

## بررسی اثر خصوصیات ناپیوستگی بر عملکرد مکانیکی نمونه‌های آسفالت تعمیر شده و تعمیر نشده

میلا دحسین عطایی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد  
محمد مهدی خبیری\*، دانشیار، بخش راه و خاک، دانشکده عمران، دانشگاه یزد  
زهره غفوری فرد، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

### چکیده

ترک خوردگی روسازی آسفالتی پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر و مُد اصلی خرابی در این روسازی‌ها است که در صورت عدم توجه هزینه گزافی را به دنبال دارد. این در حالی است که می‌توان با اقدامات پیشگیرانه، به نحو بسیار مؤثری هزینه‌های مذکور را کاهش داد. درزگیری ترک یکی از روش‌های نگهداری پیشگیرانه و ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین راه برای ترمیم سطوح به تازگی ترک‌خورده روسازی آسفالتی است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ابعاد ناپیوستگی و تعمیر آن بر رفتار مکانیکی آسفالت انجام شده است. از این رو، نمونه‌های آسفالتی دارای ناپیوستگی تعمیر شده و تعمیر نشده ساخته شد و سپس آزمایش‌های خزش دینامیک، مدول برجهندگی، خستگی و دوام به روش لاتمن روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برای لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر، درزگیری ترک‌های کم‌عرض (تا عرض ۲۰ میلی‌متر)، مقاومت در برابر شیارشدگی بتن آسفالتی را بهبود می‌بخشد و همچنین درزگیری ترک‌ها می‌تواند مقاومت بتن آسفالتی را در برابر خستگی، بدون توجه به ابعاد ترک، افزایش دهد. برای لایه‌ای با دانه‌بندی درشت‌تر نیز درزگیری ترک‌های عمیق‌تر نسبت به عرض باعث کاهش مقاومت بتن آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌شود و درزگیری ترک‌هایی که مجموع ابعاد عرض و عمق آن‌ها برابر با ۲۰ میلی‌متر باشد، کاهش عملکرد خستگی را در پی خواهد داشت. برای لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر و لایه‌ای با دانه‌بندی درشت‌تر، درزگیری ترک به ترتیب باعث افزایش ۷/۷ و ۸/۹ درصدی مدول برجهندگی بتن آسفالتی می‌شود. همچنین، یافته‌ها حکایت از نقش پررنگ‌تر عرض ناپیوستگی نسبت به عمق آن بر رفتار شیارشدگی و دوام دارد. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند در تصمیم‌گیری زمان مناسب درزگیری ترک‌ها و بهبود برخی خصوصیات روسازی، به موازات ترمیم ترک‌ها، کلیدی باشد. اما به طور کلی، اثر مطلوب درزگیری بر شیارشدگی، خستگی و دوام رویه‌های آسفالتی، جزئی و عمدتاً قابل صرف نظر است. با این وجود، می‌توان درزگیری را یکی از راه‌های افزایش مدول برجهندگی رویه‌های ترک‌خورده در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: ابعاد ناپیوستگی، روسازی آسفالتی، درزگیری، خصوصیات مکانیکی، دوام

## ۱. مقدمه

خرابی‌ها سرعت گرفته و به شکل‌های رشد ترک، پوسته‌شدن و چاله نمایان می‌گردد (شاهین، ۱۹۹۴؛ معتمدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بالزارینی و همکاران، ۲۰۲۱). از این‌رو، رها کردن ترک‌ها به حال خود و عدم ترمیم آن‌ها باعث افت ایمنی راه‌ها می‌گردد (البی و کلر، ۲۰۱۸؛ جوانی و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از راهکارهای پرکاربرد ترمیم ترک، درزگیری است (شکل ۱). در واقع، درزگیری را می‌توان در عمل ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین راه برای ترمیم سطوح به‌تازگی ترک‌خورده روسازی دانست (چن و همکاران ۲۰۰۳؛ وارگاس نوردکبک و جلالی، ۲۰۲۰). از آنجا که سالانه هزینه‌های هنگفتی صرف بهسازی و مرمت روسازی‌های مضمحل شده در سطح کشور می‌شود (سید محمودی و شهری، ۲۰۱۷؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۷). لذا، مطالعه در خصوص ترک‌خوردگی و بررسی بهبود خصوصیات و عملکرد آسفالت بعد از درزگیری بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱. ترک درزگیری شده

شد، عدم ترمیم به‌موقع ترک باعث وقوع دیگر خرابی‌ها در اثر بار ترافیکی و شرایط آب‌وهوایی می‌شود. در این خصوص، اخوان بهابادی (۲۰۱۴) در پژوهشی در خصوص خرابی ترک روسازی آسفالتی، بیان می‌دارد که پارامترهایی نظیر تغییرات دمایی رویه آسفالت، مقدار بار ترافیکی، نوع، طول و جهت قرارگیری ترک‌ها در روی

ترک‌خوردگی روسازی انعطاف‌پذیر پدیده‌ای است اجتناب‌ناپذیر. در واقع، اجرای یک روسازی آسفالتی که هرگز دچار ترک‌خوردگی نشود، امری غیرممکن است. در واقع، می‌توان گفت که ترک‌خوردگی مد اصلی خرابی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر شناخته شده است (کانستراری و اینگراسیا، ۲۰۲۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱). ترک‌ها در شکل‌های مختلفی از جمله ترک عرضی، طولی، بلوکی و پوسته‌سوماری در روسازی آسفالتی رخ می‌دهند. از آنجا که ترک‌خوردگی، شکلی عمده از خرابی‌های روسازی است، معمولاً یک شاخص تصمیم‌گیری در تشخیص زمان و روش مناسب مرمت روسازی به‌شمار می‌رود؛ چرا که رشد ترک‌ها روی سطح روسازی نشانه‌ای از کاهش همبستگی روسازی و خدمت‌دهی آن است. تعمیر کردن ترک‌ها به‌طور مرتب یکی از روش‌های رایج نگهداری پیشگیرانه شناخته می‌شود، چرا که با عدم انجام این مهم در زمان مناسب،

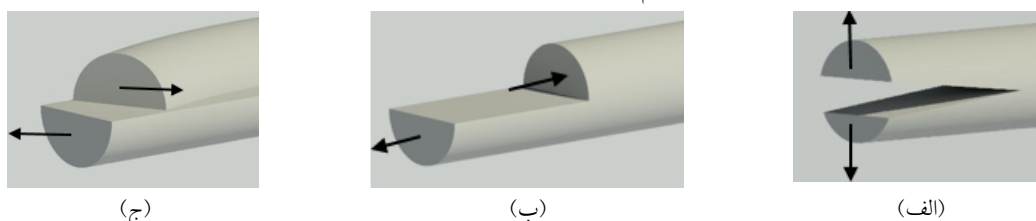
## ۲. پیشینه تحقیق

درزگیری ترک به‌عنوان یکی از روش‌های نگهداری پیشگیرانه به‌کار می‌رود. کاربرد روش‌های نگهداری پیشگیرانه می‌تواند با ترمیم به‌موقع خرابی‌های جزئی تا پنج برابر هزینه‌های نگهداری در آینده را کاهش دهد (خواجه‌پور و شاد، ۲۰۱۴)؛ چرا که همان‌طور که اشاره

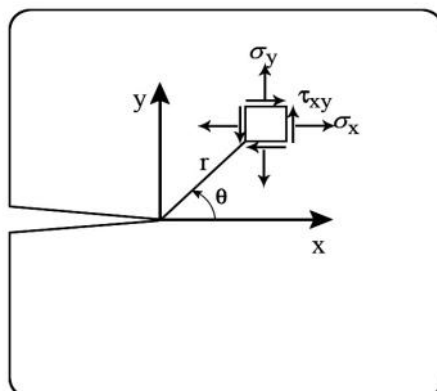
به هم می‌لغزند (شکل ۲-ب) و در مود سوم بارگذاری لبه‌های ترک در خارج صفحه جسم نسبت به هم می‌لغزند (شکل ۲-ج). اگر بارگذاری به صورت ترکیبی از دو یا سه حالت بارگذاری باشد، بارگذاری مرکب نامیده می‌شود (اخوان بهابادی، ۲۰۱۴).

روش بارگذاری انتخابی در این تحقیق در آزمایشگاه با هر کدام از مدهای گسترش ترک مرتبط است. در خصوص نحوه توزیع تنش‌ها در اطراف ترک می‌توان گفت تنش‌های الاستیک اطراف ترک توسط بسط سری‌ها قابل محاسبه است. اما از آنجایی که شروع ترک از نوک ترک است و در نوک ترک تمرکز تنش‌های شدیدی ایجاد می‌شود، محاسبه تنش‌ها در نوک ترک از اهمیت بیشتری برخوردار است که مقادیر این تنش‌ها به کمک روابط (۱) الی (۳) محاسبه می‌شود. شکل ۳ نیز تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک را نشان می‌دهد (اخوان بهابادی، ۲۰۱۴).

سطح لایه آسفالتی، فاصله و محل عبور وسایل نقلیه نسبت به ترک‌ها، جنس لایه رویه آسفالتی و لایه زیراساس، و رطوبت موجود در خاک بستر از عوامل مؤثر بر شکست و خرابی آسفالت ترک‌دار تحت بارهای کششی خالص، برش خالص و ترکیبی کششی-برشی است. اما لازم به ذکر است که ترک خوردگی رویه‌های آسفالتی به علت دو عامل اصلی بارگذاری حرارتی و بارگذاری دینامیک رخ می‌دهد. به طور کلی، انواع بارگذاری در اجسام ترک‌دار عبارت‌اند از مود اول بارگذاری، مود دوم بارگذاری، مود سوم بارگذاری و ترکیبی از مدهای ذکرشده. اگر جسم ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند (شکل ۲-الف)، قطعه فقط تحت مود اول بارگذاری است. در مدهای دوم و سوم بارگذاری، تغییر فرم‌های لبه‌های ترک از نوع برشی (لغزش روی یکدیگر) است و لبه‌های ترک در راستای عمود بر صفحه ترک هیچ‌گونه بازشدگی نسبت به هم ندارند. در واقع، در مود دوم بارگذاری، لبه‌های ترک در داخل صفحه جسم نسبت



شکل ۲. الف) مود بارگذاری اول، ب) مود بارگذاری دوم و ج) مود بارگذاری سوم



شکل ۳. تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات کارتزین

$$\sigma_{xx} = \frac{A_1 f_{1xx}(\theta)}{\sqrt{r}} + A \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{B_1 f_{1xx}(\theta)}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{C_1 f_{1xx}(\theta)}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

درزگیری ترک‌ها می‌تواند حدود ۴ سال به عمر روسازی بیفزاید (راجاگوپال، ۲۰۱۱). زیاری و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی روی پلی‌فسفریک اسید، به بررسی تأثیر این افزودنی بر رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. بدین جهت، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با قیرهای اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف پلی-فسفریک اسید تهیه و در پنج دمای متفاوت، تحت آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه (SCB) قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به‌منظور بررسی اثر افزودنی پلی‌فسفریک اسید در دماهای مختلف، بهتر است انرژی شکست و میزان سرعت متوسط رشد ترک به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد. مازومدر و همکاران (۲۰۱۹) نیز پژوهشی در خصوص روش‌های متداول تعمیر ترک، آب‌بندی و پرکاری، انجام دادند. از این‌رو چهار راه واقع در چهار منطقه مختلف ایالت تگزاس به مدت ۱/۵ سال در بازه‌های سه‌ماهه، مورد مطالعه قرار گرفتند. این مناطق با در نظر گرفتن نمایندگی از شرایط اقلیمی و ترافیکی مختلف این ایالت انتخاب گردیده بودند. از طرفی، محققین برای ثابت نگه‌داشتن سایر شرایط، از ماده درزگیری و روش پخش یکسان بهره گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش آب‌بندی در کل ۳۷٪ عملکرد بهتری نسبت به پرکاری نشان می‌دهد و در بلندمدت از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است.

علاوه بر این، وارگاس نوردکبک و جلالی (۲۰۲۰) با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های حاصل از تحقیقات انجام

که ضرایب  $A_1$ ،  $B_1$  و  $C_1$  ثابت‌های مستقل از  $\theta$  و  $r$  بوده و بستگی به هندسه و نوع بارگذاری دارند.  $f_{1xx}$  نیز تنها تابعی از زاویه  $\theta$  است.

در خصوص تعمیر ترک، بر اساس تحقیقات دپارتمان حمل‌ونقل آلبرتا، درزگیری ترک می‌تواند به مدت ۵ سال به عمر روسازی اضافه کند و به رغم بیشتر بودن هزینه‌های مواد و اجرای آن‌ها، در مقایسه با روش‌های سنتی از نظر اقتصادی به‌صرفه‌ترند (چیچک، ۱۹۹۳). یانگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی با بیان اینکه درزگیری ترک یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای حفظ روسازی‌های آسفالتی است؛ به اندازه‌گیری و مقایسه رشد طول ترک در روسازی درزگیری شده و درزگیری نشده به کمک لیزر سه‌بعدی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که آب‌بندی ترک می‌تواند رشد ترک را ۴۰٪ تا ۱۲۸٪ به تأخیر بیندازد. بنابراین، ارگان‌های مدیریت روسازی می‌توانند با اعمال آب‌بندی ترک قبل از بدتر شدن شرایط روسازی، عمر مفید روسازی‌ها را افزایش دهند. همچنین، دپارتمان حمل‌ونقل اوهایو پژوهشی با هدف بررسی اثربخشی درزگیری ترک بر قابلیت خدمت‌دهی<sup>۱</sup> و عمر آسفالت انجام داد، که طی آن امتیاز وضعیت روسازی (PCR)<sup>۲</sup> را بر اساس داده‌های خرابی محاسبه و به‌عنوان شاخصی از عملکرد روسازی‌های درزگیری شده به کار برد. نتایج این مطالعه نشان داد که قطعات روسازی درزگیری شده دارای عملکرد بهتری نسبت به قطعات درزگیری نشده در یک چرخه عمر ۵ ساله هستند. همچنین، بر اساس نتایج مدل‌های پیش‌بینی عملکرد،

<sup>۲</sup>- Pavement Condition Rating

<sup>۱</sup>- Serviceability

کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آب‌بندی ترک نه تنها تأثیر قابل توجهی بر ترک‌خوردگی تصادفی دارد، بلکه می‌تواند در مقایسه با بخش‌های ترک‌خورده ترمیم نشده، عمر سرویس روسازی (PSL) را دو سال افزایش دهد. در پژوهشی دیگر، موسی و الصیفی (۲۰۲۱) به مطالعه هزینه و ارزیابی اثربخشی آب‌بندی ترک اعمال شده روی روسازی انعطاف‌پذیر در لوئیزیانا با هدف تعیین زمان بهینه آب‌بندی ترک پرداختند. آن‌ها برای دستیابی به این اهداف، روسازی آسفالتی که ترک‌های آن آب‌بندی شده بود را در لوئیزیانا برای جمع‌آوری داده‌ها شناسایی و از داده‌های جمع‌آوری شده، روش‌های هزینه سالانه معادل و تحلیل هزینه چرخه عمر برای شناسایی زمان‌بندی بهینه آب‌بندی ترک استفاده کردند. نتایج نشان داد که اگرچه آب‌بندی ترک روشی مؤثر است اما اثربخشی و هزینه آب‌بندی ترک زمانی بهینه است که ترک‌خوردگی و خرابی آسفالت شدید نباشد.

بررسی رفتار مکانیکی آسفالت و بهبود آن به منظور افزایش عمر روسازی همواره مد نظر محققین بوده است (غفارپور جهرمی و همکاران، ۲۰۱۱). از طرفی، از آنجا که رفتار مکانیکی آسفالت خود عامل ایجاد ترک در آسفالت و همچنین متأثر از ایجاد ترک و ترمیم آن است، شناخت رفتار مکانیکی آسفالت بسیار حائز اهمیت است (کریشنان و راجاگوپال، ۲۰۰۵). در خصوص رفتار مکانیکی آسفالت، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. به‌عنوان مثال، بارمن و همکاران (۲۰۱۸) روشی جدید با هدف ساده‌سازی ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی، با استفاده از آزمایش رایج کشش غیرمستقیم پیشنهاد کردند. آن‌ها پارامتر جدیدی به نام شاخص خستگی معرفی کرده و اثرگذاری این روش را با اعتبارسنجی توسط روش‌های معمول مانند خمش نیم‌دایره‌ای و تیر چهار نقطه‌ای مشاهده کردند. همچنین، مورنو و روبیو (۲۰۱۳) تحقیقی با هدف شناسایی رابطه

گرفته طی شش سال توسط گروه حفظ روسازی (PG)<sup>۱</sup>، مرکز ملی تکنولوژی آسفالت آمریکا (NCAT)<sup>۲</sup> و بخش تحقیقات راه دپارتمان حمل‌ونقل ایالت مینسوتا، نتیجه گرفتند که افزایش عمر در اثر درزگیری (آب‌بندی) بر کردن روسازی‌های دارای وضعیت متوسط و ضعیف از ۱ تا ۷ سال، بسته به وضعیت روسازی متغیر است. همچنین، دریافتند اگر ترکیبی از درزگیری و روکش سنگدانه‌ای بر روسازی دارای وضعیت خوب اجرا شود عمر روسازی دو سال افزایش می‌یابد و در وضعیت‌های متوسط و ضعیف این مقدار با اندکی افت در حدود ۱/۵ سال خواهد بود. در پژوهش دیگری که توسط مازومدر و همکاران (۲۰۱۹) با در نظر داشتن هزینه‌های اولیه، متوسط سالانه و چرخه عمر با هدف مقایسه اقتصادی دو روش درزگیری انجام شد، مشخص گردید که در یک دوره طولانی، آب‌بندی، روش نگهداری مقرون به‌صرفه‌تری در مقایسه با پر کردن است. همچنین، بر اساس نتایج تحقیق مانچ و همکاران (۲۰۲۱)، آب‌بندی ترک یک روش ترمیم مقرون به‌صرفه و پیشگیرانه مهم در حفظ روسازی است که مانع از ایجاد دیگر خرابی‌ها در روسازی می‌شود. لذا، تعیین یک دستورالعمل برای انتخاب مناسب‌ترین روش آب‌بندی ترک ضروری است. موسی و همکاران (۲۰۱۸) با تأکید بر اینکه آب‌بندی ترک یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ترمیم ترک‌های طولی و عرضی است که در دسته‌بندی روش‌های نگهداری پیشگیرانه قرار می‌گیرد، پژوهشی با هدف ارزیابی عملکرد میدانی و مقرون به‌صرفه بودن آب‌بندی ترک در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و مرکب در آب‌وهوای گرم و مرطوب انجام دادند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف، ۲۸ بخش کنترلی که بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۰ ترک خورده بودند را حداقل به مدت چهار سال تحت نظارت قرار دادند و عملکرد این مقاطع بر اساس شاخص ترک تصادفی (RCI) و شاخص زبری (RI) بررسی

<sup>۲</sup>- National Center for Asphalt Technology

<sup>۱</sup>- Pavement Preservation Group

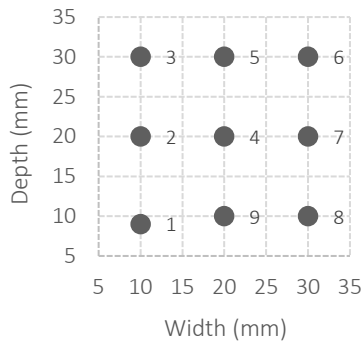
### ۳. روش تحقیق

#### ۳-۱. طرح اختلاط و تعیین درصد قیر بهینه

مواد و مصالح مصرفی در این پژوهش شامل مصالح سنگی آهکی، قیر خالص از نوع ۶۰/۷۰، قیر درزگیر با نام MEI200 (برای ترمیم ترک) و تیغه فولادی برای ایجاد ترک (شکل ۴) است.

ابعاد تیغه‌ها در شکل ۴-ب نشان داده شده است که می‌توان مشاهده کرد تیغه‌های ۱، ۴ و ۶ دارای عرض و عمق برابر، تیغه‌های ۷، ۸ و ۹ دارای عرض بزرگ‌تر از عمق و تیغه‌های ۲، ۳ و ۵ دارای عمقی بزرگ‌تر از عرضشان هستند. علت انتخاب تیغه‌های فولادی با ابعاد مختلف، در نظر گرفتن شدت‌های مختلف ترک خوردگی روسازی آسفالتی به شرح زیر است (شاهین، ۱۹۹۴):

- الف) شدت کم: عرض کمتر از ۱۰ میلی‌متر  
 ب) شدت متوسط: عرض ۱۰ تا ۷۶ میلی‌متر  
 ج) شدت زیاد: عرض بزرگ‌تر از ۷۶ میلی‌متر



(ب)



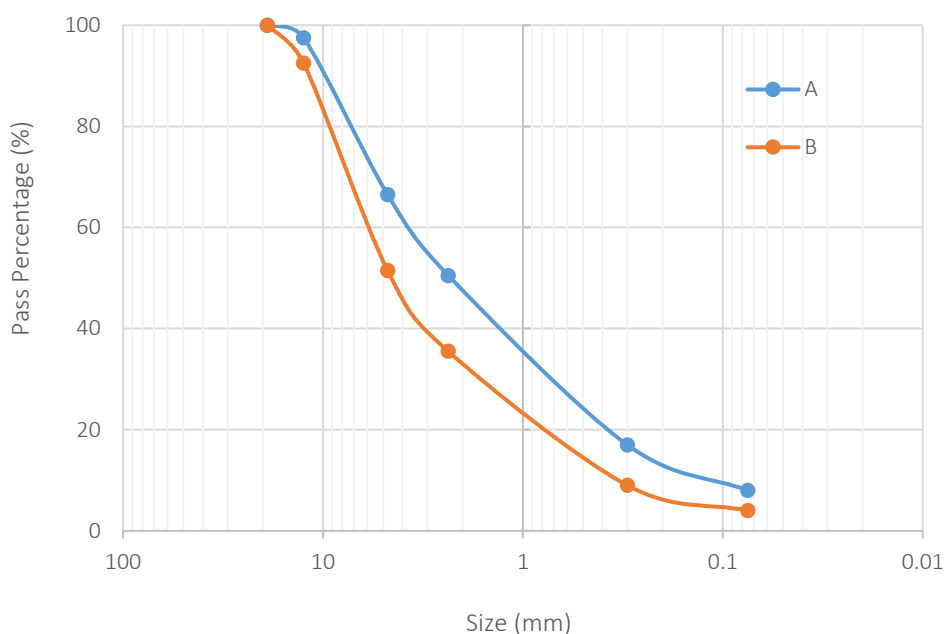
(الف)

شکل ۴. الف) تیغه‌های فولادی و ب) ابعاد تیغه‌های مورد استفاده برای ایجاد ناپیوستگی (کدگذاری ناپیوستگی)

راهبردی ریاست جمهوری با عنوان «مشخصات فنی عمومی راه» انتخاب گردیدند (نشریه ۱۰۱ مشخصات فنی عمومی راه، ۱۳۹۲). لازم به ذکر است که به دلیل حجم بالای مصالح سنگی مورد نیاز و برخی محدودیت‌های آزمایشگاهی، دو دانه‌بندی نزدیک به یکدیگر انتخاب گردیدند.

بین جنس مصالح درشت‌دانه و رفتار خستگی روسازی آسفالتی به روش UGR-FACT انجام دادند. آن‌ها با این پیش‌زمینه که چسبندگی ماده قیری و مقاومت خردشدگی مصالح سنگی وابسته به جنس آن‌ها است و بر عملکرد مخلوط تأثیرگذار، با آزمایش روی دو مخلوط مشابه اما دارای مصالح درشت‌دانه مختلف از جنس سنگ‌آهک و اورفایت، نتیجه گرفتند که جنس مصالح تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت خستگی روسازی دارد؛ چه بسا این موضوع همان‌قدر حائز اهمیت باشد که نوع قیر و ساختار معدنی سنگدانه‌ها هستند. از این‌رو، بررسی رفتار مکانیکی آسفالت با ترک‌های ترمیم‌شده حائز اهمیت است. بنابراین، این پژوهش به بررسی اثر ابعاد آسفالت دارای ترک ترمیم‌شده و ترمیم‌نشده بر رفتار مکانیکی آسفالت می‌پردازد.

با توجه به اینکه دانه‌بندی‌های متنوعی در طرح لایه‌های آسفالتی به کار می‌رود، دو ترکیب دانه‌بندی پیوسته مصالح سنگی برای این مطالعه در نظر گرفته شد. دانه‌بندی‌های مورد استفاده، مطابق شکل ۵، حدود یک‌چهارم بالا و یک‌چهارم پایین ستون شماره ۴ جدول ۲۰-۱ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان برنامه‌ریزی و معاونت



شکل ۵. نمودار دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش

### ۲-۳. ساخت نمونه های آسفالت دارای

#### ناپیوستگی و فرآیند پیرشدگی و تعمیر

پس از انجام آزمایش های طرح اختلاط و ترسیم نمودارهای مربوطه، درصد بهینه قیر به دست آمده و از آن در ساخت نمونه های دارای ناپیوستگی مورد استفاده قرار گرفت. روند ساخت نمونه های دارای ناپیوستگی همان روند ساخت نمونه های استوانه ای مارشال است؛ با این تفاوت که می بایست با استفاده از تیغه های فولادی در حین ساخت نمونه ها در آن ها ناپیوستگی ایجاد می گردید. به این منظور، پیش از تراکم نمونه ها، تیغه به همراه مجموعه قالب در گرمخانه حرارت دیده، سپس روی صفحه زیرین قالب طوری قرار داده شد که لبه ی آن به سمت بالا باشد (شکل ۶- الف) و سپس برخی از نمونه ها به کمک قیر درزگیر با نام MEI200 درزگیری می شود (شکل ۶- ب). در شکل ۷ نیز فلوجارت روند تحقیق به نمایش گذاشته شده است.

به منظور محاسبه درصد بهینه قیر دانه بندی ها، برای هر کدام از دانه بندی های مورد استفاده، پنج ترکیب آسفالتی با مقادیر مختلف قیر در نظر گرفته شد. در واقع، برای دانه بندی A نمونه هایی با درصد قیر ۳/۵، ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ و برای دانه بندی B نمونه هایی با درصد قیر ۳/۰، ۳/۵، ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ساخته شد. لازم به ذکر است که از هر ترکیب مورد نظر سه نمونه، مطابق با استاندارد AASHTO T245-97 ساخته شد. در ادامه، با انجام آزمایش های وزن مخصوص (ASTM D1188)، استقامت و روانی مارشال (AASHTO 245-97)، حداکثر وزن مخصوص نظری مخلوط آسفالتی (AASHTO T209) و محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی بتن آسفالتی و رسم نمودارهای مربوطه، میزان درصد قیر بهینه برای دانه بندی A و B به ترتیب برابر ۴/۳ و ۴ درصد تعیین شد.

جدول ۱. متغیرها در ساخت نمونه‌های دارای ناپیوستگی

متغیر	تعداد حالات	شرح
دانه‌بندی	۲	شکل ۵
ناپیوستگی	۹	شکل ۴-ب
تعمیر ناپیوستگی	۲	دو حالت تعمیر شده و تعمیر نشده
آزمونه مشابه	۲	-

کل نمونه‌های ساخته شده دارای ناپیوستگی = ۷۲ عدد

به طور مثال، نمونه‌ی B6 محتوی دانه‌بندی نوع B و دارای ناپیوستگی شماره ۶ است.

کد اختصاص یافته به هر نمونه‌ی ساخته شده، شامل یک حرف و یک عدد می‌باشد که به ترتیب، نوع دانه‌بندی و نوع ناپیوستگی ایجاد شده در آن نمونه را بیان می‌دارد.

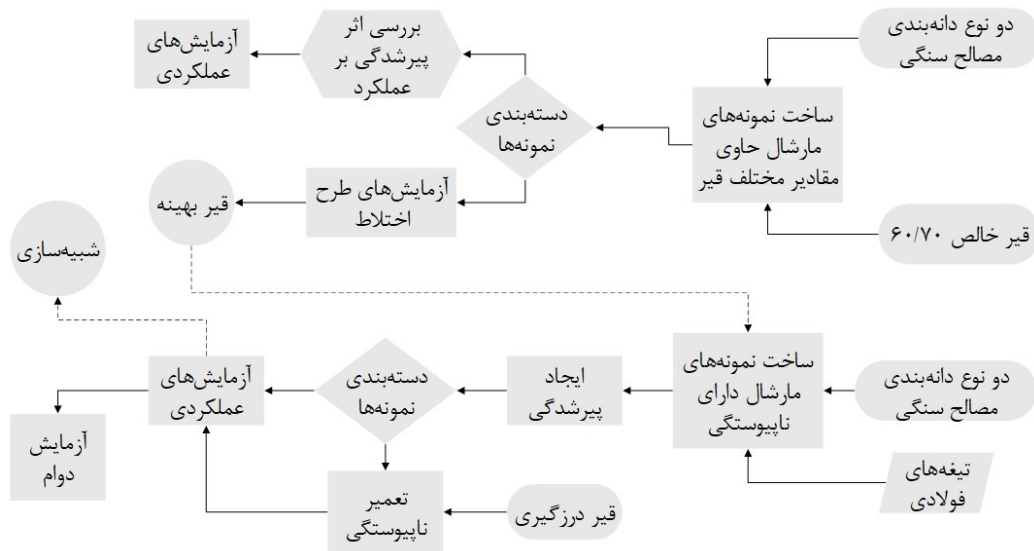


(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) ساخت نمونه آسفالتی دارای ناپیوستگی و ب) نمونه‌های تعمیر شده و تعمیر نشده



شکل ۷. فلوجارت روند تحقیق



### ۳-۳. آزمایش ها

#### ۳-۳-۱. آزمایش خزش دینامیک

آزمایش خزش دینامیک<sup>۱</sup> به منظور بررسی مقاومت مخلوطهای قیری استوانه‌ای شکل در برابر ایجاد تغییرشکل‌های دائم به وسیله‌ی بار متناوب فشاری در شرایط محدودشده انجام می‌شود. نتایج این آزمایش را می‌توان معیاری کیفی برای مقبولیت و یا رتبه‌بندی انواع مخلوطهای قیری در نظر گرفت (BSI EN 12697-25, 2016). در این پژوهش، از استاندارد BS EN 12697-25:2016 و دستگاه آزمایش عمومی (UTM)<sup>۲</sup> برای انجام این آزمایش استفاده شد (شکل ۸-الف).

#### ۳-۳-۲. آزمایش مدول برجهنگی<sup>۳</sup>

مدول برجهنگی شاخصه‌ای است معادل مدول الاستیسیته که برای مواد غیرالاستیک، از جمله آسفالت، تعریف می‌شود. مواد غیرالاستیک تحت اثر بار دچار تغییرشکل دائمی می‌شوند. اما اگر مقدار بار کم باشد و بارگذاری با تکرار دفعات زیاد اعمال گردد، تغییرشکل‌های ایجادشده برگشت پذیر بوده و ماده رفتاری مشابه رفتار الاستیک از خود نشان خواهد داد هوانگ (۱۹۹۳). آزمایش مدول برجهنگی در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM D4123-82 و بارگذاری آن به روش کشش غیرمستقیم انجام گرفت (شکل ۸-ب).

#### ۳-۳-۳. آزمایش خستگی

خستگی در مواد، به کاهش مقاومت یک ماده تحت بار تکراری در مقایسه با مقاومت آن ماده تحت بار منفرد گفته می‌شود. خستگی روسازی‌های آسفالتی به روش‌های مختلفی از جمله خمش، کشش مستقیم و غیرمستقیم سنجش می‌شود (BSI EN 12697-24:2012, 2012). در این تحقیق، آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم به وسیله فریم مخصوص آن، توسط دستگاه UTM مطابق با استاندارد BS EN 12697-24:12 انجام گرفت که در آن مدول برجهنگی، به عنوان معیاری برای سختی نمونه در هر تکرار بار محاسبه می‌گردید (شکل ۸-ج).

#### ۳-۳-۴. آزمایش دوام به روش لاتمن

قرار گرفتن روسازی در معرض آب می‌تواند باعث کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها و کاهش چشمگیر عمر آن گردد. استاندارد AASHTO T 283 با این هدف که ترکیب‌های مختلف آسفالتی تا چه حد مستعد عریان شدگی هستند به کار می‌رود (شکل ۸-د). لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های مذکور برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی تعمیرشده و تعمیرنشده انجام شد.

<sup>۲</sup>- Resilient Modulus

<sup>۱</sup>- Dynamic Creep

<sup>۲</sup>- Universal Testing Machine



(د)

(ج)

(ب)

(الف)

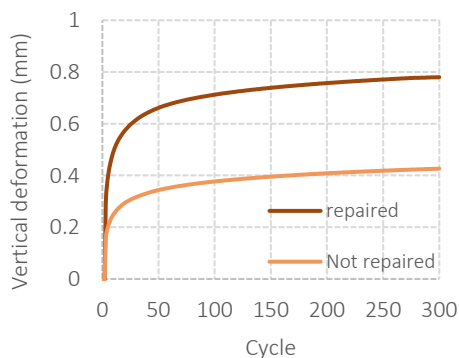
شکل ۸. آزمایش خزش دینامیک، (ب) آزمایش مدول برجهنگی، (ج) آزمایش خستگی و (د) کشش غیرمستقیم در طول ناپیوستگی

#### ۴. نتایج و بحث

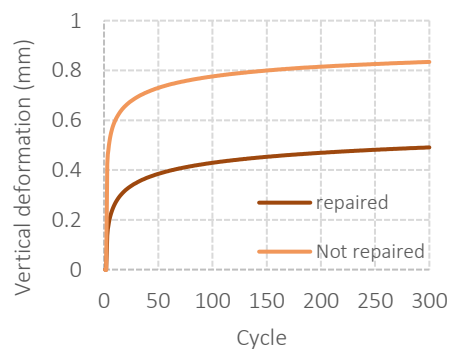
##### ۴-۱. نتایج آزمایش خزش دینامیک

اثر تعمیر مطلوب و در بدترین حالت تقریباً بدون تأثیر بوده است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ابعاد ناپیوستگی‌ها و قیر درزگیر بر رفتار شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی اثرگذار بوده و به نظر می‌رسد این اثر برای دانه‌بندی‌های مختلف یکسان نباشد. همچنین، دیده می‌شود که عرض ناپیوستگی نقش پررنگ‌تری نسبت به عمق آن بر شیارشدگی دارد که این موضوع با یافته‌های سایر محققین مطابقت دارد (خبیری و همکاران، ۲۰۱۶). فاصله بیشتر در ناحیه گسستگی روسازی باعث کاهش انتقال بار در نقطه تماس سنگدانه‌ها می‌شود. همین موضوع، ضعف ظرفیت بارپذیری روسازی را در پی دارد، که این امر در سنگدانه‌های درشت و ریزدانه در انتقال بار بین یکدیگر یکسان نیست.

نتایج آزمایش خزش دینامیک انجام شده روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی در شکل‌های ۹ و ۱۰ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به نتایج، در دانه‌بندی ریزتر A مشاهده می‌گردد که تعمیر ناپیوستگی‌های دارای عرض ۲۰ میلی‌متر و کمتر، باعث کاهش شیارشدگی و بهبود عملکرد بتن آسفالتی در این زمینه شده، در حالی که تعمیر ناپیوستگی‌های عریض‌تر نتیجه عکس دارد. از طرفی، نمودارهای دانه‌بندی درشت‌تر B نشان می‌دهند که تعمیر ناپیوستگی‌های دارای عرض و عمق برابر و یا عمقی بزرگ‌تر از عرض، باعث افزایش شیارشدگی و افت عملکرد بتن آسفالتی شده است. در حالی که در ناپیوستگی‌هایی که عرض بزرگ‌تری از عمقشان دارند،



(ب)



(الف)

شکل ۹. نمونه نتایج آزمایش خزش دینامیک: (الف)  $A_1$  و (ب)  $B_1$

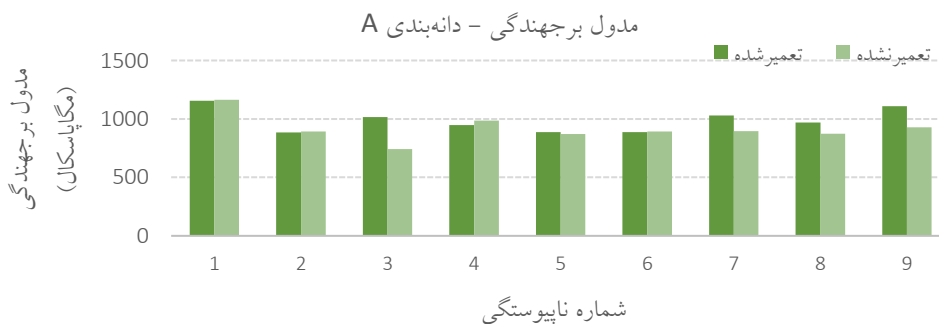


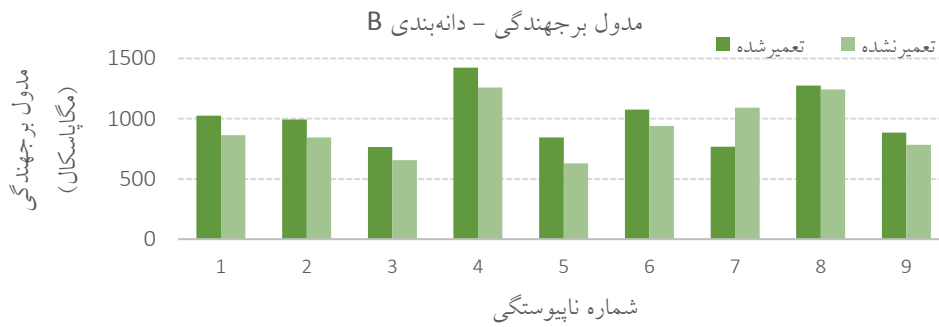
شکل ۱۰. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های خزش دینامیک

حالی که در سایر ناپیوستگی‌ها، تقریباً تغییری ایجاد نشده است. از طرف دیگر، در همه نمونه‌های تعمیرشده دانه‌بندی B، جز دو مورد، مدول برجهندگی بزرگ‌تری به نسبت نمونه‌های تعمیرنشده مشاهده شده است. نتایج در این قسمت نشان از نقش ابعاد ترک و قیر درزگیر بر شاخص مدول برجهندگی دارد. قیر درزگیر- حداقل در دمای آزمایش- مدول برجهندگی لایه آسفالتی را بهبود داده و بر سختی آن می‌افزاید که این موضوع با توجه به سختی زیاد قیر پلیمری در دمای محیط قابل انتظار بود.

#### ۲-۴. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی انجام شده روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج، می‌توان دریافت که در ناپیوستگی‌های دارای عرض بزرگ‌تر نسبت به عمق، مدول برجهندگی نمونه‌های تعمیرشده بزرگ‌تر از نمونه‌های تعمیرنشده است. همچنین، در سری A3 نیز که بزرگ‌ترین نسبت عمق به عرض را در بین ناپیوستگی‌ها دارد، تعمیر ناپیوستگی باعث افزایش مدول برجهندگی شده است؛ در



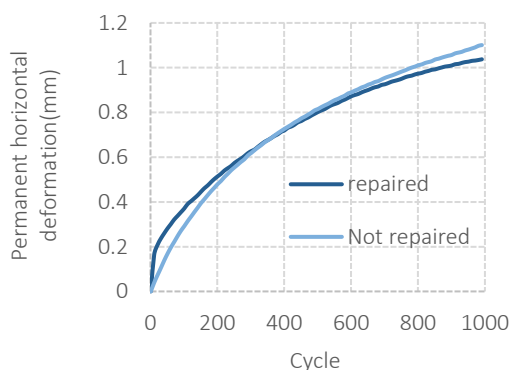


شکل ۱۱. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های مدول برجهندگی

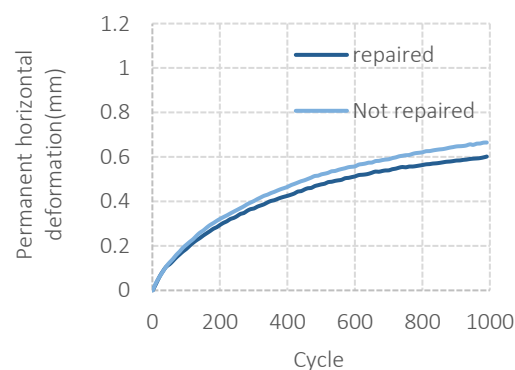
برای دانه‌بندی B، نتایج ناپیوستگی‌هایی که مجموع ابعاد عرض و عمق آن‌ها برابر با ۴۰ میلی‌متر بود، افت عملکرد خستگی، و سایر ناپیوستگی‌ها بهبود عملکرد خستگی را در اثر استفاده از قیر درزگیری نشان می‌دهند. نتایج این بخش نیز همانند دو بخش قبل، نشان‌دهنده اثر ابعاد مختلف ترک و قیر درزگیر بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین، مشاهده می‌گردد که برای رفتار خستگی، عامل عمق ترک در دانه‌بندی ریزتر اثرگذارتر است؛ در حالی که برای دانه‌بندی درشت‌تر، عمق و عرض ترک، هر دوی یک اندازه اثرگذار می‌باشند.

### ۳-۴. نتایج آزمایش خستگی

نتایج آزمایش خستگی انجام شده روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج، در دانه‌بندی A و ناپیوستگی‌های دارای عمق ۳۰ میلی‌متر و ناپیوستگی ۴ که دارای عرض و عمق برابر با ۲۰ میلی‌متر است، کاهش تغییرشکل افقی دائمی و در نتیجه بهبود عملکرد خستگی را در نمونه‌های تعمیرشده می‌توان مشاهده کرد؛ در حالی که در سایر ناپیوستگی‌ها تغییر چشمگیری دیده نمی‌شود. در مقابل،

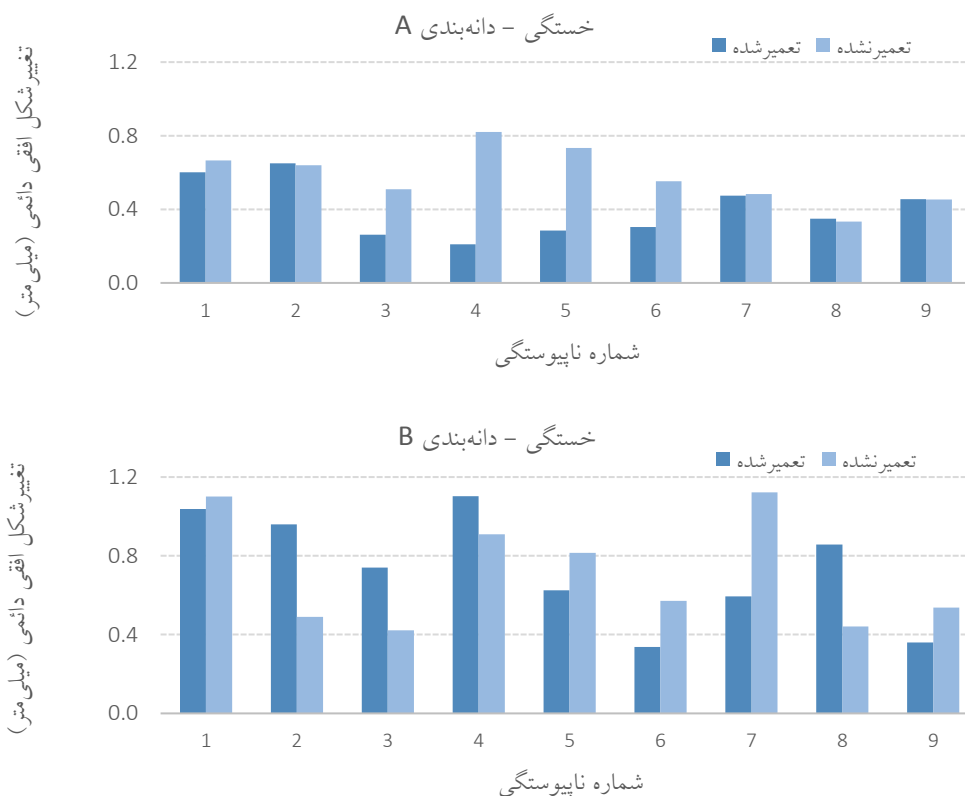


(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمونه نتایج آزمایش خستگی: الف)  $A_1$  و ب)  $B_1$



شکل ۱۳. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های خستگی

#### ۴-۴. نتایج آزمایش دوام

با توجه به در اختیار داشتن چهار نمونه برای هر نوع ناپیوستگی، که نیمی از آن‌ها تعمیرشده بود، یک نمونه تعمیرشده و یک نمونه تعمیرنشده، عمل‌آوری شده و دو نمونه دیگر در شرایط عادی مورد آزمایش قرار گرفتند. سپس، نسبت مقاومت کششی نمونه‌های با و بدون قرارگیری در شرایط عمل‌آوری، با توجه به حالت تعمیر شدگی و تعمیر نشدگی، محاسبه شد که نتایج در شکل ۱۴ ارائه شده است. نتایج، برای نمونه‌های حاوی دانه‌بندی A، ناپیوستگی‌های دارای عرضی بزرگ‌تر از عمق، افزایش نسبت مقاومت کششی را در حالت تعمیرشده نشان می‌دهد. در حالی که این موضوع برای

دانه‌بندی B، در ناپیوستگی‌هایی دیده می‌شود که عرضی برابر با ۳۰ میلی‌متر داشته‌اند. نتایج این قسمت نیز اثرگذاری ابعاد ترک و قیر درزگیری را بر دوام مخلوط‌های آسفالتی تأیید کرده و نشان می‌دهند که عرض ترک نقش مهم‌تری بر این شاخص نسبت به عمق ترک دارد که این موضوع با یافته‌های سایر پژوهشگران نیز مطابقت دارد (خبیری و همکاران، ۲۰۱۶). به عبارتی، با افزایش ناپیوستگی، امکان انتقال بار بین دو بخش روسازی کاهش می‌یابد و شدت تنش در نوک ترک افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش عرض، در معرض قرارگرفتن بخش بیشتری از مخلوط آسفالتی اتفاق می‌افتد و در پی آن دوام کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های دوام

#### ۴-۵. تحلیل آماری و نتایج آن

در این بخش، با استفاده از تحلیل آماری به بررسی میزان بهبود خصوصیات عملکردی آسفالت پس از تعمیر ناپیوستگی‌ها پرداخته می‌شود. برای مشخص شدن میزان اثرگذاری تعمیر ناپیوستگی‌ها بر نتایج آزمایشگاهی، از آزمون آماری T نمونه‌های وابسته، با کمک نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS، استفاده گردید. این آزمون آماری برای بررسی اثر یک تغییر با مقایسه داده‌های جمع‌آوری شده قبل و بعد به کار می‌رود. از فرضیات لازم پیش از انجام آزمون T، توزیع نرمال داده‌ها است. به دلیل نامشخص بودن این موضوع برای داده‌های در دست، در ابتدا با اجرای آزمون شاپیرو-ویلک، نرمال بودن توزیع داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون در

جدول ۲ نشان داده شده است. با مقایسه مقدار احتمال «P» محاسبه‌شده با کمترین مقدار سطح معنی‌داری، می‌توان بر رد یا قبول فرض صفر تصمیم گرفت. اگر احتمال P از کمترین مقدار سطح معنی‌داری کوچک‌تر باشد، فرض صفر رد و اگر بزرگ‌تر باشد، دلیلی برای رد فرض صفر وجود ندارد. کمترین مقدار سطح معنی‌داری در اینجا برابر با مقدار معمول ۰/۰۵ انتخاب گردیده است. همچنین، به منظور تکمیل مطلب، شاخص‌های چولگی و کشیدگی داده‌ها نیز بررسی گردید. حدود مجاز این دو شاخص برای داده‌های دارای توزیع نرمال، ۲ تا ۲- است. با مشخص شدن توزیع نرمال داده‌ها، آزمون T نمونه‌های وابسته روی آن‌ها اجرا شد.

## جدول ۲. نتایج تحلیل های آماری

فرض صفر: داده ها از توزیع نرمال تفاوت معناداری ندارند.						
فرض مقابل: داده ها از توزیع نرمال تفاوت معناداری دارند.						
بررسی نرمال بودن توزیع داده						
داده ها	وضعیت	احتمال P	$> 0/05$	چولگی	کشیدگی	نتیجه
خزش دینامیک	تعمیرشده	۰/۴۳۳	بله	۰/۷۰۴	-۰/۰۶۷	نرمال
	تعمیرنشده	۰/۴۷۹	بله	۰/۲۹۷	-۰/۷۸۹	نرمال
مدول برجهنگی	تعمیرشده	۰/۲۱۶	بله	۰/۹۸۳	۱/۱۷۴	نرمال
	تعمیرنشده	۰/۲۵۲	بله	۰/۴۷۸	-۰/۰۳۲	نرمال
خستگی	تعمیرشده	۰/۱۳۹	بله	۰/۶۱۲	-۰/۷۵۷	نرمال
	تعمیرنشده	۰/۸۰	بله	۰/۹۰۴	-۰/۰۰۲	نرمال
دوام (درصد افت مقاومت کششی)	تعمیرشده	۰/۴۵۶	بله	۰/۶۱۵	-۰/۳۳۷	نرمال
	تعمیرنشده	۰/۱۳۶	بله	-۰/۲۷۸	-۱/۲۵۰	نرمال

## نتایج آزمون T

داده ها	وضعیت	میانگین	تفاضل میانگین ها	احتمال P	$> 0/5$	تفاوت معنی دار؟
خزش دینامیک	تعمیرشده	۰/۵۶۴۷۶	۰/۰۰۵۱۹	۰/۹۰۷	بله	خیر
	تعمیرنشده	۰/۵۵۹۵۷				
مدول برجهنگی	تعمیرشده	۹۹۶/۶۷	۷۶/۶۶۷	۰/۰۲۵	خیر	بله
	تعمیرنشده	۹۲۰/۰				
خستگی	تعمیرشده	۰/۵۶۶۸۹	-۰/۰۷۷۴۹	۰/۲۸۹	بله	خیر
	تعمیرنشده	۰/۶۴۴۳۸				
دوام	تعمیرشده	۰/۷۷۹۴	۰/۰۰۵	۰/۸۴۲	بله	خیر
	تعمیرنشده	۰/۷۷۴۴				

برجهنگی تأثیرگذار بوده و میانگین داده ها را به مقدار ۷۶ مگاپاسکال ارتقا بخشیده است.

## ۵. نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ابعاد ناپیوستگی و تعمیر آن در رفتار مکانیکی آسفالت انجام شده است. از این رو، نمونه های آسفالتی دارای ناپیوستگی تعمیرشده و

با توجه به نتایج آزمون T، می توان مشاهده کرد که به لحاظ آماری، تفاوت معنی داری بین میانگین داده های خزش دینامیک، خستگی و دوام، در دو حالت تعمیرشده و تعمیرنشده، وجود ندارد؛ در حالی که داده های مدول برجهنگی عکس این موضوع دیده می شود. به عبارت دیگر، تعمیر ناپیوستگی ها در حالی که نتوانسته به طور متوسط عملکرد بتن آسفالتی را در آزمایش های خزش دینامیک، خستگی و دوام بهبود دهد، اما بر مدول

دانه‌بندی، می‌تواند بهبود دوام بتن آسفالتی را موجب شود.

- با در نظر گرفتن برآیند رفتارهای شیارشدگی، خستگی، مدول برجهندگی و دوام برای تعیین عملکرد کلی، درزگیری ترک‌های دارای عرض برابر با ۲۰ میلی‌متر در لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر، بهترین عملکرد درزگیری را در پی خواهد داشت. بهترین عملکرد درزگیری برای دانه‌بندی‌های درشت‌تر، درزگیری ترک‌هایی با عرض برابر یا بزرگتر از ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

- عرض ناپیوستگی نقش پررنگ‌تری نسبت به عمق آن بر رفتار شیارشدگی و دوام دارد. این موضوع در یافته‌های سایر محققین نیز دیده می‌شود.

- بُعد (عرض یا عمق) غالب ناپیوستگی بر رفتار خستگی، همواره یکسان نبوده و بستگی به نوع دانه‌بندی دارد.

- این یافته‌ها می‌تواند در تصمیم‌گیری زمان مناسب درزگیری ترک‌ها پس از ایجاد آن‌ها و بهبود برخی خصوصیات روسازی به موازات ترمیم ترک‌ها، کلیدی باشد. اما به طور کلی، اثر مطلوب درزگیری بر رفتارهای شیارشدگی، خستگی و دوام رویه‌های آسفالتی، جزئی و عمدتاً قابل صرف نظر است. با این وجود، می‌توان درزگیری را یکی از راه‌های افزایش مدول برجهندگی رویه‌های ترک‌خورده تا ۹٪ در نظر گرفت.

تعمیرنشده ساخته شد و سپس آزمایش‌های خزش دینامیک، مدول برجهندگی، خستگی و آزمایش دوام به روش لاتمن روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- برای لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر، درزگیری ترک‌های کم‌عرض (تا عرض ۲۰ میلی‌متر)، مقاومت در برابر شیارشدگی بتن آسفالتی را بهبود می‌بخشد و برای لایه‌ای با دانه‌بندی درشت‌تر، به نظر می‌رسد درزگیری ترک‌های عمیق‌تر نسبت به عرض، باعث کاهش مقاومت بتن آسفالتی در برابر شیارشدگی شود.

- برای لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر، درزگیری ترک‌ها می‌تواند مقاومت بتن آسفالتی را در برابر خستگی، بدون توجه به ابعاد ترک، افزایش دهد. برای لایه‌ای با دانه‌بندی درشت‌تر، درزگیری ترک‌هایی که مجموع ابعاد عرض و عمق آن‌ها برابر با ۴۰ میلی‌متر باشد احتمالاً کاهش عملکرد خستگی را در پی خواهد داشت. برای اظهار نظر قاطعانه‌تر نیاز به تحقیقات بیشتری احساس می‌گردد.

- برای لایه‌ای با دانه‌بندی ریزتر، درزگیری ترک‌های عریض‌تر نسبت به عمق، باعث افزایش مدول برجهندگی بتن آسفالتی می‌شود. برای لایه‌ای با دانه‌بندی درشت‌تر، درزگیری ترک بدون توجه به ابعاد آن، می‌تواند مدول برجهندگی بتن آسفالتی را بهبود بخشد.

- نتایج بیانگر این است که درزگیری ترک‌های عریض‌تر از ۲۰ میلی‌متر، بدون توجه به نوع



## ۶. مراجع

- Akhavan Behabadi, M. 2014. "Numerical study of fatigue crack growth in flexible pavement under aircraft loading". Yazd University. (In Persian)
- Alabi, B. N. T. and Keller, J. 2018. "Effectiveness of crack sealing in reducing the rate of pavement deterioration". *Infrastruct. Asset Manag.*, 6(1): 30-39.
- Balzarini, D., Erskine, J. and Nieminen, M. 2021. "Use of the pavement surface cracking metric to quantify distresses from digital images". *Transport. Res. Record*, <https://doi.org/10.1177/03611981211008189>
- Barman, M., Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M. and Commuri, S. 2018. "An alternative analysis of indirect tensile test results for evaluating fatigue characteristics of asphalt mixes". *Constr. Build. Mater.*, 166: 204-213.
- BSI EN 12697-24:2012. 2012. "Bituminous mixtures- Test methods- Part 24: Resistance to fatigue". British Standards Institution, London.
- BSI EN 12697-25:2016. 2016. "Bituminous mixtures- Test methods- Part 25: Cyclic compression test". British Standards Institution, London.
- Canestrari, F. and Ingrassia, L. P. 2020. "A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 7(5): 541-572.
- Chen, D. H., Lin, D. F. and Luo, H. L. 2003. "Effectiveness of preventative maintenance treatments using fourteen SPS-3 sites in Texas". *J. Perform. Constr. Facilities*, 17(3): 136-143.
- Chichak, M. 1993. "Hot-applied rubber-modified crack sealer use in Alberta". Alberta Transportation and Utilities, Research and Development Branch.
- Ghaffarpour Jahromi, S., Vosogh, Sh., Ahmadi, N. and Andalibizadeh, B. 2011. "Performance of nanoclay and sedimentary calcium carbonate on the mechanical properties of asphalt mixtures". *J. Civ. Eng. Survey.*, 45(3): 335-344. (In Persian)
- Huang, Y. H. 1993. "Pavement analysis and design". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Javani, M., Kashi, E. and Mohamadi, S. 2019. Effect of polypropylene fibers and recycled glass on AC mixtures mechanical properties". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 12(5): 464-471.
- Khabiri, M., Saberian, M. and Rahgozar, M. 2016. "Interaction of subgrade resistance and dimensions of asphalt pavement surface cracks on propagation of secondary distresses". *Int. J. Integr. Eng.*, 8(3): 1-10.
- Khajepor, A. and Shad, A. 2014. "Parameters affecting the choice of materials and methods of sealing pavement cracks". First National Congress of Construction Engineering and Evaluation of Civil Projects.
- Krishnan, J. M. and Rajagopal, K. R. 2005. "On the mechanical behavior of asphalt". *Mech. Mater.*, 37(11): 1085-1100.
- Liu, J., Yang, X., Wang, X. and Yam, J. W. 2021. "A laboratory prototype of automatic pavement crack sealing based on a modified 3D printer". *Int. J. Pavement Eng.*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1875225>
- Motamedi, M., Shafabakhsh, Gh. and Azadi, M. 2018. "Evaluation of chemical, physical and fatigue properties of modified asphalt binder with nanosilica and synthesized polyurethane". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 4(3): 33-44. (In Persian)
- Mazumder, M., Kim, H. H. and Lee, S. J. 2019. "Comparison of field performance of crack treatment methods in asphalt pavement of Texas". *J. Transport. Eng., Part B: Pavements*, 145(1): 4018057.
- Mazumder, M., Kim, H. H., Lee, S. J. and Lee, M. S. 2019. "Cost effectiveness of crack treatment methods: A field study". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 6(6): 598-607.
- Moreno, F. and Rubio, M. C. 2013. "Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes". *Mater. Design*, 47: 61-67.
- Mousa, M., Elseifi, M. A., Bashar, M., Zhang, Z. and Gaspard, K. 2018. "Field evaluation and cost effectiveness of crack sealing in flexible and composite pavements". *Transport. Res. Record*, 2672(12): 51-61.
- Mousa, M. R. and Elseifi, M. A. 2021. "Optimal application timing and cost effectiveness of crack sealing in asphalt concrete overlays in Louisiana". *Tran-SET 2020*, pp. 34-48, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Munch, J., Arepalli, U. M. and Barman, M. 2021. "Decision trees for selecting asphalt pavement crack sealing method". *Transport. Res. Record*, 2675(1): 172-183.
- Publication No. 101. 2013. "General technical specifications of the road". Deputy for Strategic Supervision of Technical System Affairs, Second Review. (In Persian)
- Rajagopal, A. 2011. "Effectiveness of crack sealing on pavement serviceability and life". Final report, Ohio Department of Transportation, 81 p.
- Seyed Mahmoudi, S. R. and Shahri, R.. 2017. "Evaluation and review of failures in the asphalt pavement of

- roads and urban thoroughfares and the steps of the maintenance process”. J. Sci. Eng. Elites, 2(6): 107-126. (In Persian)
- Shahin, M. Y. 1994. “Pavement management for airports, roads, and parking lots”. Chapman and Hall.
- Vargas-Nordbeck, A. and Jalali, F. 2020. “Life-extending benefit of crack sealing for pavement preservation”. Transport. Res. Record, 2674(1): 272-281.
- Yang, Z., Zhang, X., Tsai, Y. and Wang, Z. 2021. “Quantitative assessments of crack sealing benefits by 3D laser technology”. Transport. Res. Record, 2675(12): 103-116.
- Zhou, F., Im, S., Sun, L. and Scullion, T. 2017. “Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA”. Road Mater. Pavement Design, 18(S4): 405-427.
- Ziari, M., Karim, P. H. and Moghadasnejad, F. 2020. “Study of crack growth in asphalt mixtures containing polyphosphoric acid”. 12<sup>th</sup> Iranian Bitumen and Asphalt Conference. (In Persian)

## ۱. پیوست‌ها

جدول پ ۱. کد و ابعاد نمونه‌های دارای ناپیوستگی

Specimen ID	Type	Variation	Condition	D (mm)	t (mm)	Specimen ID	Condition	Type	Variation	D (mm)	t (mm)
A1_1	A1	1	Treated	101.6	64.1	B1_1	Treated	B1	1	101.6	64.7
A1_2		2		101.6	65.4	B1_2			2	101.6	63.7
A1_3		3	Non-treated	101.6	64.6	B1_3	Non-treated		3	101.6	65.0
A1_4		4		101.6	64.2	B1_4			4	101.6	65.0
A2_1	A2	1	Treated	101.6	65.7	B2_1	Treated	B2	1	101.6	67.2
A2_2		2		101.6	65.0	B2_2			2	101.6	66.8
A2_3		3	Non-treated	101.6	65.3	B2_3	Non-treated		3	101.6	65.5
A2_4		4		101.6	65.0	B2_4			4	101.6	67.1
A3_1	A3	1	Treated	101.6	66.3	B3_1	Treated	B3	1	101.6	67.1
A3_2		2		101.6	65.4	B3_2			2	101.6	67.2
A3_3		3	Non-treated	101.6	65.8	B3_3	Non-treated		3	101.6	67.3
A3_4		4		101.6	66.3	B3_4			4	101.6	68.0
A4_1	A4	1	Treated	101.6	66.3	B4_1	Treated	B4	1	101.6	67.6
A4_2		2		101.6	65.9	B4_2			2	101.6	67.6
A4_3		3	Non-treated	101.6	65.0	B4_3	Non-treated		3	101.6	69.0
A4_4		4		101.6	65.7	B4_4			4	101.6	67.3
A5_1	A5	1	Treated	101.6	66.8	B5_1	Treated	B5	1	101.6	70.3
A5_2		2		101.6	68.5	B5_2			2	101.6	68.8
A5_3		3	Non-treated	101.6	67.9	B5_3	Non-treated		3	101.6	70.1
A5_4		4		101.6	66.0	B5_4			4	101.6	69.5
A6_1	A6	1	Treated	101.6	68.7	B6_1	Treated	B6	1	101.6	70.5
A6_2		2		101.6	68.7	B6_2			2	101.6	70.5
A6_3		3	Non-treated	101.6	69.2	B6_3	Non-treated		3	101.6	71.9
A6_4		4		101.6	68.1	B6_4			4	101.6	71.2
A7_1	A7	1	Treated	101.6	67.4	B7_1	Treated	B7	1	101.6	69.1
A7_2		2		101.6	66.7	B7_2			2	101.6	68.9
A7_3		3	Non-treated	101.6	67.6	B7_3	Non-treated		3	101.6	70.6
A7_4		4		101.6	66.5	B7_4			4	101.6	69.3
A8_1	A8	1	Treated	101.6	65.9	B8_1	Treated	B8	1	101.6	66.3
A8_2		2		101.6	64.8	B8_2			2	101.6	67.8
A8_3		3	Non-treated	101.6	65.2	B8_3	Non-treated		3	101.6	66.7
A8_4		4		101.6	65.6	B8_4			4	101.6	67.3
A9_1	A9	1	Treated	101.6	64.8	B9_1	Treated	B9	1	101.6	67.3
A9_2		2		101.6	65.3	B9_2			2	101.6	67.2
A9_3		3	Non-treated	101.6	65.6	B9_3	Non-treated		3	101.6	67.3
A9_4		4		101.6	65.1	B9_4			4	101.6	67.0