

ارایه مدل پیش بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی

حسن زیاری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مجید شادمان بحارینه (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail:majidonlines@gmail.com

پذیرش: ۹۲/۳/۲۷

دریافت: ۹۱/۱۰/۲۴

چکیده

ترکهای پوست سوسماری یا ترکهای خستگی از مهم‌ترین خرابیهای موجود در لایه رویه روسازیها، از جمله روسازی متخلخل هستند. در این راستا، ارایه مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل میتواند کمک شایانی به افزایش کیفیت راهها به ویژه از طریق زمان‌بندی صحیح عملیات ترمیم و نگهداری کند. در این پژوهش سعی شده است مدلی آماری بر مبنای نتایج حاصل از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ارایه شود. نمونه‌ها به صورت تیرهایی از جنس آسفالت متخلخل با درصد فضای خالی حدود ۱۸٪ ساخته شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در دستگاه تست خستگی چهارنقطه‌ای، آزمایش شده و منحنی سختی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری به دست آمدند. به دلیل اینکه آزمایش به روش کرنش ثابت انجام شد، رسیدن به ۵۰٪ سختی اولیه، معیار خرابی در نظر گرفته شد. با توجه به آزمایشهای صورت گرفته و با استفاده از رگرسیون خطی لگاریتمی نتایج، مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل با استفاده از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS با رویکرد پدیده‌شناختی تجربی ارایه شد. ضرایب همبستگی قابل قبول نتیجه شده از رگرسیون، حکایت از دقت مناسب مدل پیشنهادی دارد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت متخلخل، قیر اصلاح شده با پلیمر SBS، آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای، عمر خستگی، مدل پیش‌بینی پدیده شناختی تجربی.

۱. مقدمه

روکش کردن داشته باشد [Pavementinteractive, 2011]. همچنین می‌تواند افقهای جدیدی را فراروی طراحی این نوع روسازی بگشاید. تاکنون مطالعات زیادی درباره خستگی آسفالت‌های متداول در راه‌ها انجام شده است که شامل آرایه مخلوط‌های پیش بینی عمر خستگی، تشکیل ترک اولیه، الگوهای گسترش ترک و... است. با این حال به نظر می‌رسد مطالعات کمی درباره خستگی آسفالت متخلخل انجام شده باشد. این امر می‌تواند به دلیل درصد فضای خالی بالای آن باشد که باعث دشواری ساخت تیرهای خستگی آسفالت متخلخل می‌گردد.

در این پژوهش سعی شده است مدلی برای عمر خستگی آسفالت متخلخل با قیر پلیمری آرایه شود. برای انجام این پژوهش، پس از تعیین دانه‌بندی و درصد قیر بهینه، دالهای آسفالتی متخلخل ساخته شدند و پس از برش، به صورت نمونه‌هایی به ابعاد $380 \times 63 \times 50$ میلیمتر به صورت منشوری و با مقطع مستطیل برش یافتند. سپس با استفاده از دستگاه آزمون خستگی خمش چهار نقطه‌ای بر روی این نمونه‌ها در ۴ سطح کرنش مختلف و در دمای محیط انجام شد. نتایج از طریق حسگرهای متصل به دستگاه، به رایانه انتقال یافت و با استفاده از خروجیهای آزمایش و رگرسیون، مدلی بر مبنای روش پدیده شناختی تجربی که با استفاده کرنش کششی عمر خستگی را پیش‌بینی می‌کند، به دست آمد.

۲. خستگی در آسفالت

به طور کلی، مبانی سازوکارهای خستگی بتن آسفالتی پیچیده است. خستگی، حاصل تجمع آسیب در مصالح، تحت اثر بارگذاری تکراری است. نتیجه تجمع، آسیب ناشی از خستگی در مخلوط‌های آسفالتی، ترک است که یکی از خرابیهای اساسی در روسازیهای انعطاف‌پذیر است و خود را به صورت ترک پوست سوسماری نشان می‌دهد. ویژگی‌های خستگی بتن آسفالتی، معمولاً به وسیله بار تکراری آزمایشگاهی در آزمایشگاه تعیین می‌شود [Wang, 2011]. مقاومت خستگی مخلوط‌های

در دنیای امروز، مباحث مربوط به پیشگیری از حوادث طبیعی بسیار مورد توجه است. همچنین کاهش آلودگی صوتی در شهرهای شلوغ، به زمینه مورد علاقه بسیاری از کارشناسان تبدیل شده است. یکی از انواع کارهایی که می‌توان برای جلوگیری از وقوع سیل و یا رواناب انجام داد، استفاده از نوعی روسازی است که به دلیل تخلخل زیاد (درصد فضای خالی حدود ۱۸ تا ۲۲ درصد آسفالت رویه) به روسازی متخلخل و مخلوط آسفالتی آن به آسفالت متخلخل معروف شده است. کشورهای اروپایی از جمله هلند، اسپانیا، بلژیک و ... سهم بسزایی در گسترش روسازی متخلخل داشته‌اند. از مزایای دیگر این نوع آسفالت کاهش آلودگی صوتی و ایمنی بیشتر برای رانندگان (به دلیل از میان رفتن اثر آب‌لغزی^۱) است [PIARC, 2007].

در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی، تحقیق بر روی ساختار روسازی جدید در آزمایشگاه تحقیقاتی انستیتو فرانکلین ایالات متحده آغاز شد. برنامه آسفالت متخلخل با حمایت سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه یافت. این روسازی جدید، در آغاز در پارکینگها اجرا شد. عملکرد مناسب رویه آسفالت متخلخل از اثر آب‌لغزی در رویه راه‌ها جلوگیری می‌کند که این امر به دلیل اجازه یافتن نفوذ آب در سیستم روسازی است. بنابراین، آب از سطح راه زدوده می‌شود و پاشیده شدن آب کاهش می‌یابد و در نتیجه دید راننده را بهبود می‌بخشد [PIARC, 2007].

از طرف دیگر، ترک پوست سوسماری، مهم ترین خرابی سازه‌ای در رویه روسازیها است. پرداختن به این نوع ترک که ناشی از پدیده خستگی است، مهم و قابل تأمل به نظر می‌رسد. مخلوط‌های پیش‌بینی عمر خستگی ابزار سودمند در زمینه قضاوت درباره مدیریت و نگهداری راه‌ها هستند. همچنین در زمینه طراحی ضخامت، اطلاعات به دست آمده از مخلوط‌ها می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. پیش‌بینی عمر خستگی می‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از گسترش ترکهای خستگی و تعیین زمان مناسب

ارایه مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی

خستگی، به ویژه به روش پدیده شناختی تجربی تلاش کرده‌اند. در نتیجه مخلوط‌های زیادی به این شکل به صورت گزارش‌های فنی، راهنمای طراحی و مقالات انتشار یافته‌اند. در این مخلوط‌ها علاوه بر پارامترهای ذکر شده، از عواملی نظیر درصد قیر، درصد فضای خالی، درصد مصالح پر شده با قیر و ... استفاده شده است. در ادامه چند مدل خستگی معروف و کاربردی که در زمره مخلوط‌های پدیده شناختی جای می‌گیرند، معرفی می‌شوند.

* مدل خستگی شرکت نفتی شیل:

کمپانی نفتی شیل مدل خود را در سال ۱۹۷۸ به صورت رابطه (۳) توسعه داد [Wang, 2011].

$$N_f = \left[\frac{\epsilon_t}{(0.85V_b + 1.08) \times (S_{mix}^{-0.36})} \right]^{-5} \quad (3)$$

که N_f عمر خستگی، ϵ_t کرنش کششی، S_{mix} سختی خمشی مخلوط، و V_b درصد حجمی قیر است.

* مدل خستگی انستیتو آسفالت:

مدل خستگی انستیتو آسفالت به صورت رابطه (۴) توسط این مؤسسه در سال ۱۹۸۲ ارایه شد [Wang, 2011].

$$N_f = S_f \times 10^{[4.84(VFB-0.69)]} \times 0.004325 \times \epsilon_t^{-3.291} \times S_{mix}^{-0.845} \quad (4)$$

که N_f عمر خستگی، S_f ضریب تغییر برای تبدیل نتایج آزمایش به نتایج محتمل میدانی (ضریب توصیه شده ۴/۱۸ برای یک منطقه با ۱۰٪ ترک است)، ϵ_t کرنش کششی اعمال شده، S_{mix} سختی خمشی مخلوط بر حسب پوند بر اینچ مربع و VFB درصد فضای پر شده با قیر است.

* مدل خستگی راهنمای طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی (MEPDG^۳):

راهنمای طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی آشتو در سال

آسفالتی، به توانایی آنها برای پاسخ به بارگذاری تکراری ترافیکی تحت شرایط محیطی غالب، بدون وقوع ترک قابل توجه یا به وجود آمدن خرابی ماندگار، اطلاق می‌شود. در فرآیند طراحی مکانیستیک فرض می‌شود کرنش کششی در پایین لایه آسفالتی، پارامتری است که ترک خستگی را کنترل می‌کند. یکی از مسائل اصلی در رویکرد طراحی مکانیستیک روسازی، محدود کردن کرنش کششی بیشینه و در نتیجه ترک خستگی در لایه‌های آسفالتی است [Baburamani, 1999].

مخلوط‌های اولیه خستگی مخلوط‌های آسفالتی، فرمول‌های ساده پدیده شناختی تحت بارگذاری سیکلی بوده‌اند. این نوع مدل ابتدا به صورت رابطه (۱) توسط مونیسمیت^۲ و همکاران در سال ۱۹۶۹ شکل یافتند [Wang, 2011].

$$N_f = k_1 (\epsilon_t)^{-k_2} |E^*|^{-k_3} \quad (1)$$

که در آن:

N_f عمر خستگی، ϵ_t کرنش کششی، E^* مدول دینامیکی و k_1 و k_2 و k_3 ضرایب آزمایشگاهی هستند.

بدون در نظر گرفتن پارامترهای دما و فرکانس بارگذاری و به تبع آن مدول دینامیکی رابطه (۱) به شکل ساده‌تر رابطه (۲) بیان می‌شود [Wang, 2011].

$$N_f = k_1 (\epsilon_t)^{-k_2} \quad (2)$$

که پارامترها قبلاً معرفی شدند.

در زمینه تحلیل و پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت، به تدریج مخلوط‌های دیگری وارد عرصه نظری و آزمایشگاهی شدند. از جمله این مخلوط‌ها عبارتند از: مخلوط‌های انرژی تلف شده، مخلوط‌های مکانیک شکست، مخلوط‌های مبتنی بر نظریه آسیب، مخلوط‌های مبتنی بر مایکرومکانیک و مخلوط‌های انرژی سطح

[Wang, 2011].

۱-۲ مخلوط‌های خستگی پدیده شناختی تجربی

مراکز تحقیقاتی و صنعتی بسیاری برای انتشار مخلوط‌های

مخلوط‌های دیگری نیز توسط افراد و مراکز دیگری ارایه شده‌اند که از آن جمله مدل اداره حمل و نقل ایلینوی، مدل شرکت موبیل، مدل مرکز تحقیقات راه بلژیک، مدل مدیریت ملی راه دانمارک، مدل نروژ، مدل فرانسه و ... است [Ghuzlan, 2001].

۳. برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در وهله اول، شامل ساخت نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه متراکم کننده چرخشی سوپریو و انجام آزمایشهای تعیین درصد قیر بهینه آسفالت متخلخل بود. مرحله بعد، ساخت دالهای آسفالتی متخلخل بود که توسط دستگاه تراکم ماشینی خطی ساخته شده و در اندازه‌های استاندارد به شکل تیر برای آزمایش در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد درآمدند و در دستگاه خستگی تیر خمشی قرار گرفتند. در بخش‌های زیر، برنامه آزمایشگاهی به تفصیل تشریح می‌شوند.

۳-۱ مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش، مصالح آهکی کوهی شکسته معدن شن و ماسه اسپچران واقع در منطقه رودهن بوده است. چندین دانه‌بندی مختلف برای آسفالت متخلخل وجود دارد. برای دانه‌بندی ساخت نمونه‌ها از حد میانه دانه‌بندی بنیاد

۱۹۹۴ از مدلی که در رابطه (۵) نشان داده شده، استفاده کرد [Wang, 2011].

$$N_f = 0.00432 \times \beta_{f1} \times C \times \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3.291\beta_{f2}} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854\beta_{f3}} \quad (5)$$

$$C = 10^{4.84[V_b/(V_a+V_b)-0.69]}$$

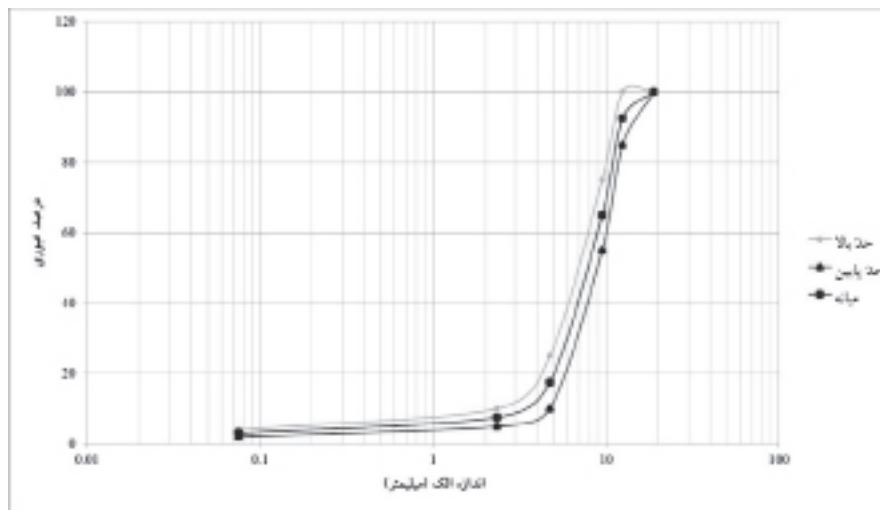
که C ضریب کالیبراسیون آزمایشگاهی به میدانی، ϵ_t کرنش کششی بحرانی، E سختی لایه رویه بتن آسفالتی، V_a درصد فضای خالی، V_b درصد قیر مؤثر و $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ ضرایب تجربی آزمایشگاهی هستند.

* مدل خستگی A-۴۰۴-SHRP:

آزمایشهای کارآیی سریع، برای تعریف پاسخ خستگی مخلوط آسفالتی و استفاده آنها در تحلیل مخلوط و طراحی سیستمهای طراحی در SHRP-A-۴۰۴ در سال ۱۹۹۴ توسعه یافت که رابطه (۶) این مدل را نشان میدهد [Wang, 2011]:

$$N_f = 466.4 \times e^{0.052VFB} \times \epsilon_0^{-3.948} \times (S_0^*)^{-2.270} \quad (6)$$

که N_f عمر خستگی، ϵ_0 کرنش اولیه بر حسب اینچ بر اینچ، S_0^* سختی اولیه بر حسب پوند بر اینچ مربع، VFB درصد فضای خالی پر شده با قیر و e پایه لگاریتم طبیعی (عدد نپر) است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی برای ساخت نمونه‌ها

ارایه مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی

در صدها عبارتند از: ۵/۵٪، ۶/۰٪ و ۶/۵٪. به طور کلی در آسفالت متخلخل از منحنی‌های مارشال استفاده نمی‌شود؛ بلکه معمولاً سه درصد قیر انتخاب شده و با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و قضاوت مهندسی و تجربیات پیشین، یکی از درصدها یا عددی بین آنها به عنوان درصد قیر بهینه انتخاب می‌گردد. آزمایش‌های فوق بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با این سه درصد صورت گرفتند [Schaus, 2007].

۳-۴ ساخت تیرهای آسفالتی متخلخل

پس از تعیین منحنی دانه‌بندی و درصد قیر بهینه، اقدام به ساخت دال آسفالتی شد. دال آسفالتی توسط دستگاه تراکم مالشی خطی متراکم شد. نحوه عملکرد دستگاه تراکم مالشی به صورت مکانیکی بوده و فشار لازم برای تراکم از طریق یک جک هیدرولیکی تأمین می‌شود [Nasr, 2012]. در طول هر اعمال بار، بار به صورت آهسته افزایش یافته و برای مدت چند ثانیه ثابت نگهداشته شده و سپس عمل باربرداری صورت پذیرفت. دلها برای رسیدن به ابعاد مورد نظر برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد برش داده شدند.

۳-۵ آزمایش خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای

آزمایش خستگی تیر خمشی توسط دستگاه ساخت شرکت IPC^۹ استرالیا صورت پذیرفت. این دستگاه می‌تواند بارهای خمشی تکراری به نمونه‌های آسفالتی وارد کند و بار وارده و تغییر شکل ایجاد شده را محاسبه نماید [Fakhri, 2010]. آزمایش خستگی به وسیله قرار دادن تیر آسفالتی تحت بارگذاری تکراری چهار نقطه‌ای در یک سطح کرنش معین انجام گرفت.

به صورت کلی، آزمایش تیر خمشی به دو روش تنش ثابت و کرنش ثابت صورت می‌پذیرد. در حالت کرنش ثابت، کرنش ثابت باقی می‌ماند و تنش اجازه تغییر می‌یابد و در حالت کرنش ثابت، بار ثابت باقی می‌ماند و به کرنش اجازه تغییر داده می‌شود.

ملی‌روسازی آسفالتی ایالات متحده (ناپا) استفاده شد. شکل (۱) منحنی دانه‌بندی مصالح مورد نظر را که از حدّ میانه دانه‌بندی ناپا (NAPA) استفاده کرده است نشان می‌دهد.

۳-۲ قیر مصرفی

در این پژوهش از قیر ۸۵/۱۰۰ که با پلیمر^{۱۰} SBS اصلاح شده بود، استفاده شد. درصد پلیمر بکار رفته در قیر ۴٪ انتخاب شد. قیر خالص مصرفی، محصول شرکت نفت پاسارگاد تهران بود که عمل اختلاط پلیمر با قیر در این کارخانه انجام شد. اختلاط، توسط دستگاه مخلوط‌کن دور بالا^{۱۱} انجام شد. باید توجه داشت که دمای اختلاط قیر پلیمری با سنگدانه‌ها ۱۶۰ الی ۱۷۰ درجه سانتیگراد است که حدود ۲۵ الی ۳۰ درجه سانتیگراد بالاتر از قیرهای خالص است [NAPA, 2003].

دلیل انتخاب ۴٪ SBS برای اصلاح قیر، استفاده بهینه از خواص بهبوددهنده SBS و جلوگیری از افزایش بیش از حد ویسکوزیته قیر بوده است. مقدار متداول درصد SBS در قیر بین ۴ تا ۶ درصد است که مقدار ۴٪ هم از ویسکوزیته بالای قیر جلوگیری می‌کند و هم در تولید انبوه، کار را مقرون به صرفه‌تر می‌کند [Sengoz and Isikyakar, 2008]. شایان ذکر است در نخستین گام ساخت، از قیر خالص ۶۰/۷۰ در ساخت نمونه‌ها استفاده شد که به دلیل ناپایداری شدید آسفالت، نمونه به سرعت دچار فروریزش شد و از بین رفت.

۳-۳ آزمایش‌های تعیین درصد قیر بهینه

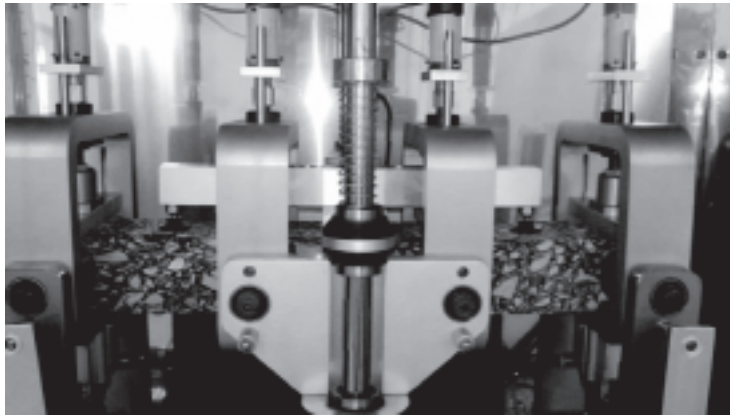
برای تعیین درصد قیر بهینه از شرایط استاندارد کانتابرو^{۱۲} اسپانیا استفاده شد که دارای سه شرط زیر است [Jayervand, 2003]:

۱. فروریزش^{۱۳} کمتر از ۰/۳ درصد

۲. درصد فضای خالی مساوی یا بالاتر از ۱۸٪

۳. افت وزنی کمتر از ۲۵٪ در آزمایش کانتابرو

به منظور تعیین درصد قیر بهینه، سه درصد قیر در نظر گرفته شد که



شکل ۲. دستگاه آزمون خستگی تیر خمشی در حال انجام آزمایش

روابط (۷-الف) تا (۷-د)، روابط را که برای محاسبه پارامترهای خروجی استفاده می‌شود را نشان می‌دهد [IPC, 2004].

$$\sigma_t = \frac{G_o P}{bh^2} \quad (7\text{-الف})$$

$$\epsilon_t = \frac{12h\delta \times 10^6}{3G_o^2 - 4G_i^2} \quad (7\text{-ب})$$

$$E_s = \frac{1000 \times \sigma_t}{\epsilon_t} \quad (7\text{-ج})$$

$$E = \left[\frac{PG_i}{\delta bh} \right] \times \left[\frac{3G_o^2 - 4G_i^2}{4h^2 + k(1+\nu)} \right] \quad (7\text{-د})$$

در این روابط σ_t بیشینه تنش کششی بر حسب کیلوپاسکال، P بار وارد شده به نمونه بر حسب کیلونیوتن، b میانگین عرض نمونه بر حسب میلیمتر، h میانگین ارتفاع نمونه بر حسب میلیمتر، G_o طول گیج خارجی (۳۵۵/۵ میلیمتر)، ϵ_t کرنش کششی بر حسب میکرواسترین، δ میانگین تغییر مکان در وسط تیر بر حسب میلیمتر، G_i طول گیج داخلی (۱۱۸/۵ میلیمتر)، E_s سختی خمشی بر حسب مگاپاسکال، E مدول الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال، ν ضریب پواسون و k نسبت تنش برشی واقعی بر تنش برشی متوسط است که برابر ۱/۵ فرض می‌گردد.

برای حالت تنش ثابت، آزمون تا جایی که نمونه واقعاً گسیخته شود و بشکند، ادامه می‌یابد. اما در حالت کرنش ثابت، تعیین و تعریف خرابی دشوار است. علت این موضوع آن است که به منظور ثابت نگاه داشتن کرنش، تنش اعمال شده به صورت مکرر کاهش می‌یابد که در این حالت، هرگز شکستگی واقعی در تیر اتفاق نمی‌افتد؛ بنابراین، در حالت کرنش ثابت، خرابی در نقطه‌ای که سختی به یک مقدار از پیش تعیین شده برسد، تعریف می‌شود که معمولاً برابر ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [Pavement Interactive, 2011].

برای این پژوهش، پارامترهای آزمایش به این صورت تنظیم شدند که دمای آزمایش ۲۲ درجه سلسیوس؛ فرکانس اعمال بار ۱۰ هرتز؛ شکل موج بار نیمه سینوسی و سطوح کرنش ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ میکرواسترین. همچنین برای هر سطح کرنش ۳ نمونه آزمایش شد.

از آنجایی که ترکهای خستگی در دمای محیط، دارای بیشترین فراوانی وقوع هستند [Pavement Interactive, 2011]، آزمایش تیر خستگی در دمای محیط انجام شد که به نظر میرسد دمای ۲۲ درجه سلسیوس مصداق خوبی برای دمای محیط باشد. شکل (۲) دستگاه آزمون خستگی در حال آزمایش را نشان می‌دهد.

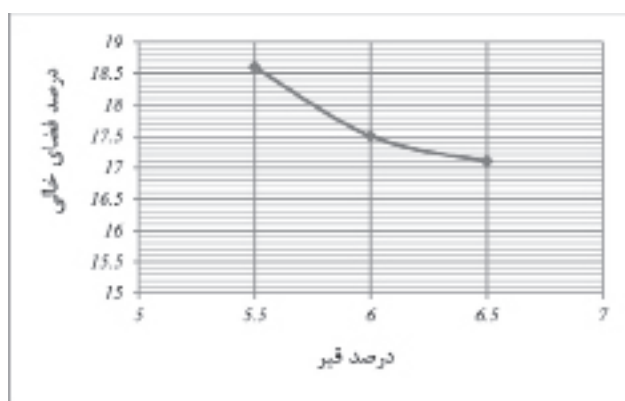
ارایه مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی

جدول ۱. مقادیر فروریزش قیر برای درصدهای مختلف قیر

نمونه	درصد قیر	دما (درجه سلسیوس)	فروریزش متوسط (%)
۱	۵/۵	۱۸۰	۰/۰۲۱
۲	۶/۰	۱۸۰	۰/۰۲۸
۳	۶/۵	۱۸۰	۰/۰۳۲

جدول ۲. نتایج آزمایش کانتابرو

درصد افت وزنی	وزن ثانویه نمونه‌ها (g)	وزن مصالح خردشده (g)	وزن اولیه نمونه‌ها (g)	درصد قیر
۱۵/۵۱	۱۰۲۰/۲۳	۱۸۷/۳۵	۱۲۰۷/۵۸	۵/۵
۱۱/۱۷	۱۰۷۲/۹۶	۱۳۴/۹۷	۱۲۰۷/۹۳	۶/۰
۸/۲۳	۱۱۰۸/۷۵	۹۹/۲۶	۱۲۰۸/۲۱	۶/۵



شکل ۳. نتایج آزمایش درصد فضای خالی

۴. نتایج و تحلیل آنها

* نتایج آزمایش فروریزش قیر

طبق تعریف، فروریزش قیر به خارج قسمت وزن مصالحی که در درون سبد سیمی ته‌نشین می‌شوند به وزن مصالحی که از هم جدا می‌شوند، اطلاق می‌شود [ASTM D 6390, 1999]. آزمایش فروریزش قیر برای نمونه‌های با درصد قیر ۵/۵، ۶/۰ و ۶/۵ در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس انجام شد که نتایج آن به صورت جدول (۱) نشان داده شده است.

* نتایج آزمایش کانتابرو

این آزمایش به صورت قرار دادن تک تک نمونه‌های آزمایش مارشال در معرض ۳۰۰ دور چرخش در دیگ (مخلوط‌کن) آزمایش لس‌آنجلس صورت می‌پذیرد. این دیگ فاقد گویهای فولادی بوده و درجه حرارت مشخصی دارد [Jayervand, 2003]. در این پژوهش سرعت ۳۰ دور بر دقیقه در دمای ۱۸ درجه صورت پذیرفت. نتایج آزمایش کانتابرو که برای تعیین درصد قیر بهینه انجام شد، به صورت جدول (۲) بیان می‌شود.

* نتایج آزمایش درصد فضای خالی و تعیین درصد قیر بهینه

مقادیر درصد فضای خالی برای درصدهای مختلف نمونه‌های

جدول ۳. نتایج آزمایش تیر خمشی

سختی اولیه (مگاپاسکال)	سختی اولیه (مگاپاسکال)	عمر خستگی (سیکل)	شماره نمونه	سطح کرنش (میکرواسترین)
۲۶۵	۹۳۰	۱۸۷۳۶۰	۱	۲۰۰
۲۳۹	۸۷۸	۱۷۹۸۸۰	۲	۴۰۰
۴۷۲	۹۴۵	۱۸۳۳۷۰	۳	۴۰۰
۲۲۶	۸۵۲	۱۲۱۲۹۰	۱	۵۰۰
۲۲۸	۸۹۶	۱۴۴۰۳۰	۲	۵۰۰
۴۴۱	۸۸۲	۱۳۳۸۶۰	۳	۵۰۰
۳۶۵	۷۲۹	۸۹۸۸۰	۱	۶۰۰
۳۸۷	۷۷۳	۱۰۵۰۸۰	۲	۶۰۰
۳۵۹	۷۱۸	۱۰۲۷۲۰	۳	۶۰۰
۳۷۱	۷۴۲	۴۰۳۸۰	۱	۷۰۰
۳۸۷	۷۷۵	۲۷۲۸۰	۲	۷۰۰
۲۰۲	۸۰۴	۴۱۵۶۰	۳	۷۰۰

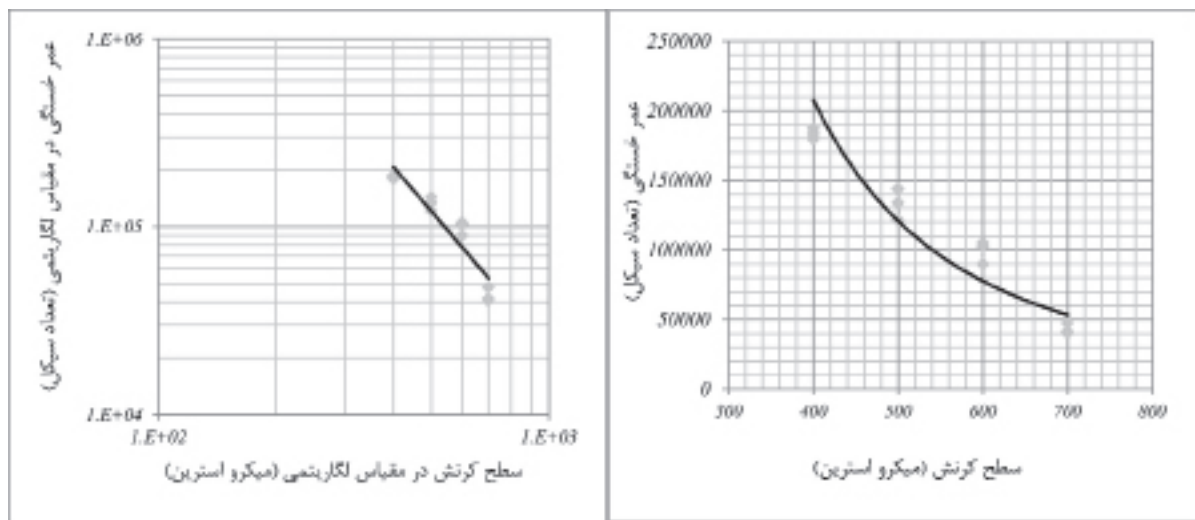
استوانه‌ای به صورت شکل (۳) از آزمایش رایس به دست آمدند. دو معیار فروریزش و آزمایش کانتابرو برای هر سه درصد قیر قابل قبول بوده‌اند. با توجه به آزمایش درصد فضای خالی، درصدی که فضای خالی بیشتری بدهد، مطلوب‌تر خواهد بود. بنابراین باید درصد قیر ۵/۵ انتخاب شود. اما با توجه به اینکه درصد قیر ۵/۷ نیز، درصد فضای خالی بالای ۱۸ را ارضا می‌کند و نیز به دلیل اینکه قیر ۸۵/۱۰۰ در مناطق معتدل و سردسیر استفاده می‌شود، به دلیل اجتناب از خرابیهایی نظیر عریان‌شدگی و شن‌زدگی، این درصد قیر انتخاب شد.

۴-۱ نتایج آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای و ارایه مدل خستگی

پس از قرار گرفتن تیرهای خستگی در دستگاه تست ۴ نقطه‌ای، آزمایش‌ها برای چهار سطح کرنش انجام شدند که برای هر سطح کرنش ۳ تست صورت گرفت تا نتایج بر پایه یک نمونه بنا نشود و نتایج از اعتبار بیشتری برخوردار شوند. جدول (۳) خلاصه

نتایج آزمایش خستگی تیر خمشی را نشان می‌دهد. مقایسه عمر خستگی آسفالت متخلخل با آسفالت معمولی نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده، تفاوت خیلی زیادی ندارند، به عنوان نمونه، عمر خستگی به دست آمده توسط همان دستگاه تست برای آسفالت گرم معمولی با دانه‌بندی شماره ۴ و درصد قیر ۶٪ در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین برابر ۱۲۹۷۰۰ سیکل [Bahadori, 2013] و برای آسفالت متخلخل، متوسط این مقدار برابر ۱۰۵۰۸۰ سیکل است. همچنین مقایسه بین سختی اولیه آسفالت معمولی با آسفالت متخلخل نشان داد که این مقادیر برای آسفالت متخلخل به صورت محسوسی کمتر از آسفالت گرم معمولی است. به عنوان مثال، سختی اولیه آسفالت متخلخل در سطوح کرنش ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ میکرواسترین، به ترتیب برابر ۹۳۰، ۸۵۲، ۷۲۹ و ۷۱۸ مگاپاسکال است که این مقادیر برای آسفالت گرم معمولی با درصد قیر ۵٪ و فضای خالی ۶٪، در سطوح کرنش فوق به ترتیب برابر ۲۴۷۸، ۲۰۵۰، ۱۹۸۸ و ۱۸۱۹ مگاپاسکال است [Fakhri, 2010].

ارایه مدل پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی



شکل ۴. نمودار عمر خستگی بر حسب سیکل برای ارایه مدل خستگی

جدول ۴. مخلوطهای خستگی آسفالت‌های متداول

نام مدل	k_1	k_2	k_3
استیتو آسفالت	۰/۰۷۹۶	۳/۲۹۱	۰/۸۵۴
شیل	۰/۰۶۸۵	۵/۶۷۱	۲/۳۶۳
مرکز تحقیقات راه پلژیک	$۴/۹۲ \times 10^{-12}$	۴/۷۶	۰
دانشگاه برکلی کالیفرنیا	۰/۰۶۳۶	۳/۲۹۱	۰/۸۵۴
آزمایشگاه تحقیق راه و حمل و نقل	$۱/۶۶ \times 10^{-11}$	۴/۳۲	۰
دانشگاه ایلی‌نوی	۵×10^{-6}	۳	۰
نیروی زمینی امریکا	۴۷۸/۶۳	۵	۲/۶۶
مینه سوتا	$۲/۸۳ \times 10^{-6}$	۳/۲۱	۰
هند	۰/۱۰۰۱	۳/۵۶۵	۱/۴۷۴۷

اساس کرنش، مدل توانی بر اساس کرنش و مدول دینامیکی و مدل بر اساس موارد فوق و پارامترهای دیگری همچون درصد فضای خالی، درصد قیر مؤثر و ... است. با توجه به این که در این آزمایشها، از یک نوع دانه‌بندی و یک درصد قیر (درصد قیر بهینه) استفاده شد و آزمایش مدول دینامیکی به دلیل نبود دستگاه مذکور انجام نشده است، بنابراین از مدل توانی بر اساس کرنش برای ارایه مدل استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصله، مدل

بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش خستگی، نمودار سیکل بر حسب سطح کرنش رسم و با استفاده از رگرسیون توانی، مدل پدیده‌شناختی تجربی برای آسفالت متخلخل در دمای محیط به دست آمد. شکل (۴) سمت راست، نمودار عمر خستگی بر حسب سطح کرنش و شکل (۴) سمت چپ، این نمودار را در مقیاس لگاریتمی نمایش می‌دهد. مخلوط‌های کلی در حوزه خستگی آسفالت در کلاس پدیده شناختی، شامل مدل توانی بر

خستگی پیشنهادی به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$N_f = 4 \times 10^{11} \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{2.430} \quad (8)$$

$$R^2 = 0.88$$

که در آن، N_f عمر خستگی، ε کرنش کششی در قسمت تحتانی لایه رویه بر حسب میکرواسترین و R^2 ضریب همبستگی است. نمودار سمت راست سطح کرنش را بر حسب تعداد سیکل‌های برای رسیدن به ۵۰٪ سختی خمشی اولیه نشان می‌دهد که مدل ارایه شده، معادله رگرسیونی است که از برازش این داده‌ها به دست آمده است. شکل سمت چپ، مقیاس لگاریتمی نمودار سمت راست را نشان می‌دهد. این نمودار، روند منطقی کاهش سختی خمشی را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که مدلی که در این پژوهش ارایه شد، مدلی کامل و همه جانبه نیست، زیرا مخلوط‌های جامع‌نگرتر دارای پارامترهای دیگری چون مدول دینامیکی، درصد فضای خالی، درصد قیر مؤثر و پارامترهایی از این دست هستند که در این پژوهش منعکس نشده‌اند، بلکه برای حالت‌های خاصی از آسفالت متخلخل در نظر گرفته شده‌اند. برای ارایه یک مدل کامل، پارامترهای مختلف و آزمایش‌های بسیاری باید صورت گیرد تا بتوان به مدلی کامل برای پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل دست یافت.

همچنین جدول (۴) مخلوط‌های خستگی آسفالت‌های متداول را بر اساس رابطه (۱) نشان می‌دهد؛ با این توضیح که ضریب k_p مربوط به پارامتر مدول دینامیکی است [Huang, 2005].

۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارایه مدلی برای پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت متخلخل بود که از طریق انجام آزمون‌های خستگی بر روی نمونه‌های استاندارد به شکل تیر انجام شد. مدل ارایه شده پیش‌بینی عمر خستگی، مدل پدیده شناختی تجربی بود که با در نظر گرفتن ضریب همبستگی نتایج به دست آمد. با توجه

به این توضیحات، نتایج زیر ارایه می‌شوند.

۱. مدل پیشنهادی، به صورت $N_f = 4 \times 10^{11} \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{2.430}$ با ضریب همبستگی ۰/۸۸ به دست آمد.

۲. با توجه به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای متخلخل با قیر خالص و عدم پایداری مخلوط آسفالتی متخلخل، استفاده از قیر خالص برای ساخت متخلخل، توصیه نمی‌شود.

۳. درصد زیاد فضای خالی در آسفالت متخلخل، باعث نمی‌شود که عمر خستگی این نوع آسفالت در برابر آسفالت‌های معمولی، کاهش بسیار محسوسی را نشان دهد. آزمایش‌ها نشان دادند که عمر خستگی این نوع از آسفالت، تفاوت بسیار شدیدی با آسفالت‌های متداول که با قیرهای معمولی ساخته می‌شود، ندارد. از دلایل این پدیده، می‌توان به استفاده از قیر پلیمری اشاره کرد که علاوه بر دارا بودن چسبندگی زیاد، به دلیل خاصیت الاستیک زیاد آن، باعث افزایش عمر خستگی می‌شود.

۴. آسفالت متخلخل به دلیل فضای خالی زیاد و درصد ریزدانه کمتر، سختی خمشی کمتری نسبت به آسفالت‌های معمول دارد؛ دلیل این پدیده را میتوان به لغزیدن سنگدانه‌های درشت روی هم و ایجاد تغییر مکان‌های موضعی بزرگ در اسکلت آسفالت متخلخل دانست.

۶. پی‌نوشتها

- 1-Hydroplaning
- 2-Monismith
- 3-Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
- 4-Strategic Highway Research Program
- 5-Styrene Butadiene Styrene
- 6-High Shear
- 7-Cantabro
- 8-Draindown
- 9-Industrial Process Control

using fluorescent microscopy and conventional test methods”, Journal of Hazardous Materials, 150.

- Wang, L. (2011) “Mechanics of asphalt microstructure and micromechanics”, McGraw Hill.

- بهادری، ا. (۱۳۹۱) ” بررسی ارتباط نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم با عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- پیارک (۱۳۸۶) ” آسفالت متخلخل ترجمه گزارش کمیته ۳-TC۴ پیارک»، ترجمه فریده امیرفرهنگی، پژوهشکده حمل و نقل.

- جایروند، ک. (۱۳۸۲) ” معیارها و ضوابط طرح اختلاط آسفالت متخلخل. دومین همایش قیر و آسفالت ایران»، تهران، دومین همایش قیر و آسفالت ایران.

- فخری، منصور (۱۳۸۸) ” بررسی روشهای آزمایشگاهی برای کنترل ترکهای ناشی از بارگذاری و ارائه مدل پیش‌بینی ترکهای خستگی آسفالت روسازی راههای کشور»، تهران: پژوهشکده حمل و نقل.

- نصر، د. (۱۳۹۰) ” ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خستگی در مخلوطهای آسفالتی نیمه گرم (WMA) و مقایسه آن با مخلوطهای آسفالتی گرم متداول (HMA) ”، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۷. مراجع

-ASTM (1999) “Standard test method for determination of draindown characteristics in uncompacted asphalt mixtures», In Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

- Ghuzlan, K. (2001) “Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts”, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Huang, H. (2005) “Material characterization and performance of superpave mixtures”, Ph.D. dissertation, North Carolina State University.

- IPC (2004) “UTM 5 software help”, Melbourne, Australia: IPC Global Inc.

- NAPA (2003) “Porous asphalt pavements” Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Pavia System Inc. (2011) “Flexural fatigue”, (Pavia Systems Inc.) Retrieved from <http://www.pavementinteractive.org>

- Schaus, L. (2007) “Porous asphalt pavement designs: proactive design for cold climate use”, M.Sc. Dissertation, University of Waterloo.

- Sengoz, B. and Isikyakar, G. (2008) “Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen