گرفتند. در این حالت ترک نمونه های آسفالتی مورد نظر در وسط دستگاه یونیورسال قرار گرفته و با انجام آزمایش بار شکست بحرانی نمونه ها توسط دستگاه ثبت گردید و در پایان با استفاده از رابطه (۴) ضرایب شدت تنش بحرانی (K_{If}) محاسبه گردید. این مقادیر به همراه میانگین بارهای بحرانی در

جدول ۵. نتایج عددی برای ایجاد انواع مود های مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه خمشی نیم دایره

مود بارگذاری	M^e	S_1	S_2	L	K_I (MPa \sqrt{m})	K_{II} (MPa \sqrt{m})	Y_I	Y_{II}
مود I	۱	۵۰	۵۰	۰	۰/۱۹۵	۰	۳/۷۳۴	۰
مود II	۰	۲۰	۵۰	۱۶	۰	- ۰/۱۲۰	۰	۲/۲۹۸

جدول ۶. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد I خالص در دمای صفر درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{If} (MPa. m $^{0.5}$)
آسفالت نیمه گرم	۴/۱۲	۰/۷۸۳
آسفالت گرم	۵/۳۱	۱/۱۱۷

جدول ۷. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد I خالص در دمای منفی ۱۰ درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{If} (MPa. m $^{0.5}$)
آسفالت نیمه گرم	۴/۴۵	۰/۸۵۹
آسفالت گرم	۵/۹۹	۱/۱۷۰

جدول ۸. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد I خالص در دمای منفی ۲۰ درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{If} (MPa. m $^{0.5}$)
آسفالت نیمه گرم	۵/۲۶	۱/۲۱۵
آسفالت گرم	۶/۹۸	۱/۴۵۰

جدول ۹. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد II خالص در دمای صفر درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{IIf} (MPa. m $^{0.5}$)
آسفالت نیمه گرم	۹/۱۲	۱/۰۸۵
آسفالت گرم	۹/۲۱	۱/۱۹۴

جدول ۱۰. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد II خالص در دمای منفی ۱۰ درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{IIf} (MPa. m $^{0.5}$)
آسفالت نیمه گرم	۱۰/۲۲	۱/۲۶۲
آسفالت گرم	۱۰/۴۵	۱/۲۶۹

ارزیابی رفتار مخلوط آسفالت گرم و نیمه گرم در مناطق سردسیر با استفاده از اصول مکانیک شکست

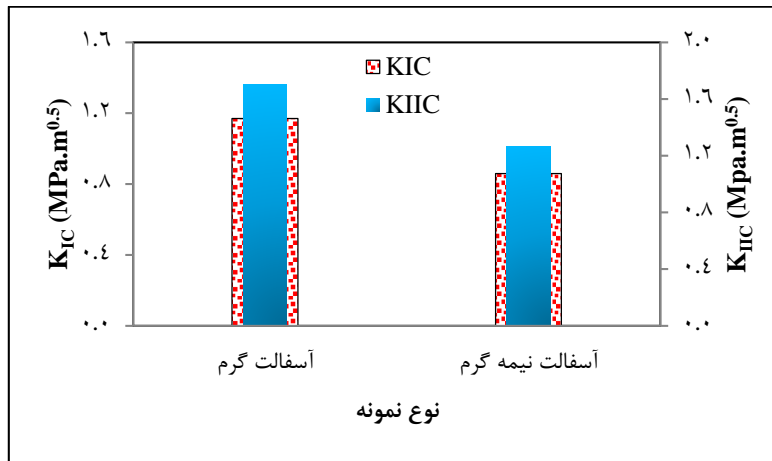
جدول ۱۱. نتایج آزمایش شکست نمونه ها در مد II خالص در دمای منفی ۲۰ درجه سلسیوس

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N)	K_{IIIc} (MPa.m ^{0.5})
آسفالت نیمه گرم	۱۲/۱۶	۱/۴۸۷
آسفالت گرم	۱۲/۳۶	۱/۴۶۵

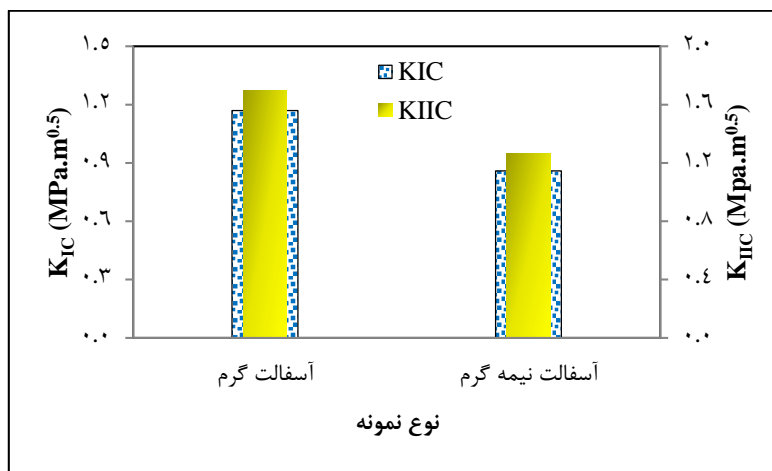
۳-۳ تحلیل مدهای مختلف بارگذاری

همچنین از مقایسه مخلوط آسفالتی گرم و نیمه گرم (حاوی ۳ درصد ساسوبیت) در شکل های (۴) الی (۶) می توان نتیجه گرفت که مخلوط آسفالتی حاوی ۳ درصد ساسوبیت از مقاومت شکست کمتری نسبت به آسفالت گرم برخوردار است. علت این

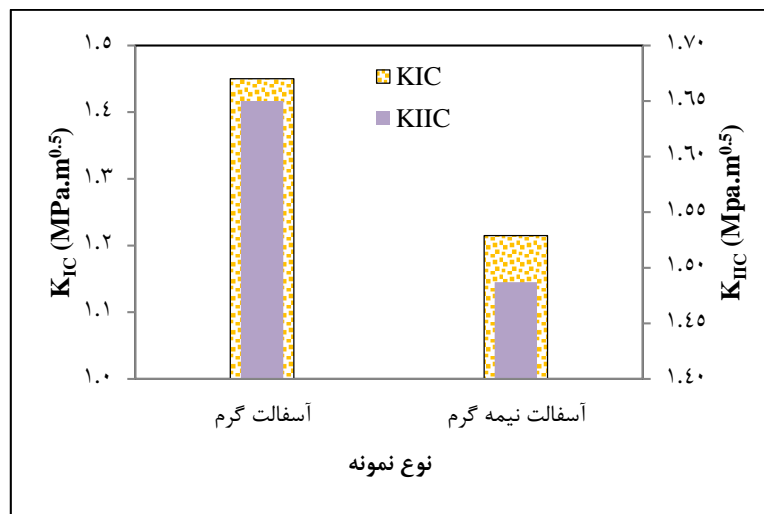
امر را می توان اینطور توجیه کرد که مخلوط آسفالتی گرم مقدار ضریب شدت تنش بحرانی (KIC) بیشتری نسبت به آسفالت نیمه گرم برخوردار است که این امر منجر می شود که در آسفالت گرم شروع رشد ترک در منطقه نوک ترک، نیاز به تنش بیشتری در مقایسه با آسفالت نیمه گرم هست. از اینرو، مقاومت آسفالت گرم در برابر شروع ترک بیشتر از آسفالت نیمه گرم هست.



شکل ۴. مقایسه مقاومت شکست آسفالت نیمه گرم و گرم در دمای صفر درجه



شکل ۵. مقایسه مقاومت شکست آسفالت نیمه گرم و گرم در دمای -۱۰ درجه



شکل ۶. مقایسه مقاومت شکست آسفالت نیمه گرم و گرم در دمای ۲۰- درجه

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش مقاومت شکست مخلوط های آسفالت گرم و نیمه گرم حاوی ساسوبیت در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد در مدهای مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه ها به شکل نیم دایره ای ترک دار ساخته شدند و تحت دو مد، (کشش خالص و برش خالص) بارگذاری شدند. از تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش ها، نتایج زیر حاصل شده است:

- نمونه های نیم دایره ای ترک دار، نمونه های مناسبی برای مدل سازی در آباکوس و بدست آوردن بار شکست نمونه ها در آزمایش شکست هستند.
- در آسفالت گرم و نیمه گرم حاوی ۳ درصد ساسوبیت با کاهش دما، ضریب شدت تنش بحرانی در مد خالص کشش و برش (K_{IIC} , K_{IC}) افزایش می یابد.
- مخلوط آسفالتی حاوی ۳ درصد ساسوبیت (مخلوط نیمه گرم) از مقاومت شکست کمتری نسبت به آسفالت گرم برخوردار است.
- با کاهش دما، مقاومت شکست هر دو نوع آسفالت (آسفالت گرم و نیمه گرم) افزایش می یابد.

۵. منابع

- Ayatollahi, M. R. and Pirmohammad, S., (2013) "Experimental Determination of Mode II Fracture Resistance in Asphalt Concretes", 13th International Conference on Fracture, June 16–21, Beijing, China.
- Fuan, S., Ke, M., Kanghe, L., Kun, L. and Aliha, M. R. M. (2021) "Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete", Construction and Building Materials, Vol. 276, pp. 122181.
- Gong, J., Han, X., Su, W., Xi, Z., Cai, J., Wang, Q. and Xie, H. (2020) "Laboratory evaluation of warm-mix epoxy SBS modified asphalt binders containing Sasobit", Journal of Building Engineering, Vol. 32, pp. 101550.
- Hamzah, M. O., Golchin, B., Jamshidi, A. and Chailleux, E. (2015) "Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 809-831.
- Karimzadeh, H., Razmi, A., Imaninasab, R., and Esminejad, A. (2019) "The influence of

asymmetric four-point bend specimens", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 97, pp. 41.

- Rubio, M. C., Martinez, G., Baena, L., and Moreno, F. (2012) "Warm mix asphalt: An overview", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 24, No. 76, pp. 84.

- Sdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M., and Aliha, M. R. M. (2021) "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete", *Composites Communications*, Vol. 25, pp. 100684.

- Shahryari, N., Keymanesh, M. R. and Aliha, M. R. M. (2021) "Specimen type effect on measured low-temperature fracture toughness of asphalt concrete", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 44, No. 2, pp. 551-567.

- Xiongzhou, Y., Yuze, T., Qinglin, L., Song, L., Qianwen, D. and Aliha, M. R. M. (2021) "K_{Ic} and K_{IIc} measurement for hot mix asphalt mixtures at low temperature: Experimental and theoretical study using the semicircular bend specimen with different thicknesses", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 44, No. 3, pp. 832-846.

- Xu, S., Xiao, F., Amirhanian, S., and Singh, D. (2017) "Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 142, pp. 148-161.

- Ye F, Yang J, and Huang P. (2006) "Performance of modified asphalt aging under ultraviolet radiation", *Pavement mechanics and performance*, pp. 102.

natural and synthetic fibers on mixed mode I/II fracture behavior of cement concrete materials", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 46, No. 12, pp. 1081.

- Li X., and Marasteanu M. (2010) "Using semicircular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete", *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No. 7, pp. 867.

- Li, Q., Zhang, H. and Chen, Z. (2021) "Improvement of short-term aging resistance of styrene-butadiene rubber modified asphalt by Sasobit and epoxidized soybean oil", *Construction and Building Materials*, Vol. 271, pp. 121870.

- Mirsayar, M. M., Razmi, A., Aliha, M. R. M., and Berto, F. (2018) "EMTSN criterion for evaluating mixed mode I/II crack propagation in rock materials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 190, pp. 186.

- Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M. R. (2014) "Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions", *Construction and Building Materials*, Vol. 53, pp. 235.

- Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M. R. (2015) "Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 110, pp. 149.

- Prowell B, Hurley G, and Frank B. (2011) "Warm-mix asphalt: best practices", *National Asphalt Pavement Association*.

- Razavi, S., Aliha, M., and Berto, F. (2018) "Application of an average strain energy density criterion to obtain the mixed mode fracture load of granite rock tested with the cracked

- Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M. R. M., Pirmohammad, S. and Haghshenas, H. F. (2021) "Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes", Construction and Building Materials, Vol. 300, pp. 124130.

بابک گلچین، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه ارومیه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. وی در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه یو اس ام مالزی گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه محقق اردبیلی با مرتبه استادیاری است.



زریر کوزه گر کالجی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مصالح ساختمانی در حوزه مخلوط های آسفالتی و مخلوط های بتنی می باشد.



رامین مشک آبادی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۸۳ و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه تبریز اخذ نمود. وی در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک از دانشگاه تهران گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان مکانیک شکست بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه محقق اردبیلی با مرتبه استادیاری است.

