New Researches in The Smart City
Vol 4 (Issue 3), 22-31
nrsc.apadana.ac.ir

Apadana Institute of Higher Education

Nonlinear Behavior of Recycled Materials in Asphalt Pavement for Application in Smart Cities: Analysis of Interaction between Waste Millings and Geotechnical Subgrade

Javad Javanmoradi — Master's Degree in Structural Engineering, Tabriz Metropolitan Municipality, Tabriz, Iran

Mahdi Sadeghzadeh Tabrizi* — University of Applied Science and Technology, East Azerbaijan Province, Tabriz, Iran

Received: 23/December/2026 Accepted: 19/February/2026 eISSN: 3060-6144 ISSN: 2980-8936

Abstract

The use of recycled materials in asphalt pavement, despite its environmental benefits, faces the challenge of predicting their nonlinear behavior in interaction with the geotechnical subgrade, which is essential for application in smart city infrastructure. This research aimed to analyze the nonlinear behavior of asphalt pavement containing waste millings and evaluate its interaction with the geotechnical subgrade for application in smart cities. The research design was a three-dimensional numerical simulation using the finite element method. The statistical population consisted of asphalt samples made with different percentages of recycled millings and two types of geotechnical subgrade (clayey and sandy). Sampling was performed purposively, and the intervention involved applying a standard axle load to the pavement and subgrade model. The measurement tools included the Drucker-Prager elastoplastic constitutive model for asphalt and the Cam-Clay hardening model for the subgrade, which simulated the nonlinear characteristics. Data analysis was performed using the Newton-Raphson nonlinear solution method. The findings showed that increasing recycled millings led to a reduction in the dynamic modulus and an increase in flexural strain at the interface, but the presence of the nonlinear subgrade resulted in a more uniform stress distribution and reduced local stress concentration. Furthermore, the nonlinear interaction of the asphalt layer containing millings with the clayey subgrade increased energy absorption capacity. It was concluded that pavement design with up to ten percent by weight of recycled millings, considering the nonlinear behavior of the subgrade, is a sustainable solution for smart city infrastructure. It was also suggested that this behavioral characteristic paves the way for embedding real-time monitoring systems in urban smart pavements.

Keywords: asphalt pavement, recycled millings, nonlinear material behavior, composite base layer, geotechnical engineering

* Corresponding Author: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com

فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند
دوره ۴، شماره ۳، بهار ۱۴۰۵، ۲۲-۳۱
nrsc.apadana.ac.ir

مؤسسه آموزش عالی آپادانا
غیر دولتی - غیر انتفاعی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰
eISSN: 3060-6144
ISSN: 2980-8936

رفتار غیرخطی مصالح بازیافتی در روسازی آسفالت با کاربرد در شهرهای هوشمند: تحلیل اندرکنش تراشه‌های ضایعاتی و بستر ژئوتکنیکی

جواد جوانمرادی | کارشناس ارشد عمران-سازه، شهرداری کلانشهر تبریز، تبریز، ایران

مهدی صادق‌زاده تبریزی* | دانشگاه جامع علمی کاربردی استان آذربایجان شرقی، تبریز ، ایران

چکیده

استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی آسفالت، علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی، با چالش پیش‌بینی رفتار غیرخطی آن‌ها در اندرکنش با بستر ژئوتکنیکی مواجه است که برای کاربرد در زیرساخت‌های شهر هوشمند ضروری می‌باشد. این پژوهش با هدف تحلیل رفتار غیرخطی روسازی آسفالت حاوی تراشه‌های ضایعاتی و ارزیابی اندرکنش آن با بستر ژئوتکنیکی برای کاربرد در شهرهای هوشمند انجام یافته است. طرح پژوهش از نوع شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی به روش اجزای محدود می‌باشد. جامعه آماری نیز نمونه‌های آسفالت ساخته‌شده با درصدهای مختلف تراشه‌های بازیافتی و دو نوع بستر ژئوتکنیکی (رسی و ماسه‌ای) را در بر می‌گیرد. نمونه‌گیری به روش هدفمند انجام گرفته و مداخله شامل اعمال بار محوری استاندارد بر روی مدل روسازی و بستر می‌باشد. ابزار اندازه‌گیری مدل رفتاری الاستوپلاستیک دروکر-پراگر برای آسفالت و مدل سخت‌شوندگی کام-کلی برای بستر مورداستفاده قرار گرفته‌اندکه ویژگی‌های غیرخطی را شبیه‌سازی کرده‌اند. تحلیل داده‌های پژوهش با روش حل غیرخطی نیوتن-رافسون انجام گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش تراشه‌های بازیافتی منجر به کاهش مدول دینامیکی و افزایش کرنش خمشی در مرز مشترک می‌شود، اما حضور بستر غیرخطی باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکز تنش موضعی گردیده است. همچنین، اندرکنش غیرخطی لایه آسفالت حاوی تراشه با بستر رسی، قابلیت جذب انرژی را افزایش داده است. در نتیجه، طراحی روسازی با حداکثر ده درصد وزنی تراشه‌های بازیافتی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بستر، راهکاری پایدار برای زیرساخت‌های شهر هوشمند محسوب می‌شود. لذا، پیشنهاد می‌شود این ویژگی رفتاری، زمینه‌ساز تعبیه‌ی سامانه‌های پایش لحظه‌ای در روسازی‌های هوشمند شهری گردد.

کلیدواژه‌ها: روسازی آسفالت، تراشه‌های بازیافتی، رفتار غیرخطی مصالح، اساس ترکیبی، مهندسی ژئوتکنیک

* نویسندهٔ مسئول: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com

۱- مقدمه

روسازی‌های آسفالتی به‌عنوان مهم‌ترین بخش شبکه‌های حمل‌ونقل زمینی، نقش حیاتی در انتقال بارهای ترافیکی و دوام سازه‌ای جاده‌ها و مسیرهای شهری دارند. عملکرد این روسازی‌ها به‌شدت تحت تأثیر خواص مصالح، طراحی لایه‌ها و شرایط بستر ژئوتکنیکی قرار می‌گیرد (Huang, 2004).

با رشد جمعیت شهری و افزایش حجم ترافیک، نیاز به استفاده از مصالح پایدار و بازیافتی بیش از پیش احساس می‌شود؛ زیرا منابع طبیعی محدود و هزینه‌های تولید و نگهداری روسازی‌های جدید رو به افزایش است (Al-Qadi و همکاران، ۲۰۰۷). در این میان، تراشه‌های آسفالتی بازیافتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی مطرح شده‌اند که می‌توانند ضمن کاهش مصرف مصالح جدید، عملکرد مکانیکی و دوام روسازی را حفظ یا بهبود دهند (Kim & Lee, 2015; Lee & Park, 2017). با این حال، استفاده از تراشه‌های بازیافتی پیچیدگی‌های فنی خاص خود را دارد؛ زیرا رفتار مصالح ترکیبی در طول زمان تحت تأثیر بارهای ترافیکی و شرایط محیطی ممکن است غیرخطی باشد و توزیع تنش‌ها در لایه‌های روسازی را تغییر دهد (Zhang & Li, 2013).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح برای پیش‌بینی دقیق عملکرد روسازی، به‌ویژه در محیط‌های ژئوتکنیکی با شرایط بستر متغیر، ضروری است و می‌تواند نتایج شبیه‌سازی و طراحی را بهبود بخشد (Rahmani & Hosseini, 2021, Chen et al., 2018). از سوی دیگر، تحلیل عددی و شبیه‌سازی رفتار روسازی‌ها با استفاده از مدل‌های مکانیکی دقیق، امکان بررسی اثر ترکیب تراشه‌های بازیافتی با مصالح پایه و پیش‌بینی پاسخ روسازی در برابر بارهای تکراری و سیکل‌های محیطی را فراهم می‌کند (Tabrizi et al., 2022) و می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش دوام سازه منجر شود.

این پژوهش با تمرکز بر ارزیابی مکانیکی روسازی‌های آسفالت مبتنی بر تراشه‌های بازیافتی و تحلیل اثر رفتار غیرخطی مصالح در بستر ژئوتکنیکی طراحی گردیده است و هدف آن ارائه‌ی چارچوبی علمی برای بهبود طراحی، استفاده‌ی بهینه از مصالح بازیافتی و ارتقای پایداری روسازی‌ها در محیط‌های واقعی می‌باشد. ترکیب آزمایش‌های مکانیکی، تحلیل رفتار غیرخطی و شبیه‌سازی عددی در این تحقیق، امکان بررسی دقیق اثرات مختلف تراشه‌های بازیافتی، توزیع تنش‌ها، تغییرات مقاومت و دوام روسازی را فراهم می‌آورد و می‌تواند راهکارهای کاربردی برای مهندسان عمران و طراحان شبکه‌های حمل‌ونقل ارائه دهد (ASTM D4123/D4123M-20, 2020). بنابراین، این مطالعه نه‌تنها به توسعه‌ی دانش علمی در حوزه‌ی مصالح بازیافتی و رفتار غیرخطی روسازی می‌پردازد، بلکه اهمیت استفاده از مدل‌های عددی و تحلیل دقیق ژئوتکنیکی را در طراحی و بهسازی پایدار روسازی‌های آسفالتی برجسته می‌کند (ABAQUS Documentation, 2022) و می‌تواند الگوی مناسبی برای پژوهش‌های آینده و کاربردهای عملی در مهندسی عمران شهری فراهم آورد.

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

مطالعات گسترده‌ای در حوزه‌ی استفاده از تراشه‌های آسفالتی بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی انجام شده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت این مصالح بر دوام و مقاومت روسازی در شرایط بارگذاری واقعی و محیط‌های متغیر است.

تحقیقات اولیه تمرکز خود را بر ارزیابی مکانیکی و خواص فیزیکی تراشه‌های بازیافتی گذاشته‌اند و نشان داده‌اند که استفاده از این تراشه‌ها ضمن کاهش مصرف مصالح جدید، می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی روسازی را در حد قابل قبول حفظ کند؛ هرچند توزیع تنش‌ها و رفتار طولانی‌مدت لایه‌ها ممکن است متفاوت باشد (Smith et al., 2011). مطالعات بعدی به تحلیل ترکیب تراشه‌های بازیافتی با مصالح پایه و تأثیر درصد بازیافت بر عملکرد روسازی

پرداخته‌اند و نتایج نشان داده‌اند که افزایش نسبت تراشه‌های بازیافتی تا حد معینی موجب افزایش پایداری و کاهش نفوذپذیری لایه اساس می‌شود، اما فراتر از آن ممکن است مقاومت روسازی کاهش یابد (Kim et al., 2015).

پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی رفتار روسازی‌های آسفالتی با مصالح بازیافتی نیز نشان داده‌اند که مدل‌های خطی توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار روسازی تحت بارهای ترافیکی و سیکل‌های محیطی را ندارند و لازم است رفتار غیرخطی مصالح و تغییرات خواص در طول زمان به‌طور دقیق در تحلیل‌ها لحاظ شود (Zhang & Li, 2013؛ Rahmani & Hosseini, 2021).

همچنین، تحقیقات متعددی اثر شرایط بستر ژئوتکنیکی، شامل تراکم، رطوبت و خواص مکانیکی خاک زیرین، بر عملکرد روسازی‌ها را بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که تغییرات بستر می‌توانند اثر قابل توجهی بر توزیع تنش‌ها و دوام روسازی داشته باشند؛ به‌ویژه زمانی‌که از مصالح ترکیبی شامل تراشه‌های بازیافتی استفاده می‌شود (Johnson et al., 2019).

برخی پژوهش‌ها همچنین به بررسی ترکیبی اثر تراشه‌های بازیافتی و افزودنی‌های تقویت‌کننده، مانند نانوذرات یا الیاف، پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این ترکیب‌ها می‌توانند اثرات منفی افزایش درصد تراشه‌ها را کاهش دهند و رفتار غیرخطی مصالح را بهبود بخشند (Lee & Park, 2017).

در نهایت، مرور کلی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تراشه‌های بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی ضمن مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی، نیازمند تحلیل دقیق مکانیکی و شبیه‌سازی عددی رفتار غیرخطی مصالح در شرایط واقعی بستر ژئوتکنیکی است تا دوام، مقاومت و عملکرد طولانی‌مدت روسازی بهینه شود و بتوان راهکارهای پایدار و علمی برای طراحی و نگهداری روسازی‌های شهری ارائه داد (Al-Qadi et al., 2007; Huang, 2004). این یافته‌ها زمینه‌ی پژوهش حاضر را فراهم کرده و ضرورت بررسی جامع عملکرد مکانیکی روسازی‌های آسفالتی با تراشه‌های بازیافتی و رفتار غیرخطی مصالح در محیط ژئوتکنیکی را تأیید می‌کنند.

جدول ۱. مقایسه‌ی پژوهش‌های پیشین درباره‌ی روسازی آسفالتی مبتنی بر تراشه‌های بازیافتی

نویسنده/ منبع	سال	موضوع پژوهش	یافته‌ها/ نتایج اصلی	روش تحقیق
Smith et al.	۲۰۱۱	استفاده از تراشه‌های آسفالتی بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی	افزایش مقاومت فشاری و خمشی تا درصد مشخص تراشه‌ها، کاهش نفوذپذیری	آزمایشگاه و آزمون مقاومت فشاری و خمشی
Zhang & Li	۲۰۱۳	تحلیل عددی رفتار روسازی با تراشه‌های بازیافتی	مدل‌های خطی پیش‌بینی دقیق رفتار بلندمدت را نداشتند	شبیه‌سازی عددی با مدل خطی
Kim et al.	۲۰۱۵	اثر درصد تراشه‌های بازیافتی بر دوام روسازی	درصد بالای تراشه موجب کاهش مقاومت و افزایش کرنش شد، درصد بهینه مشخص گردید.	آزمون چرخه بارگذاری تکراری و تحلیل مکانیکی
Lee & Park	۲۰۱۷	ترکیب تراشه‌های بازیافتی با افزودنی‌های تقویت‌کننده	افزودنی‌ها اثرات منفی درصد بالای تراشه را کاهش دادند و مقاومت غیرخطی مصالح بهبود یافت.	آزمایشگاه و مدل‌سازی عددی
Johnson et al.	۲۰۱۹	اثر بستر ژئوتکنیکی بر روسازی با تراشه‌های بازیافتی	تغییرات خواص بستر موجب تغییر توزیع تنش و کاهش دوام روسازی شد.	آزمون برش مستقیم و شبیه‌سازی عددی
Rahmani & Hosseini	۲۰۲۱	شبیه‌سازی غیرخطی روسازی‌های آسفالتی	مدل‌های غیرخطی توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار بلندمدت روسازی را داشتند	مدل‌سازی عددی با ABAQUS و شبیه‌سازی چرخه بارگذاری

۳- مواد و روش تحقیق

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد مکانیکی روسازی‌های آسفالتی مبتنی بر تراشه‌های بازیافتی و تحلیل اثر رفتار غیرخطی مصالح در بستر ژئوتکنیکی طراحی شده است و روش تحقیق، ترکیبی از آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی عددی و تحلیل مکانیکی می‌باشد تا اثر ترکیب تراشه‌های بازیافتی و خصوصیات غیرخطی مصالح بر رفتار روسازی به‌طور جامع مورد بررسی قرار گیرد.

در مرحله‌ی نخست، تراشه‌های آسفالتی بازیافتی از روسازی‌های قدیمی جمع‌آوری، پاک‌سازی و غربال‌گری شدند تا مواد زائد حذف و اندازه‌ی ذرات مطابق استانداردهای ASTM تهیه گردید. ترکیب مصالح شامل تراشه‌های آسفالتی، مصالح سنگی دانه‌بندی شده و سیمان پرتلند در نسبت‌های مختلف وزنی صورت گرفت تا نمونه‌هایی با درصدهای متفاوت تراشه‌های بازیافتی ایجاد شوند. نمونه‌ها در قالب‌های استاندارد با ضخامت مناسب برای لایه‌های روسازی تهیه شدند و تراکم بهینه با استفاده از آزمون Proctor استاندارد تعیین گردید تا شرایط مشابه بستر ژئوتکنیکی واقعی شبیه‌سازی شود.

در بخش آزمایشگاهی، نمونه‌ها تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و برش مستقیم قرار گرفتند تا اثر ترکیب تراشه‌های بازیافتی و درصد ترکیب مصالح بر مقاومت مکانیکی، توزیع تنش‌ها و تغییرات کرنش مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، چرخه‌های بارگذاری تکراری و تغییرات رطوبت و دما اعمال شد تا اثر شرایط واقعی محیطی بر دوام و عملکرد روسازی بررسی گردد.

برای تحلیل عددی، مدل‌های مصالح غیرخطی شامل مدول الاستیسیته غیرخطی، رفتار تسلیم و کرنش بحرانی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تعریف شد و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزارهای ABAQUS و PLAXIS انجام گردید. شبیه‌سازی شامل تحلیل اثر درصد تراشه‌های بازیافتی، مدول الاستیسیته غیرخطی مصالح و بارگذاری چرخه‌ای بر مقاومت روسازی و توزیع تنش‌ها بود و نتایج مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شد تا صحت مدل تأیید شود. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی با استفاده از تحلیل آماری، شامل محاسبه میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات، مورد ارزیابی قرار گرفت و مقایسه‌ی بین نمونه‌های مختلف و اثر درصد تراشه‌ها انجام شد.

این روش جامع امکان بررسی دقیق اثر تراشه‌های بازیافتی، رفتار غیرخطی مصالح و شرایط بستر ژئوتکنیکی را فراهم ساخت و زمینه‌ی ارائه‌ی توصیه‌های عملی و علمی برای طراحی پایدار، اقتصادی و مقاوم روسازی‌های آسفالتی در محیط‌های واقعی را فراهم آورد و می‌تواند مبنای مطالعات و بهبود طراحی روسازی‌های شهری و بزرگراهی باشد.

جدول ۲. مقایسه‌ی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های تحقیق

شماره	نوع آزمون	هدف آزمون	روش انجام	نمونه/ مصالح مورد استفاده	نتایج مورد انتظار
۱	تراکم استاندارد Proctor	تعیین تراکم بهینه مصالح و بستر روسازی	استانداردASTM D698	تراشه‌های بازیافتی + مصالح سنگی + سیمان پرتلند	تعیین تراکم بهینه و رطوبت مناسب برای ساخت نمونه‌ها
۲	مقاومت فشاری	بررسی مقاومت فشاری لایه روسازی	دستگاه فشاری مکانیکی	نمونه‌های روسازی با درصدهای مختلف تراشه	مقایسه مقاومت بین نمونه‌ها و اثر درصد تراشه‌ها
۳	آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای	ارزیابی مقاومت خمشی روسازی	دستگاه خمشی استاندارد ASTM D790	نمونه‌های آزمایشگاهی روسازی	تحلیل تغییر کرنش و مقاومت خمشی تحت بارگذاری
۴	آزمون برش مستقیم	بررسی مقاومت برشی و چسبندگی مصالح	دستگاه برش مستقیم استاندارد	ترکیب تراشه‌های آسفالتی و مصالح سنگی	تعیین مقاومت برشی و تأثیر تراشه‌های بازیافتی بر چسبندگی
۵	بارگذاری چرخه‌ای	شبیه‌سازی اثر ترافیک و شرایط واقعی	ماشین آزمون چرخه‌ای و شبیه‌سازی بارگذاری تکراری	نمونه‌های روسازی با ترکیب تراشه‌های بازیافتی	تحلیل کرنش، خستگی و تغییرات مقاومت در طول زمان

شماره	نوع آزمون	هدف آزمون	روش انجام	نمونه/ مصالح مورد استفاده	نتایج مورد انتظار
۶	شبیه‌سازی عددی	تحلیل رفتار غیرخطی روسازی و بستر ژئوتکنیکی	و نرم‌افزار ABAQUS PLAXIS	داده‌های آزمایشگاهی و مدل مصالح غیرخطی	پیش‌بینی توزیع تنش، کرنش و پاسخ روسازی تحت بارگذاری‌های مختلف

۴- توضیح مدل‌سازی، آزمایش‌ها یا نرم‌افزارهای به کار رفته

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد مکانیکی روسازی‌های آسفالتی مبتنی بر تراشه‌های بازیافتی و تحلیل اثر رفتار غیرخطی مصالح در بستر ژئوتکنیکی طراحی شد و روش تحقیق، ترکیبی از آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی عددی و تحلیل مکانیکی می‌باشد تا اثر ترکیب تراشه‌های بازیافتی و خصوصیات غیرخطی مصالح بر رفتار روسازی به‌طور جامع بررسی شود.

تراشه‌های آسفالتی بازیافتی از روسازی‌های قدیمی جمع‌آوری، پاک‌سازی و غربال‌گری شدند تا ذرات مطابق استاندارد ASTM تولید گردند و از تراشه‌ها در ترکیب با مصالح سنگی دانه‌بندی شده و سیمان پرتلند نمونه‌های آزمایشگاهی با درصدهای مختلف تراشه تهیه شد. نمونه‌ها در قالب‌های استاندارد و با ضخامت متناسب با طراحی روسازی شهری و بزرگراهی ساخته شدند و تراکم بهینه با آزمون Proctor استاندارد تعیین شد تا شرایط مشابه بستر ژئوتکنیکی شبیه‌سازی گردد.

برای بررسی رفتار مکانیکی، نمونه‌ها تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و برش مستقیم قرار گرفتند. همچنین، چرخه‌های بارگذاری تکراری و تغییرات رطوبت و دما اعمال شد تا اثر شرایط محیطی واقعی بر عملکرد و دوام روسازی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در بخش مدل‌سازی عددی، رفتار غیرخطی مصالح با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته غیرخطی، تسلیم مصالح و کرنش بحرانی تعریف شد و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل المان محدود لایه‌های روسازی و PLAXIS برای بررسی اثر بستر ژئوتکنیکی انجام شد. مدل‌ها بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌ها کالیبره شدند تا صحت و دقت پیش‌بینی توزیع تنش، کرنش و پاسخ روسازی در برابر بارگذاری چرخه‌ای تضمین گردد. شبیه‌سازی شامل بررسی اثر درصد تراشه‌های بازیافتی، ترکیب مصالح، مدول الاستیسیته غیرخطی و شرایط بارگذاری تکراری بر مقاومت روسازی و توزیع تنش‌ها بود و نتایج به‌صورت عددی و نموداری تحلیل شد. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها و مدل‌سازی عددی با استفاده از تحلیل آماری شامل محاسبه میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت و بین نمونه‌های مختلف مقایسه انجام گرفت.

این روش جامع امکان بررسی دقیق اثر تراشه‌های بازیافتی، رفتار غیرخطی مصالح و شرایط بستر ژئوتکنیکی را فراهم ساخته و نتایج آن می‌تواند راهکارهای علمی، اقتصادی و پایدار برای طراحی و نگهداری روسازی‌های آسفالتی شهری و بزرگراهی ارائه دهد.

۵- بیان فرضیات و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر برای تحلیل عددی و آزمایشگاهی روسازی‌های آسفالتی مبتنی بر تراشه‌های بازیافتی، مجموعه‌ای از فرضیات و شرایط مرزی به‌منظور ساده‌سازی مدل و شبیه‌سازی واقعی رفتار مصالح در بستر ژئوتکنیکی در نظر گرفته شد.

فرض بر این گرفته شد که مواد پایه و تراشه‌های بازیافتی، همگن و ایزوتروپیک بوده و خواص مکانیکی آن‌ها در محدوده نمونه‌های آزمایشگاهی ثابت است. مدول الاستیسیته مصالح غیرخطی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

تعیین شد و رفتار مصالح تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای به‌صورت رفتار الاستو-پلاستیک غیرخطی با کرنش بحرانی مدل‌سازی گردید.

فرض شد، تماس بین لایه‌های روسازی و بستر ژئوتکنیکی کامل است و هیچ لغزش بین لایه‌ها رخ نمی‌دهد و تأثیر شرایط محیطی مانند تغییرات دما و رطوبت در محدوده استاندارد آزمایشگاهی اعمال شد. در تحلیل عددی، شرایط مرزی شامل نگهداشت نمونه‌ها در سطح جانبی و پایین مدل، اعمال بارگذاری عمودی یکنواخت و چرخه‌ای و محدودیت حرکت جانبی نمونه‌ها به‌منظور شبیه‌سازی رفتار واقعی روسازی در شرایط بستر واقعی بود.

همچنین، فرض شد که بستر ژئوتکنیکی به‌صورت الاستوپلاستیک و همگن با مشخصات مصالح خاک استاندارد عمل می‌کند و اثر نفوذ رطوبت محدود به تغییرات مدول الاستیسیته بستر لحاظ شد. تمامی بارگذاری‌ها و شرایط مرزی به گونه‌ای انتخاب شدند که مدل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی با یکدیگر هم‌خوانی داشته باشند و نتایج قابلیت مقایسه و اعتبارسازی را فراهم سازند.

این فرضیات و شرایط مرزی امکان تحلیل دقیق اثر تراشه‌های بازیافتی، رفتار غیرخطی مصالح و توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در روسازی‌های آسفالتی تحت بارهای چرخه‌ای و شرایط واقعی بستر ژئوتکنیکی را فراهم کرده و پایه‌ای علمی برای ارائه‌ی توصیه‌های طراحی پایدار و اقتصادی فراهم می‌آورد.

۶- ارزیابی توزیع تنش و کرنش در روسازی‌های ترکیبی با تراشه‌های بازیافتی

ارزیابی توزیع تنش و کرنش در روسازی‌های آسفالتی ترکیبی که شامل تراشه‌های بازیافتی هستند، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تحلیل مکانیکی روسازی به شمار می‌رود؛ زیرا پاسخ لایه‌ها تحت بارهای ترافیکی و اثرات محیطی مستقیماً با دوام، مقاومت و طول عمر روسازی مرتبط است. تراشه‌های بازیافتی به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت از مصالح پایه، می‌توانند توزیع بار و تنش در لایه‌ها را تغییر دهند و موجب تمرکز تنش یا تغییر الگوی کرنش در نقاط بحرانی شوند. بنابراین، بررسی دقیق این توزیع‌ها برای طراحی پایدار روسازی، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش مقاومت در برابر خستگی اهمیت ویژه‌ای دارد.

در این پژوهش، نمونه‌های روسازی با درصدهای مختلف تراشه‌های بازیافتی در ترکیب با مصالح پایه و سیمان پرتلند تهیه و تحت آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری، خمشی و برش مستقیم قرار گرفتند تا داده‌های تجربی لازم برای مدل‌سازی جمع‌آوری شوند. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ی شبیه‌سازی عددی، مانند ABAQUS و PLAXIS، مدل‌های روسازی و بستر ژئوتکنیکی ساخته شدند و خصوصیات غیرخطی مصالح، مدول الاستیسیته غیرخطی، رفتار تسلیم و کرنش بحرانی در آن‌ها لحاظ گردید. تحلیل عددی امکان بررسی توزیع تنش‌های عمودی و افقی، کرنش‌های خمشی و برشی و اثر بارگذاری چرخه‌ای بر لایه‌ها را فراهم کرد و توانست نقاط بحرانی و تغییرات رفتار مکانیکی ناشی از تراشه‌های بازیافتی را مشخص سازد.

نتایج نشان دادند که افزایش درصد تراشه‌های بازیافتی تا حد معینی موجب بهبود توزیع تنش و کاهش تمرکز کرنش در لایه‌ها می‌شود، اما درصدهای بالاتر می‌تواند منجر به تمرکز تنش در لایه‌های فوقانی و کاهش مقاومت خمشی گردد. علاوه بر این، رفتار غیرخطی مصالح نقش کلیدی در کاهش کرنش‌های بحرانی و توزیع یکنواخت تنش‌ها ایفا می‌کند و تأثیر بارگذاری‌های چرخه‌ای و تغییرات رطوبت بستر بر پاسخ روسازی را به‌طور واقعی شبیه‌سازی می‌کند.

این ارزیابی جامع نه‌تنها امکان طراحی دقیق روسازی‌های ترکیبی با تراشه‌های بازیافتی را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند به تعیین بهینه درصد تراشه‌های بازیافتی، ضخامت لایه‌ها و مشخصات مصالح پایه کمک کند تا عملکرد

مکانیکی، دوام و مقاومت روسازی افزایش یابد و نیاز به نگهداری کاهش پیدا کند. در نتیجه، تحلیل توزیع تنش و کرنش در روسازی‌های ترکیبی، ابزاری علمی و کاربردی برای ارائه‌ی راهکارهای پایدار، اقتصادی و مهندسی در طراحی و بهسازی روسازی‌های شهری و بزرگراهی فراهم می‌آورد و می‌تواند به‌عنوان مرجع مهمی برای مطالعات آتی و مدل‌سازی پیشرفته روسازی‌های بازیافتی در شرایط واقعی ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳. ارزیابی توزیع تنش و کرنش در روسازی‌های ترکیبی با تراشه‌های بازیافتی

شماره	نوع نمونه روسازی	نوع آزمون/ شبیه‌سازی	رفتار مصالح	مدول الاستیسیته مصالح (MPa)	درصد تراشه‌های بازیافتی (٪)	نتایج کلیدی
۱	روسازی پایه بدون تراشه	آزمون فشاری و خمشی	الاستیک–پلاستیک	۳۵۰۰	۰	توزیع تنش یکنواخت، کرنش بحرانی کم
۲	روسازی با ۱۰٪ تراشه	شبیه‌سازی ABAQUS	الاستیک–پلاستیک غیرخطی	۳۶۰۰	۱۰	کاهش تمرکز تنش، توزیع کرنش یکنواخت‌تر
۳	روسازی با ۲۰٪ تراشه	شبیه‌سازی PLAXIS و آزمون برش مستقیم	الاستیک–پلاستیک غیرخطی	۳۷۰۰	۲۰	افزایش مقاومت لایه‌ها، کاهش نفوذپذیری
۴	روسازی با ۳۰٪ تراشه	آزمون خمشی و بارگذاری چرخه‌ای	الاستیک–پلاستیک غیرخطی	۳۵۵۰	۳۰	تمرکز جزئی تنش در لایه بالایی، افزایش کرنش خمشی
۵	روسازی با ۴۰٪ تراشه	شبیه‌سازی ABAQUS و PLAXIS	الاستیک–پلاستیک غیرخطی	۳۴۵۰	۴۰	کاهش مقاومت خمشی، تمرکز تنش قابل توجه، کرنش بحرانی افزایش یافته
۶	روسازی با ۵۰٪ تراشه	آزمون چرخه‌ای و برش مستقیم	الاستیک–پلاستیک غیرخطی	۳۳۵۰	۵۰	توزیع نامناسب تنش، افزایش احتمال آسیب و کاهش دوام روسازی

۷- تفسیر علمی و کاربردی نتایج

نتایج حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که استفاده از تراشه‌های بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش و کرنش، مقاومت مکانیکی و دوام سازه‌ای دارد. نمونه‌های روسازی با درصد پایین تراشه‌های بازیافتی (۱۰–۲۰٪) نشان دادند که مدول الاستیسیته لایه‌ها افزایش یافته و توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌شود که این موضوع موجب کاهش تمرکز تنش‌های بحرانی و افزایش مقاومت خمشی و فشاری روسازی در طول عمر طراحی شده می‌گردد.

با افزایش درصد تراشه‌ها تا ۳۰–۴۰٪، تمرکز جزئی تنش در لایه‌های فوقانی مشاهده شد و کرنش خمشی در برخی نقاط بحرانی افزایش یافت، اما با مدل‌سازی غیرخطی مصالح، توانایی لایه‌ها در جذب انرژی بارگذاری تکراری و کاهش آسیب مکانیکی افزایش یافت. این رفتار نشان می‌دهد که تراشه‌های بازیافتی نه‌تنها بهبود مقاومت روسازی را فراهم می‌کنند، بلکه اثرات مخرب افزایش درصد تراشه‌ها با تحلیل دقیق غیرخطی مصالح قابل مدیریت است. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که شرایط بستر ژئوتکنیکی و مدول الاستیسیته خاک زیرین نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع تنش‌ها دارد و طراحی روسازی بدون در نظر گرفتن این اثرات می‌تواند موجب تمرکز تنش و کاهش دوام شود.

از نظر کاربردی، این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده‌ی بهینه از تراشه‌های بازیافتی در محدوده‌ی درصد مشخص، می‌تواند راهکاری پایدار، اقتصادی و مهندسی برای بهبود عملکرد روسازی ارائه دهد، کاهش هزینه نگهداری و

افزایش طول عمر روسازی‌های شهری و بزرگراهی را ممکن سازد. همچنین، ترکیب آزمایش‌های مکانیکی و شبیه‌سازی عددی، امکان پیش‌بینی دقیق پاسخ روسازی تحت بارگذاری‌های واقعی و شرایط محیطی متغیر را فراهم می‌آورد و این قابلیت به مهندسان عمران و طراحان روسازی اجازه می‌دهد تا پارامترهای بهینه طراحی، ضخامت لایه‌ها و درصد تراشه‌های بازیافتی را بر اساس داده‌های علمی و قابل اعتماد تعیین کنند.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که ارزیابی توزیع تنش و کرنش نه‌تنها برای تحلیل مقاومت و دوام روسازی ضروری است، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزار علمی برای تصمیم‌گیری در طراحی روسازی‌های پایدار و اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد و راهنمای مناسبی برای مطالعات آتی و بهبود فرایندهای مهندسی روسازی‌های ترکیبی با تراشه‌های بازیافتی باشد.

۸- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که استفاده از تراشه‌های بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار، اقتصادی و مهندسی برای بهبود عملکرد مکانیکی و دوام روسازی مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مشخص کرد که درصد بهینه تراشه‌های بازیافتی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است؛ زیرا در این محدوده توزیع تنش و کرنش یکنواخت‌تر، مقاومت خمشی و فشاری افزایش یافته و تمرکز تنش کاهش می‌یابد. افزایش بیش از حد تراشه‌ها (۳۰–۵۰٪) ممکن است موجب تمرکز تنش در لایه‌های فوقانی و افزایش کرنش بحرانی گردد، اما با مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح می‌توان اثرات منفی را کاهش داد و پایداری روسازی را تا حد قابل قبول حفظ کرد.

همچنین، بررسی اثر بستر ژئوتکنیکی نشان داد که خواص خاک زیرین و مدول الاستیسیته بستر نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد روسازی دارد و طراحی روسازی بدون در نظر گرفتن شرایط واقعی بستر می‌تواند موجب کاهش دوام و افزایش آسیب شود. ترکیب آزمایش‌های مکانیکی، تحلیل رفتار غیرخطی مصالح و شبیه‌سازی عددی، امکان پیش‌بینی دقیق پاسخ روسازی تحت بارگذاری چرخه‌ای و شرایط محیطی متغیر را فراهم می‌آورد و این یافته‌ها می‌تواند به مهندسان عمران و طراحان روسازی کمک کند تا پارامترهای بهینه طراحی، درصد تراشه‌های بازیافتی و ضخامت لایه‌ها را بر اساس داده‌های علمی تعیین کنند.

در نهایت، این مطالعه تأکید می‌کند که روسازی‌های ترکیبی با تراشه‌های بازیافتی نه‌تنها مزایای محیط‌زیستی و اقتصادی دارند، بلکه با تحلیل دقیق توزیع تنش و کرنش، طراحی بهینه و استفاده از مدل‌های غیرخطی، می‌توان عملکرد بلندمدت و دوام روسازی‌های شهری و بزرگراهی را به طور چشمگیری ارتقا داد.

منابع

امینی، ر.، و کریمی، س. (۱۳۹۹). بررسی رفتار خستگی روسازی آسفالت حاوی خرده‌آسفالت بازیافتی. *فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل*، ۱۲(۳)، ۴۵-۶۲.

پورحسینی، ر.، محمدی، ع.، و حسینی، م. (۱۴۰۱). مدل‌سازی عددی رفتار غیرخطی بستر ژئوتکنیکی در روسازی‌های آسفالت. *نشریه علمی ژئوتکنیک و مهندسی راه*، ۸(۲)، ۳۳-۴۸.

حسینی، س. م. (۱۳۹۸). *اصول طراحی روسازی پایدار برای شهرهای هوشمند*. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

رضایی، ن.، و طاهری، م. (۱۴۰۰). تأثیر مصالح بازیافتی بر رفتار مکانیکی آسفالت در شرایط ترافیکی سنگین. *پژوهش‌های حمل‌ونقل*، ۱۷(۴)، ۱۱۲-۱۲۸.

زمانی، س.، و شکیب‌منش، ه. (۱۳۹۸). جایگاه اصل انتظارات مشروع در سازمان جهانی تجارت. *پژوهش حقوق عمومی*، ۲۱(۶۴)، ۳۲-۹.

عباسی، ف. (۱۳۹۷). *رفتار غیرخطی مصالح ژئوتکنیکی در روسازی آسفالت*. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف.

علی‌پور، ا.، و تقی‌پور، آ. (۱۳۹۹). مروری بر کاربرد مصالح بازیافتی در روسازی‌های آسفالت شهری. *مجله علمی حمل‌ونقل و زیرساخت*، ۵(۱)، ۲۳-۴۱.

Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). *Reclaimed asphalt pavement – A literature review.* Illinois Center for Transportation Report.

ASTM D4123/D4123M-20. (2020). *Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of bituminous mixtures.* ASTM International.

Chen, L., Zhang, Y., & Li, X. (2018). Mechanical behavior of smart polymer-enhanced soils under cyclic wetting and drying. *Geotextiles and Geomembranes, 46*(6), 674–683.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

Kim, Y. R., & Lee, S. J. (2015). Fatigue and mechanical behavior of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles. *Construction and Building Materials, 93*, 876–884.

Lee, H., & Park, J. (2017). Mechanical performance of asphalt mixtures with recycled aggregates and modifiers. *Journal of Materials in Civil Engineering, 29*(12), 04017222.

Rahmani, E., & Hosseini, S. M. (2021). Nonlinear finite element modeling of asphalt pavements with recycled materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering, 8*(2), 112–125.

Tabrizi, M. S., Alipour Banaei, A., & Topchi Pour Ardali, A. (2022). Numerical modeling of crack healing in reinforced concrete using ANSYS and AFGROW software. *International Journal of Structural Engineering, 13*(4), 245–263.

Zhang, J., & Li, H. (2013). Numerical simulation of asphalt pavement using finite element method considering nonlinear material behavior. *International Journal of Pavement Engineering, 14*(5), 420–431.

استناد به این مقاله: جوانمردی، جواد، صادق‌زاده تبریزی، مهدی. (۱۴۰۵). رفتار غیرخطی مصالح بازیافتی در روسازی آسفالت با کاربرد در شهرهای هوشمند: تحلیل اندرکنش تراشه‌های ضایعاتی و بستر ژئوتکنیکی. *فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند*، ۴(۳)، ۲۲-۳۱.

New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.