

بررسی آماری چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین بر اساس مدل پیش‌بینی وایبول

محمد رضا محمد علیها^{۱*}، حمید بهبهانی^۲، حمیدرضا فتاحی^۳

- ۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

*mrm_aliha@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۴/۰۷/۲۷]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۲/۱۲]

چکیده

ترک‌های دمای پایین در روسازی آسفالتی یکی از عوامل تخریب و خرابی راه‌ها است. پس بررسی رفتار شکست و مقاومت ترک‌خوردگی روسازی آسفالتی بسیار مهم ارزیابی می‌شود. به دلیل ساختار چند جزئی مخلوط‌های آسفالتی، پراکندگی داده‌های آزمایشگاهی برای این مواد از سایر مواد همگن و تک فازی بیشتر است و در نتیجه برای بررسی رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی باید از تعداد بیشتری از نمونه‌های آزمایشگاهی و نیز مدل‌های آماری استفاده نمود. در این پژوهش برای بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی تعداد زیادی آزمایش چقرمگی شکست مود I روی نمونه‌های نیم دیسک خمشی آسفالتی در دو فضای خالی ۴ و ۷ درصد در دمای ۱۰- درجه سلیسیوس انجام شد. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های چقرمگی شکست و با استفاده از مدل توزیع تجمعی وایبول، به تحلیل آماری و ارائه مدل پیش‌بینی نمونه‌های ترک‌دار در دو فضای خالی آزمایش شده پرداخته شد. نشان داده شد که با استفاده از مدل آماری وایبول دو و سه پارامتری می‌توان مشخصات شکست مخلوط‌های آسفالتی با درصد فضای خالی مختلف را تنها با انجام آزمایش شکست روی یک نمونه آسفالتی و با فضای خالی مشخص پیش‌بینی نمود.

واژگان کلیدی: چقرمگی شکست، مود کششی بارگذاری، مدل وایبول، ترک‌های برودتی دمای پایین، مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی.

۱- مقدمه

شده و تقریباً به‌طور عمود نسبت به محور روسازی امتداد دارند. همچنین ایجاد این ترک‌ها ناشی از تغییرات دمایی و تنش‌های کششی روسازی است [2]. از سوی دیگر آسفالت در دمای پایین خاصیت ترد و شکننده از خود نشان می‌دهد و رفتار آن معمولاً به صورت الاستیک و خطی بررسی می‌شود. پژوهشگران برای بررسی مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در

ترک‌های دمای پایین از معمول‌ترین خرابی‌های آسفالت در مناطق سرد و یخبندان است. مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مانند نوع مصالح، نوع قیر، دانه‌بندی مصالح و درصد فضای خالی آسفالت تاثیر زیادی بر رفتار ترک‌خوردگی آسفالت دارند [1]. ترک‌های برودتی بیشتر در وسط عرض روسازی

آزمایش چقرمگی شکست باید دارای هندسه‌ای ساده بوده، تهیه و آماده‌سازی آن به‌سادگی انجام پذیرد و امکان بارگذاری، آزمایش و تسهیل در قرارگیری قید و بندها وجود داشته باشد [6]. از بین نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی، نمونه‌های نیم دیسک با ترک لبه‌ای تحت بار خمش سه نقطه‌ای (SCB³) هماهنگی بهتری با ویژگی‌های فوق دارد. در سال‌های اخیر پژوهشگران مکانیک شکست از نمونه‌های SCB برای تحلیل شکست مواد سنگی و مخلوط‌های آسفالتی به دفعات استفاده کرده‌اند [1, 7, 8]. به عنوان نمونه، لی و ماراستینو برای بررسی مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین، از آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های SCB استفاده کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از تحلیل الاستیک خطی داده‌های آزمایش شکست به نتایج قابل قبولی در بررسی مقاومت ترک خوردگی آسفالت دست یافتند [9]. با آنکه پژوهش‌های بسیاری [10-12] روی ویژگی‌های شکست مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است اما بیشتر این پژوهش‌ها با محوریت بررسی میانگین چقرمگی شکست روی تعداد محدودی از نمونه‌های آسفالتی صورت گرفته است. از سوی دیگر، به دلیل وجود ناهمگونی و عیوب ذاتی مانند ریزترک‌ها و تخلخل، انتظار می‌رود پراکندگی زیادی در مقادیر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مشاهده شود. در نتیجه مقادیر میانگین چقرمگی شکست حاصل از تعداد محدودی از نمونه‌ها نمی‌تواند مقدار درستی از این پارامتر را ارائه دهد. از این رو بررسی آماری چقرمگی شکست با تعداد زیادتری از نمونه‌های آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند داده‌های مناسب‌تر و ارزشمندتری برای بررسی رفتار شکست این مواد ارائه نماید. همانطور که اشاره شد، بعد از ایجاد ترک اولیه در قیر مخلوط آسفالتی، رشد و گسترش ترد این ترک، بیشتر وابسته به مشخصات مخلوط آسفالتی خواهد بود که یکی از تاثیر گذارترین این عوامل، درصد فضای خالی مخلوط است. تخلخل و فضای خالی تاثیر به سزایی بر مقاومت ترک خوردگی آسفالت دارند. به گونه‌ای که به علت توزیع نامناسب فضای خالی در بتن آسفالتی امکان ایجاد تمرکز تنش در نمونه‌های آسفالتی بسیار بالا می‌رود. هرچه فضای خالی در اطراف جبهه ترک بیشتر باشد، رشد ترک و شکست

دمای پایین از مبانی مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) استفاده می‌کنند [1, 3, 4]. مکانیک شکست نخستین بار به وسیله مجیدزاده برای تحلیل ترک‌های آسفالتی استفاده شد [5]. پارامترهای مختلفی برای بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده که یکی از مهمترین و پرکاربردترین آنها، چقرمگی شکست^۲ یا ضریب شدت تنش بحرانی است که به عنوان معیاری از مقاومت آسفالت در برابر رشد و گسترش ترک بیان می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، تغییرات دمایی، تنش‌های کششی را در آسفالت ایجاد می‌کنند و بواسطه همین تنش‌ها مود I شکست (که مود بازشونده وجوه ترک است) در تغییر فرم ترک‌های موجود در سطح یک رویه آسفالتی به عنوان مود غالب شکست مشاهده می‌شود [1]. اگر قطعه ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند قطعه تحت مود I شکست یا مود کششی قرار می‌گیرد (شکل 1-a). همچنین در مود II بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و عمود بر جبهه ترک است (شکل 1-b). اگر بارگذاری به صورت ترکیبی از هر کدام از این دو مود باشد حالت بارگذاری مود ترکیبی کششی - برشی به وجود می‌آید (شکل 1-c).

شکل ۱. مدهای مختلف شکست در قطعات ترک‌دار [6]

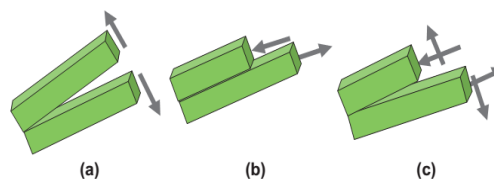


Fig. 1. Fracture Modes

به منظور تعیین چقرمگی شکست، پژوهشگران از آزمایش‌های شکست نمونه‌های آسفالتی برای این هدف استفاده می‌نمایند. در انجام آزمایش‌های مکانیک شکست آسفالت، یکی از عوامل تاثیرگذار بر ضریب شدت تنش مخلوط‌های آسفالتی، هندسه نمونه‌های آزمایشگاهی است. با مرور پژوهش‌های گذشته، می‌توان دریافت یک قطعه مناسب آزمایشگاهی برای انجام

1 . Linear Elastic Fracture Mechanics
2 . Fracture Toughness

دارد. K_0 ضریب نرمالیزه کردن یا پارامتر مقیاس و برابر با K_{IC} متناظر با احتمال شکست 0.632 است و K_{min} حد پایین چقرمگی شکست است که برای مقادیر کمتر از آن رشد ترک غیرممکن است. از آنجا که یافتن مقدار واقعی K_{min} توسط آزمایش مشکل است، بیشتر از توزیع دو پارامتری وایبول برای بیان پراکندگی چقرمگی شکست استفاده می‌شود. با صفر در نظر گرفتن مقدار K_{min} ، رابطه (۱) بدین شکل ساده می‌شود:

$$P_f(K_c) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_c}{K_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

برای محاسبه احتمال شکست هر نمونه روابط مختلفی وجود دارد، یکی از روش‌های رایج، استفاده از روش مرتب شده^۳ است که در آن احتمال انباشته شکست (P_f) به کمک رابطه (۲) تخمین زده می‌شود [16]:

$$P_f = \frac{J - 0.5}{N} \quad (2)$$

N : تعداد کل نمونه‌ها: ۲۰ و ۱۰۰ ...

تادینوف و هاینینگ در پژوهش‌های جداگانه تابع توزیع وایبول را برای بررسی مکانیک شکست مواد معتبر دانسته و با دیگر توابع آماری مقایسه کردند [17, 18]. در ادامه چگونگی یافتن پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی و بررسی آماری نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی توضیح داده می‌شود.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور بررسی آماری مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، تعدادی نمونه آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی گرم ساخته شد. برای یافتن قیر بهینه طرح آسفالت از روش مارشال و برای ساخت نمونه‌های آزمایش شکست از تراکم ژیراتوری استفاده شد. در بخش بعد مشخصات مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده ارائه شده است.

۳-۱- مصالح آزمایشگاهی

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش سنگدانه

نمونه‌ها تسریع می‌شود [6]. علیها و همکاران [1] و همچنین آیت‌اللهی و پیرمحمد [2] در پژوهش‌های جداگانه‌ای به بررسی تاثیر درصد فضای خالی بر چقرمگی شکست آسفالت پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که افزایش درصد فضای خالی نسبت به دیگر مشخصات آسفالت، تاثیر بیشتری بر کاهش مقاومت ترک خوردگی آسفالت داشته و مقدار پراکندگی مقادیر چقرمگی شکست نیز بیشتر از پراکندگی سایر مشخصات آسفالت است.

با وجود این مرور منابع و مقالات موجود نشان می‌دهد که بررسی رفتار آماری چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پس در این پژوهش با انجام مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های آسفالتی با درصد فضای خالی مختلف به ارائه مدل احتمال آماری برای بررسی پراکندگی مقادیر بدست آمده پرداخته می‌شود. با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان مقادیر اصلی پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی (مانند میانگین چقرمگی شکست که یکی از پارامترهای اصلی در برآورد عمر و تشخیص زمان تعمیر و نگهداری رویه‌های آسفالتی است) را با توزیع آماری مناسب پیش‌بینی نمود و اعتبار مدل آماری بررسی شده را برای شکست نمونه‌های آسفالتی اثبات نمود. در بخش بعد به بررسی مدل آماری این پژوهش پرداخته شده است.

۲- مکانیک شکست آماری

۲-۱- تابع توزیع وایبول^۱

در مواد ترد و شکننده، معیار شکست ضعیف‌ترین پیوند^۲ نخستین بار به وسیله وایبول برای تخمین رفتار شکست مواد ارائه شده است [13]. والین [14] با بازنویسی تابع توزیع احتمال وایبول [15]، تابع احتمال شکست مواد ترد و شکننده را به صورت ذیل تعریف کرد:

$$P_f(K_c) = 1 - \exp \left[- \left[\frac{K_c - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right]^m \right] \quad (1)$$

در این رابطه K_0 ، K_{min} پارامترهای وایبول و K_{IC} چقرمگی شکست است. m مدول وایبول یا پارامتر شکل نام

1 . Weibull Distribution Function

2 . Weakest Link Theory

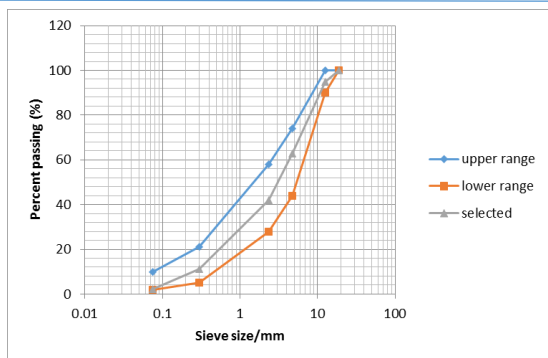


Fig. 2. Gradation of designed aggregates

شکل ۳. چگونگی ساخت نمونه‌های SCB

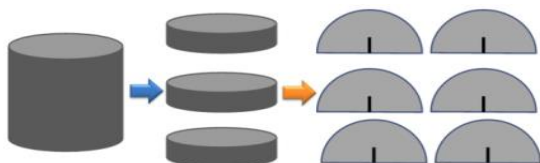


Fig. 3. Different steps for preparing the semi-circular bend test specimens

۳-۳- ساخت نمونه‌های ژیراتوری و عملیات برش

به منظور انجام تست‌های مکانیک شکست روی آسفالت و نمونه‌های SCB، نمونه‌های ژیراتوری با قالب‌های استوانه‌ای ۵ کیلوگرمی به قطر ۱۵cm ساخته شد. در این پژوهش در کل ۸ نمونه استوانه‌ای با ارتفاع حدود ۱۳ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر توسط دستگاه تراکم ژیراتوری برای دو فضای خالی ۴ و ۷ درصد ساخته شد. پس از ساخت استوانه‌های آسفالتی، برای برش و ساخت قطعات SCB، نمونه‌های استوانه‌ای را درون یک فیکسچر قرار داده و به وسیله دستگاه برش الماسه مطابق شکل (۳) برش داده تا نمونه‌های نیم دایره‌ای شکل به ضخامت تقریبی ۳ سانتی‌متر ایجاد شود. همان‌گونه که در شکل (۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است از هر نمونه استوانه‌ای ۳ نمونه دیسک دایره‌ای و در نهایت ۶ نمونه SCB به دست می‌آید. در این پژوهش از آنجا که دو فضای خالی مختلف در نظر گرفته شده است، برای آزمایش هر حالت تعداد ۲۰ نمونه SCB در نظر گرفته شد، که در کل ۴۰ قطعه SCB برای انجام آزمایش‌ها شکست در دمای ۱۰- سیلیسیوس ساخته و تحت بارگذاری مونوتونیک با دستگاه تست با ظرفیت ۱۵ تَن با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. در نتیجه بار بحرانی شکست هر یک از نمونه‌ها به منظور محاسبه

سیلیسی رودخانه‌ای شکسته شده است که از معدن چولاب واقع در کیلومتر ۶۰ جاده ساوه- تهران تهیه شده است. مصالح سنگی استفاده شده، سخت، محکم، با دوام و عاری از هرگونه مواد آلی رسی بوده است. فیلر مصرفی در نمونه‌ها نیز به صورت پودر سنگ‌آهک به نمونه‌های آسفالتی افزوده شد. نوع قیر مصرفی نیز قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شد. با انجام یکسری آزمایش‌ها روی مصالح سنگی و قیر مصرفی، مشخصات آن‌ها به ترتیب در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است. همچنین حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی ایران برای دانه‌بندی مصالح سنگی این پژوهش منظور شده و در شکل (۲) نشان داده شده است.

۳-۲- طرح مارشال مخلوط‌های بتن آسفالتی

چنانچه ذکر شد، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی از آزمایش مارشال محاسبه شد و پس از اعمال ضوابط و حدود آیین‌نامه‌ای مقدار قیر بهینه برای مصالح سنگی سیلیسی ۵/۵ درصد تعیین شد.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

Test	Standard test	result
Viscosity Test at 135°C (cSt)	ASTM D2170	364
Penetration Test (dm)	ASTM D5	95
Ductility Test (cm)	ASTM D113	100
Softening point (°C)	ASTM D36	45.6
Flash point (°C)	ASTM D92	290
Specific Gravity	ASTM D70	1.015

Table 1. Properties of virgin asphalt binder

جدول ۲. مشخصات قیر

Test	Unit	60.70	Standard
Penetration	mm.10	68	ASTM D-5
Softening point	°c	49.3	ASTM D-36
Ductility	cm	120	ASTM D-113
Specific gravity	gr.cm3	1.0207	ASTM D-70
Flash point	°c	290	ASTM D-92
Loss on Heating	%	0.08	ASTM D-6
Solubility in TCE	%	99.7	ASTM D-2042

Table 2. Specification of binder

شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی

ضخامت نمونه برابر با $t = 7.5 \text{ mm}$ ، طول ترک برابر با $a = 30 \text{ mm}$ و ضریب هندسه قطعه است که برای نمونه SCB با 20 mm و Y ضریب هندسه قطعه است که برای نمونه SCB آزمایش شده با نسبت $S/R = 0.6$ و $a/R = 0.3$ در این پژوهش مقدار آن از مرجع [1, 20] برابر با $3/734$ است. به منظور یافتن پارامترهای وایبول، الگوریتم برازش منحنی به روش کمینه مجموع مربعات بکارگرفته شده است. با استفاده از این روش و به کمک نرم افزارهای MATLAB و SigmaPlot پارامترهای توزیع پراکندگی وایبول برای درصد فضای خالی پایه که در این پژوهش، ۴ درصد است، بدست آمدند. سپس با اعمال ضریبی که به عنوان ضریب انتقال تعریف می‌شود، پارامترهای توزیع پراکندگی وایبول برای پیش بینی داده‌های شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی فضای خالی محاسبه می‌شود. برای تعیین ضریب انتقال، با در نظر گرفتن رابطه ضریب شدت تنش و فضای خالی براساس آزمایش‌های تجربی پژوهشگران قبلی در شرایط آزمایشگاهی مشابه با این پژوهش یک رابطه خطی بین K_{If} و درصد فضای خالی تعیین شد تا با استفاده از آن مقدار K_{If} در هر درصد فضای خالی بدست آید.

در نتیجه نمودار K_{If} -Void(%) برای مصالح سیلیسی براساس آزمایش‌های آیت الهی و پیرمحمد [6] که شرایطی مشابه با شرایط آزمایشگاهی این پژوهش دارد، رسم شد (شکل ۶). پس از رسم نمودار، ضریب انتقال برابر با نسبت ضریب شدت تنش فضای خالی مورد نظر به ضریب شدت تنش فضای خالی پایه در نظر گرفته شد. پس از محاسبه ضرایب انتقال و پارامترهای توزیع وایبول برای مصالح سیلیسی، برای پیش‌بینی پارامترهای وایبول درصد فضای خالی هدف از رابطه (۴) استفاده شد، بدین ترتیب. مقدار ضریب انتقال درصد فضای خالی ۷ درصد، برابر 0.799 بدست آمد.

$$m_{4\%} = m_{7\%}$$

$$K_{0(7\%)} = \left(\frac{\bar{K}_{7\%}}{\bar{K}_{4\%}} \right) \times K_{0(4\%)} \quad (۴)$$

$$K_{\min(7\%)} = \left(\frac{\bar{K}_{7\%}}{\bar{K}_{4\%}} \right) \times K_{\min(4\%)}$$

شکل ۶. نمودار تجربی ضریب شدت تنش بر حسب درصد فضای خالی

حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۶]

چقرمگی شکست مود I هر قطعه SCB انجام و تحلیل‌های آماری از انجام آزمایش‌های شکست ثبت شد.

شکل ۴. نمونه SCB پس از بارگذاری



Fig. 4. Fracture path observed for the SCB specimen after fracture test

شکل ۵. نمودار خطی بار-جابجایی نمونه آسفالتی پس از شکست

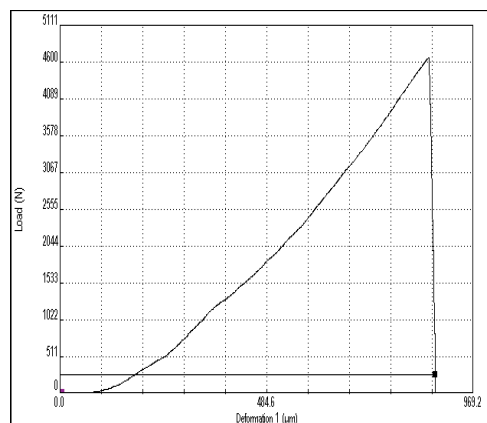


Fig. 5. Load-displacement diagram for one of the tested HMA samples.

۴- تحلیل آماری

مقدار ضریب شدت تنش بحرانی هر قطعه در لحظه شکست براساس رابطه (۳) محاسبه شده [19] و پس از انجام آزمایش هر ۲۰ قطعه با فضاهای خالی ۴٪ و ۷٪، مقادیر چقرمگی شکست بر طبق روش مرتب شده از مقادیر کوچک به بزرگ به صورت صعودی در جدول (۴) مرتب شده‌اند.

$$K_{Ic} = \frac{P_{Cr} \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{2 R \cdot t} \quad (۳)$$

در رابطه بالا K_{Ic} چقرمگی شکست هر قطعه و P_{Cr} نیروی بحرانی حاصل از آزمایش شکست، R شعاع نمونه که برابر با

K_{avg}	m	K_0	K_{min}	Air void
0.856	3.399	0.8924	0.5076	4%
0.6554	2.127	0.679	0.4738	7%

Table 4. Three-parameter Weibull distribution parameters determined for the tested asphalt mixture with different air voids contents

۵- نتایج تحلیل‌ها

نتایج و تحلیل‌های صورت گرفته به صورت نمودار و جداول (۳ و ۴) ارائه شده است:

باتوجه به نتایج چقرمگی شکست جدول (۳) بدست آمده و جدول (۴) که مقادیر پارامترهای اصلی و ایبول داده‌های آزمایشگاهی است، می‌توان احتمال شکست هر نمونه هدف را از رابطه ذیل محاسبه کرد:

$$P_j = 1 - EXP \left(- \left[\frac{K_j - \alpha \cdot K_{min\ i}}{\alpha \cdot K_{0i} - \alpha \cdot K_{min\ i}} \right]^m \right) \quad (5)$$

که در آن ضریب انتقال α ، براساس شکل (۶) به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\alpha_{ji} = \frac{K_j}{K_i} \quad (6)$$

در نتیجه ضرایب مدل پیش‌بینی سه پارامتری و ایبول برای مخلوط آسفالتی با درصد فضای خالی ۷ درصد بصورت ذیل محاسبه شده است:

$$K_{0(7\%)} = \left(\frac{K_{(7\%)}}{K_{(4\%)}} \right) \times K_{0(4\%)} = 0.799 \times 0.8924 = 0.713 \text{ MPa} \cdot m^{0.5} \quad (7)$$

$$K_{min(7\%)} = \left(\frac{K_{(7\%)}}{K_{(4\%)}} \right) \times K_{min(4\%)} = 0.799 \times 0.5076 = 0.4055 \text{ MPa} \cdot m^{0.5} \quad (8)$$

ضرایب بالا در جدول (۵) گردآوری شده و با قرار دادن این ضرایب در رابطه (۵) مدل پیش‌بینی احتمال شکست مخلوط آسفالتی با درصد فضای خالی ۷ درصد به صورت رابطه (۱۰) ارائه شده و همچنین رابطه (۱۰) مدل پیش‌بینی سه پارامتری چقرمگی شکست این نوع مخلوط آسفالتی است:

$$P_F(K_{rc}) = 1 - EXP \left(- \left[\frac{K_{rc} - 0.4055}{0.713 - 0.4055} \right]^{3.399} \right) \quad (9)$$

$$K_1 = 0.4055 + [(0.7130 - 0.4055) \cdot (3.399 \sqrt{-\ln(1-p)})] \quad (10)$$

در جدول (۵) پارامترهای و ایبول سه پارامتری پیش‌بینی

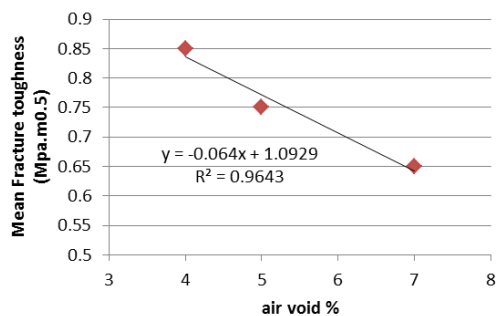


Fig. 6. Correlation between the air void content and the mean fracture toughness values of tested HMA mixtures[6]

پس از مشخص شدن پارامترهای و ایبول مدل مورد نظر جداول (۵ و ۷)، رابطه و ایبول بازنویسی شده و مقادیر ضریب شدت تنش براساس این مدل بدست آمده و سپس با مقادیر برآورد شده در شرایط آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

جدول ۳. مقادیر ضرایب شکست نمونه های آسفالتی

$K_{ff} 7\%$	$K_{ff} 4\%$	P_f	Test
0.4742	0.6365	0.025	1
0.5318	0.6995	0.075	2
0.563	0.7222	0.125	3
0.563	0.7588	0.175	4
0.5764	0.7644	0.225	5
0.588	0.7744	0.275	6
0.6184	0.7877	0.325	7
0.6209	0.8095	0.375	8
0.6246	0.8407	0.425	9
0.6481	0.8415	0.475	10
0.666	0.8617	0.525	11
0.6714	0.8782	0.575	12
0.6745	0.9031	0.625	13
0.6754	0.9235	0.675	14
0.6855	0.9241	0.725	15
0.7113	0.9241	0.775	16
0.7409	0.9383	0.825	17
0.7831	0.9865	0.875	18
0.818	1.0115	0.925	19
0.8736	1.1433	0.975	20

Table 3. Fracture loads and fracture toughness of SCB specimens

جدول ۴. مقادیر و ایبول سه پارامتری داده های آزمایشگاهی

شده برای داده‌های مخلوط آسفالتی ۷٪ از نتایج داده‌های مرجع (مخلوط ۴٪) ارائه شده است.

جدول (۷) مقادیر مدل پیش‌بینی وایبول دو پارامتری

m	K_0	air void
8.56	0.7149	7%

Table 7. Values of the two-parameter Weibull prediction model

شکل‌های (۷ و ۸) منحنی احتمال شکست مدل سه و دو پارامتری وایبول مخلوط آسفالتی با درصد فضای خالی ۷ درصد نشان می‌دهد.

شکل ۷. منحنی مدل پیش‌بینی سه پارامتری سیلیس با ۷ درصد فضای خالی

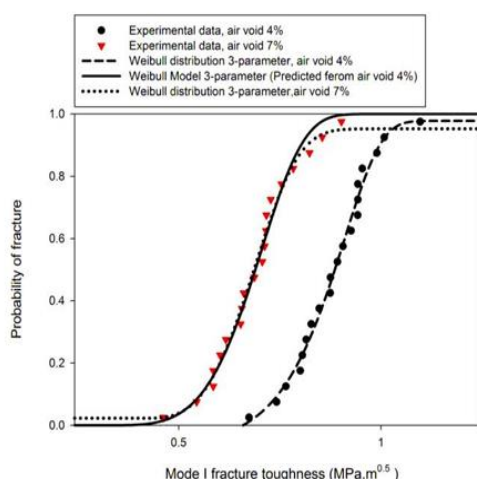


Fig. 7. Prediction of probability curves for three-parameter Weibull model

شکل ۸. منحنی مدل پیش‌بینی دو پارامتری سیلیس با ۷ درصد فضای خالی

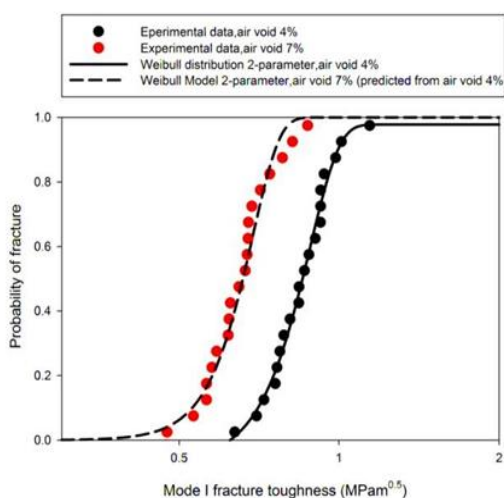


Fig. 8. Prediction of probability curves for Weibull model two-parameter

جدول ۵. پارامترهای وایبول سه پارامتری پیش‌بینی شده

m	K_0	K_{min}	فضای خالی
3.399	0.7130	0.4055	7%

Table 5. Three-parameter Weibull distribution parameters determined for the prediction model

همچنین نتایج تحلیل‌های مدل پیش‌بینی وایبول دو پارامتری به صورت جداول ذیل مشخص شده است. در جدول (۶) مقادیر اصلی وایبول دو پارامتری داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

جدول ۶. مقادیر وایبول دو پارامتری داده‌ها آزمایشگاهی

m	K_0	air void
8.56	0.8948	4%
8.46	0.6802	7%

Table 6. Two-parameter Weibull distribution parameters determined for the tested asphalt mixture with different air voids contents

برای یافتن مدل احتمال شکست دو پارامتری نیز از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$P_j = 1 - \text{EXP} \left\{ - \left[\frac{K_j}{\alpha \cdot K_{0i}} \right]^{mi} \right\} \quad (11)$$

در نتیجه برای یافتن ضرایب وایبول دو پارامتری به صورت ذیل اقدام بدست می‌آید:

$$K_{0(7\%)} = \left(\frac{K_{(7\%)}}{K_{(4\%)}} \right) \times K_{0(4\%)} = 0.799 \times 0.8948 = 0.7149 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \quad (12)$$

$$K_{\min(7\%)} = 0$$

با توجه به ضرایب بدست آمده می‌توان مدل پیش‌بینی دو پارامتری احتمال شکست مخلوط‌های آسفالتی را بصورت رابطه (۱۳) و مدل پیش‌بینی چقرمگی شکست آن را بصورت رابطه (۱۴) بیان کرد.

$$P_j = 1 - \text{EXP} \left\{ - \left[\frac{K_j}{0.7149} \right]^{8.56} \right\} \quad (13)$$

$$K = [0.7149 \cdot (\sqrt[8.56]{-\ln(1-p)})] \quad (14)$$

در جدول (۷) ضرایب وایبول دو پارامتری پیش‌بینی شده

سه پارامتری این پارامتر صفر در نظر گرفته نمی شود. هر چند که به دلیل بیشتر شدن تعداد پارامترهای برازش (از دو پارامتر به سه پارامتر)، منحنی برازش شده با این مدل، تا حدودی از مدل دو پارامتری تخمین و برازش ضعیف تری از داده های شکست ارائه می نماید، اما به دلیل پیش بینی کمترین میزان مقاومت در برابر ترک خوردگی یک نوع مخلوط آسفالتی مشخص (مقدار K_{min})، نتایج مدل وایبول سه پارامتری در عمل کاربرد بیشتری دارد. همان گونه که در شکل های (۷ و ۸) و همچنین جداول (۸ و ۹) مشاهده می شود مدل های ارائه شده دارای مقدار خطای میانگینی در حدود ۵٪ است که نشان دهنده هماهنگی مدل آماری با نتایج داده های آزمایشگاهی است اما مقادیر K_{min} به دلیل پراکندگی زیاد ضرایب شدت تنش دارای خطای بیشتری نسبت به سایر ضرایب است. از سوی دیگر در شکل های (۹ و ۱۰) به مقایسه کلی مقدار خطای دو مدل بر اساس پارامترهای اصلی آنها پرداخته شده است. مدل وایبول دو پارامتری برای پیش بینی مقدار ضریب شدت میانگین هماهنگی بهتری نسبت به مدل سه پارامتری وایبول دارد، ولی در تعیین مقدار K_0 تفاوت محسوسی در دو مدل ارائه شده دیده نمی شود.

شکل ۹. مقایسه ضریب شدت میانگین تنش مدل دو و سه پارامتری

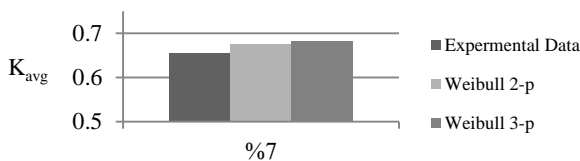


Fig. 9. Comparison of stress intensity factor of two and three parameter models

شکل ۱۰. مقایسه ضریب K_0 پیش بینی شده در مدل دو و سه پارامتری

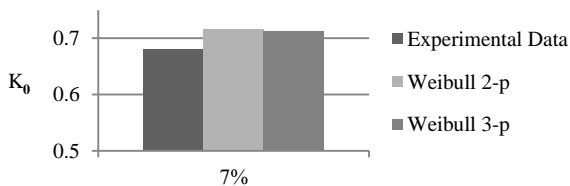


Fig. 10. Comparison of K_0 of two and three parameter prediction models

همانطور که در شکل های (۷ و ۸) مشاهده می شود، توزیع آماری وایبول دارای هماهنگی مناسبی با داده های آزمایشگاهی بوده و توانسته مقادیر K_1 را در هر دو حالت به خوبی پیش بینی کند. از طرفی مدل های آماری پیش بینی شده برای مخلوط آسفالتی با فضای خالی ۷٪ از نتایج داده های مرجع (منحنی توزیع وایبول فضای خالی ۴٪) با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده که نشان می دهد اختلاف کمی بین منحنی مدل و منحنی داده های آزمایشگاهی وجود دارد. با توجه به نمودارهای ارائه شده مقادیر خطای مدل های پیش بینی در جداول (۸ و ۹) برای مدل آماری وایبول سه و دو پارامتری بدست آمده است.

جدول ۸. مقدار خطای پارامترهای اصلی وایبول سه پارامتری

Parameter	7%			COV
	Exp.	Predict	Error	
K_{min}	0.4738	0.4055	-14.4%	
K_0	0.6790	0.7130	+5%	
K_{avg}	0.655	0.6816	+3.9%	0.1286

Table 8. Comparison between the experimental data and predicted values of three-parameter Weibull model

جدول ۹. مقدار خطای پارامترهای اصلی وایبول دو پارامتری

Parameter	7%			COV
	Exp.	Predict	Error	
K_0	0.6802	0.7149	+5.1%	
K_{avg}	0.6554	0.6759	+3.1%	0.1345

Table 9. Comparison between the experimental data and predicted values of two-parameter Weibull model

با توجه به جداول و نمودارهای بالا، مدل وایبول دو پارامتری مقدار خطای کمتری را نسبت به مدل آماری وایبول سه پارامتری نشان می دهد، پس می توان نتیجه گرفت که مدل آماری پیش بینی دو پارامتری نسبت به مدل پیش بینی سه پارامتری وایبول، هماهنگی بهتری با مقادیر آزمایشگاهی دارد. این برازش بهتر بیشتر به این علت است که در مدل دو پارامتری کمینه چقرمگی شکست یک ماده برابر صفر در نظر گرفته می شود که البته تنها فرض ساده کننده ای برای برازش یک منحنی به داده های شکست می تواند قلمداد شود. اما در مدل

۶- نتیجه گیری

- یکی از نوآوری‌ها و دستاوردهای این پژوهش، قابلیت کاربرد و اعتبار سنجی استفاده از مدل پیش‌بینی وایبول برای بررسی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی (برای اولین بار) بررسی و مشخص شد که هر دو مدل دو و سه پارامتری وایبول قادر به پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی چقرمگی شکست دمای پایین مخلوط‌های آسفالتی است.
- داده‌های آزمایشگاهی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۷٪ با استفاده از مدل آماری وایبول و برحسب داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۴٪ به خوبی پیش‌بینی شد.
- از آنجاکه در این پژوهش از تعداد بالایی از نمونه‌ها برای انجام آزمایش استفاده شد نتایج بدست آمده برای ضریب شدت تنش، پراکندگی قابل ملاحظه‌ای را نشان داده که نشان از ماهیت آماری آن دارد. بنابراین همواره نمی‌توان مقدار متوسط چقرمگی شکست را به عنوان مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در نظر گرفت.
- منحنی مدل‌های چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با فضای خالی ۷ درصد براساس مدل وایبول دو و سه پارامتری روی داده‌های آزمایشگاهی رسم شد که دارای خطای ناچیزی است.
- در این مقاله نشان داده شد که می‌توان رفتار شکست آماری مخلوط‌های مختلف آسفالتی را با در اختیار داشتن منحنی‌های وایبول یک حالت مرجع به خوبی پیش‌بینی نمود. در کاربردهای عملی برای هر مخلوط متفاوت دیگر نیز می‌توان بدون نیاز به انجام آزمایش تخمین‌های خوبی از پارامترهایی مانند کمترین مقدار چقرمگی شکست مخلوط، چقرمگی شکست متوسط ارائه نمود. که انجام این پیش‌بینی نیز برای مخلوط‌های مختلف آسفالتی برای اولین بار در این پژوهش صورت پذیرفته است.

References

۷- مراجع

- [1] M. Aliha, H. Behbahani, H. Fazaeli, and M. Rezaifar, "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials* vol. 54, pp. 623-635, 2014.
- [2] S. Pirmohammad and M. Ayatollahi, "Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 235-242, 2014.
- [3] A. K. Akbulut H, "Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism," *Mater Des*, vol. 26, pp. 383-387, 2004.
- [4] X.-J. Li and M. Marasteanu, "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete," *experiment of mechanics*, vol. 50, pp. 867-876, 2010.
- [5] M. K, "application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete " *FHWA*, vol. 1, 1976.
- [6] M. Ayatollahi, "Initiation of asphalt crack under different modes of fracture," *Transportation Institute*, 2015. (In Persian)
- [7] S. Im, H. Ban, and Y.-R. Kim, "Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry," *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 413-421, 2014.
- [8] M. Hassan and H. Khalid, "Fracture characteristics of asphalt mixtures containing incinerator bottom ash aggregate," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2180, pp. 1-8, 2010.
- [9] M. M. Li XJ, "Using semicircular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete," *Exp Mech*, vol. 50, pp. 867-876, 2010.
- [10] E. Chailleux, D. Hamon, and V. Mouillet, "Determination of the low temperature bitumen cracking properties: fracture mechanics principle applied to a three points bending test using a non homogeneous geometry," in *10th international conference on asphalt pavements-august 12 to 17, 2006, quebec city, canada*, 2006.
- [11] M. P. Wagoner, W. G. Buttlar, G. H. Paulino, and P. Blankenship, "Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1929, pp. 183-192, 2005.
- [12] J. Molenaar and A. Molenaar, "Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test", in *proceedings of the papers submitted for review at 2nd euraspalt and eurobitume congress, held 20-22 september 2000, barcelona, spain. book 1-session 1*, 2000.
- [13] W. Weibull, "A statistical theory of the strength of materials," *Proceedings of the royal swedish institute for engineering research* vol. 151, 1939.
- [14] K. Wallin, "The scatter in KIC-results," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 19, pp. 1085-1093, 1984.
- [15] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," *Journal of applied mechanics*, vol. 18, pp. 293-297, 1951.
- [1] M. Aliha, H. Behbahani, H. Fazaeli, and M. Rezaifar, "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials* vol. 54, pp. 623-

- [18] H. Xu and A.-H. Ai, "Statistical analysis of the asphalt mixtures volumetric properties," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 25, pp. 1082-1090, 2010.
- [19] T. L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*: CRC press, 2005.
- [20] M. A. Ameri M., Pirmohammad S., Aliha M.R.M., Ayatollahi M.R, "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures," *Engineering Fracture Mechanics* vol. 93, pp. 153–167, 2012.
- [16] M. Aliha, M. Sistaninia, D. Smith, M. Pavier, and M. Ayatollahi, "Geometry effects and statistical analysis of mode I fracture in giting limestone," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 51, pp. 128-135, 2012.
- [17] M. Todinov, "Is Weibull distribution the correct model for predicting probability of failure initiated by non-interacting flaws?," *International journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 887-901, 2009.

Statistical analysis of mode I fracture mechanics of asphalt mixtures at low temperature based on Weibull prediction model

Aliha, Mohammad Reza¹, Behbahani, Hamid², Fattahi AMD, Hamid Reza^{3*}

1- Assistant Prof., Industrial Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology

2- Prof., Civil Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology

3- M.S., Civil Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology

* mrm_aliha@iust.ac.ir

Abstract:

This paper describes an evaluation of low temperature cracking of asphalt pavement and its propagation agents. Low temperature cracking is one of the noticeable deterioration of asphalt pavement in cold climate regions. This work employed a repeatable semi circular bending (SCB) fracture test to evaluate the low temperature fracture resistance of asphalt mixtures, additionally a large number of edge cracked semi circular bend specimens containing 4% and 7% air voids are used and subjected to symmetric three-point bending load at -10 °c to measure fracture toughness. The effect of air voids on pure mode I asphalt fracture are investigated experimentally and Linear Elastic Fracture Mechanics, its assumptions and effective crack tip parameters introduced, which is used in asphalt fracture mechanics. Then fracture toughness as a main parameter of fracture in the asphalt mixtures is calculated and various methods with different specimen types for determining the fracture toughness of asphalt has been viewed and Asshto suggested method has been discussed, which applied to the experimental part of this work. According to the statistical principle, the experimental results were analyzed by Weibull statistical distribution model in order to present the prediction models for each asphalt mixture with different air voids. The two-parameter and the three-parameter Weibull distribution function was applied to air voids data, Thus compared these two functions. Within the statistical analysis, the probability function for brittle fracture suggested by Wallin using a Weibull analysis that have the three parameters, K_{min} , m and K_0 , all of which predicted in this study.

The analysis of the results also revealed that Weibull distribution model is one of the most appropriate function for discussing the volumetric properties of asphalt mixtures. Furthermore, a statistical analysis illustrated that Weibull model is also able to predict the statistical parameters for each set of test data, By preliminary data from the tests and also a well-defined Transfer Coefficient from the previous experimental data that the other researchers obtained through their studies, can be predicted the three-parameter and the two-parameter of Weibull statistical model such as K_{min} and K_0 which have significant role for asphalt fracture mechanics. In addition to the parameters of Weibull distribution, the average fracture toughness or the average stress intensify factor for asphalt specimens can be predicted from this type of the statistical analysis.

In conclusion, this paper emphasises on the statistical and the experimental aspect of asphalt fracture mechanics that has investigated Weibull distribution model and the ability of this model to predict the important fracture parameters and the average stress intensify factor from a determined experimental data based on volumetric properties such as air voids. Finally, by investigating the errors for different models that suggested in this paper, indicatin the suitability of this model to predict the actual values of asphalt fracture.

Keywords: Mode I Fracture of asphalt, Weibull model, Low temperature Cracking,