

ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم براساس مدل‌های آزمایشگاهی - تجربی در برابر پدیده‌ی شیارشدگی

علی منصور خاکی (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه علم و صنعت

محمدرضا احدی (استادیار)

پژوهشکده‌ی حمل‌ونقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

سید محسن متولویزاده* (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

ابوذر شفیع پور (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه پیام نور

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوره ۲ - ۳۳، شماره ۱/۴، ص. ۹۷-۱۰۳ (یادداشت نثی)

شیارشدگی از جمله خرابی‌های شایع در روسازی‌های انعطاف‌پذیر است. مطالعه‌ی حاضر به ارزیابی خرابی شیارشدگی در سرعت‌های مختلف پرداخته است. لذا، ۴۸ نمونه‌ی مخلوط آسفالتی گرم تهیه و تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها در دماهای ۴۰ و ۵۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، تحت تنش‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، در ۳ زمان مختلف بارگذاری و نیز در ۲ زمان استراحت، آزمایش شده‌اند. نهایتاً یک مدل عددی با ضریب همبستگی ۰/۹۰۷۷ به‌عنوان خروجی اصلی پژوهش ارائه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داده‌اند که تأثیرگذارترین عوامل در رشد خرابی در روسازی انعطاف‌پذیر به ترتیب: دما، تغییرات زمان بارگذاری و تنش هستند. در ادامه، در مدل به‌دست آمده رشدی حدود ۷۶٪ در عمق شیار روسازی در نامناسب‌ترین شرایط محیطی، با افزایش زمان بارگذاری از ۱۰ میلی‌ثانیه به ۱۰۰ میلی‌ثانیه مشاهده شده است. در نهایت، به‌منظور کاهش خرابی‌های روسازی آسفالتی در مناطق گرمسیری، کمینه‌ی سرعت حرکت خودرو ۲۰ کیلومتر بر ساعت تعیین شده است.

mkhaki@iust.ac.ir
m.ahadi@bhrc.ac.ir
mohsen.motevalizadeh@modares.ac.ir
abouzarshafiepour@yahoo.com

واژگان کلیدی: تغییر شکل ماندگار، روسازی آسفالتی گرم، ویسکوکشسان، مدل‌های MEPDG.

۱. مقدمه

قیر کاهش می‌یابد، نرم‌تر می‌شود و آمادگی بیشتری برای پذیرش تغییر شکل ماندگار پیدا می‌کند.^[۱]

روش‌های تجربی - آزمایشگاهی برای پیش‌بینی تنش و کرنش‌های روسازی ارائه شده است. مدل‌های پیش‌بینی شیارشدگی تجربی معمولاً شامل پارامترهایی از قبیل: مشخصات مصالح روسازی و علاوه بر آن شرایط محیطی و ترافیکی است که براساس اطلاعات به‌دست آمده از راه‌های موجود در واقعیت کالیبره می‌شود. در بیشتر مواقع، اطلاعات کسب شده از واقعیت، بسیار محدود است.^[۲]

پیش‌بینی شیارشدگی، موضوعی پیچیده است، به این ترتیب که برای تحلیل آن نیازمند داشتن علم مواد، تغییر شکل کشسان و خمیری و چسبندگی ماده‌ی چسبیده‌ی قیری است. روسازی تحت تأثیر بارهای سنگین با سرعت عبور آرام به‌صورت شیار افتاده در می‌آید.^[۳] تعداد عبور خودرو از روسازی آسفالتی، بیشترین تأثیر را در خرابی خزشی و شیارشدگی روسازی می‌گذارد.^[۴]

تغییر شکل ماندگار، عاملی مهم در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر است. با افزایش بار ترافیکی و فشار چرخ، بیشتر تغییر شکل‌های دائمی در لایه‌های بالایی روسازی اتفاق می‌افتد و به‌منظور تخمین عمق شیار، ضروری است که پارامترهای تغییر شکل دائمی برای مصالح هر لایه تعیین شود. روش‌های متعددی برای تعیین تغییر شکل دائمی مصالح روسازی و البته بیشتر از روش بارگذاری تکرارشونده استفاده شده است. تغییر شکل‌های ماندگار روسازی آسفالتی گرم، وابستگی بسیار زیادی به شرایط محیطی، عدم اطمینان از ترافیک و نحوه‌ی ساخت مخلوط دارد.^[۱]

به واسطه‌ی خصوصیت ویسکوکشسان مخلوط‌های آسفالتی، مشخصات مکانیکی آن تحت تأثیر دمای محیط قرار دارد. در واقع با افزایش دما، ویسکوزیته‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۳، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۱۸.

۲. اهمیت و ضرورت انجام پژوهش

۱.۲. ضرورت پژوهش

افزایش وسعت و شدت تغییر شکل‌های دائم در سال‌های اخیر، نگرانی‌هایی را در ارتباط با اثر این نوع خرابی در عملکرد روسازی‌های آسفالتی به وجود آورده است. این نوع خرابی قابلیت بهره‌برداری را کاهش داده و خطر تأثیرات رطوبت و یخ‌زدگی را به علت تجمع آب (آب‌پیمایی^۱) در شیار جای چرخ افزایش می‌دهد.^[۶] همچنین پدیده‌ی مذکور باعث ایجاد قیرزدگی نیز می‌شود که طی آن قیر به سطح روسازی می‌آید و با کاهش اصطکاک، بستر مناسبی برای بروز حوادث رانندگی را مهیا می‌سازد. تأثیر دیگر شیارزدگی، کاهش ضخامت لایه‌ی آسفالتی روسازی است که باعث افزایش احتمال شکست روسازی در اثر ترک‌های خستگی می‌شود.^[۷]

اگرچه امروزه دستگاه‌های متعددی برای سنجش شیارزدگی روسازی آسفالتی به کار گرفته می‌شوند، اما هیچ‌کدام قابلیت‌های کارگاهی مناسبی برای استفاده ندارند. همچنین، روش‌های موجود ارزیابی پتانسیل شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی، اغلب پرهزینه بوده و انجام آن‌ها مستلزم صرف زمان زیادی است.^[۶] مجموع موارد ذکرشده، لزوم ارائه‌ی روشی ساده را که ضمن داشتن دقت لازم بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه‌ی اندک، وضعیت نمونه‌ها را از نظر شیارزدگی در آزمایشگاه مشخص کند، آشکار می‌سازد.

۲.۲. اهداف

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی قابلیت شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش بارگذاری تکرارشونده و نیز کالیبره کردن مدلی به منظور پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی و آنالیز نتایج به دست آمده براساس آن است.

۳. پیشینه‌ی پژوهش

فقدان آزمایشی ساده برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، مراکز معتبر پژوهشی جهان از جمله NCHRP^۲، اداره‌ی فدرال بزرگراه‌ها (FHWA)^۳ و سازمان بزرگراه‌های ایالتی^۴ را به حمایت از پروژه‌هایی با اهداف توسعه‌ی روش آزمایش‌ها و به ویژه توسعه‌ی یک آزمایش اجرایی ساده برای ارزیابی پتانسیل شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی، برانگیخته است.^[۹،۸] در ادامه، مدل‌های پیشنهادی براساس تئوری ویسکوکشسان ارائه شده است.

۱.۳. مدل‌های پیش‌بینی تغییر شکل ماندگار

تفاوت اصلی بین روش کشسان و ویسکوکشسان در تئوری کشسان مواد است. در تئوری کشسان نسبت تنش به کرنش مستقل از زمان، ثابت نگه داشته می‌شود؛ ولی در تئوری ویسکوکشسان، مواد و مصالح براساس نرخ تغییرات نسبت تنش به کرنش به صورت وابسته به زمان درجه‌بندی می‌شوند. در کرنش‌های کوچک‌تر، مخلوط‌های آسفالتی از خود رفتار خطی ویسکوکشسان نشان می‌دهند که رفتار مذکور ویسکوکشسان پیش‌بینی بهتری نسبت به تئوری کشسان از خود نشان می‌دهد.^[۱۰]

یکی از برترین مدل‌های ارائه‌شده، مدل ویسکوس^۵ است. ویسکوس یک برنامه‌ی رایانه‌ی بی‌تئوری احتمال است که به منظور پیش‌بینی عملکرد خزشی، زبری سطح

و ترک‌خوردگی روسازی استفاده می‌شود. در مدل ویسکوس، لایه‌های روسازی توسط تئوری کشسان و ویسکوکشسان شرح داده می‌شوند و مصالح ایزوتروپیک (همگن) فرض می‌شوند (رابطه‌ی ۱):

$$\epsilon_p = e \cdot \mu \cdot N^{-\alpha} \quad (۱)$$

که در آن، ϵ_p تغییر شکل ماندگار در N آمین سیکل بارگذاری؛ e کرنش بیشینه‌ی برای بار نیم‌سینوسی با طول زمان بارگذاری 0.1 ثانیه و اندازه‌گیری شده در سیکل 200 ؛ μ و α پارامترهای مدل؛ و N شماره‌ی سیکل بارگذاری مدل هستند. از دیگر مدل‌های رایج شیارزدگی براساس تئوری ویسکوکشسان، می‌توان به مدل‌های نیمه لگاریتمی، مانسمیت^۶، ویسکوس، سوپریو^۷ و آشتو^۸ اشاره کرد که در ادامه ارائه شده‌اند:^[۱۱،۱۲]

$$\epsilon_p = a + b \times \log(N) \quad \text{مدل نیمه لگاریتمی} \quad (۲)$$

$$\epsilon_p = aN^b \quad \text{مدل مانسمیت} \quad (۳)$$

$$\epsilon_{pm} = \mu \epsilon_r N^\alpha \quad \text{مدل ویسکوس} \quad (۴)$$

$$\epsilon_p = \epsilon_p(1) N^s \quad \text{مدل سوپریو} \quad (۵)$$

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = aT^b N^c \quad \text{مدل آشتو ۲۰۰۲} \quad (۶)$$

در ادامه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی مذکور می‌توان به مدل ارائه‌شده‌ی شارپ^۹ اشاره کرد (رابطه‌ی ۷):^[۱۳]

$$\epsilon(t) = (d_0 + d_1 * t^m) * \sigma \quad (۷)$$

که در آن، ϵ کرنش خمیری روسازی؛ σ تنش اعمال به نمونه؛ t زمان؛ و d_0 ، d_1 و m ضرایب بیان‌کننده‌ی مشخصات مصالح هستند. ورمیر^{۱۰} نیز مدلی برای پیش‌بینی تغییر شکل ماندگار ارائه کرده است که به صورت رابطه‌ی ۸ است:

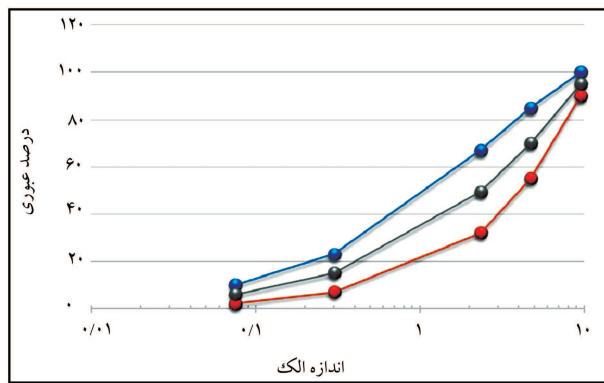
$$\text{Log} \epsilon^P(N) = \text{Log} \epsilon^P(N=1) + S * \text{Log} N \quad (۸)$$

که در آن، $\epsilon^P(N)$ کرنش جمعی در سیکل N ام؛ $\epsilon^P(N=1)$ کرنش در سیکل اول؛ N شماره‌ی سیکل بارگذاری؛ S شیب نمودار $\text{Log} N - \text{Log} \epsilon^P(N)$ هستند.

۲.۳. ارزیابی مدل‌های پیشین

علاوه بر نبود روشی ثابت شده برای انجام آزمایش عملکردی ساده به منظور ارزیابی مقاومت شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی، روش ثابت شده‌ی برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مذکور نیز موجود نیست. به این منظور پژوهشگران مختلف، مدل‌های مختلفی را برای پیش‌بینی شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کرده‌اند. لذا براساس ارزیابی مدل‌های ارائه‌شده‌ی پژوهشگران پیشین، مدل مورد استفاده در پژوهش حاضر انتخاب شده است.

ژو و همکاران^[۱۳] در پژوهش خود بیان کرده‌اند که مدل نیمه‌لگاریتمی فقط قادر به تحلیل رفتار شیارزدگی مخلوط‌های آسفالتی در ناحیه‌ی اول است. کی و ویتزک^[۱۴] در پژوهش خود مدل توانی ارائه‌شده‌ی مانسمیت را قادر به ارزیابی رفتار مخلوط آسفالتی در نواحی اول و دوم دانسته‌اند. براین اساس مدل‌های دیگری ارائه شده است، که بر مبنای مدل مذکور است. نهایتاً می‌توان این‌گونه بیان کرد که مدل توانی به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار مخلوط آسفالتی در نواحی اول و دوم است.



شکل ۱. منحنی حد بالا، حد پایین و حد وسط دانه بندی شماره ۵.

۴. روش پژوهش

علاوه بر فرضیات عمومی که در جای خود به آن‌ها پرداخته شده است، فرض اصلی پژوهش حاضر، ویسکو خمیری بودن رفتار مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین پارامتر متغیر پژوهش حاضر، شرایط بارگذاری است که با تغییر در دمای بارگذاری، سطح تنش و سرعت بارگذاری شرایط مختلف بارگذاری شبیه‌سازی شده است. همچنین در پژوهش حاضر سعی بر آن بوده است که انتخاب مصالح، دانه بندی، قیر و فیلر به گونه‌ی باشد که نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه، حتی‌الامکان مشابه طیف وسیع آسفالت گرم کارخانه‌ی در ایران باشد.

۱.۴. دانه بندی و مشخصات مصالح سنگی

مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی شامل: سنگ‌دانه‌های آهکی درشت‌دانه (شن) و ریزدانه (ماسه)، فیلر (مصالح عبوری از الک شماره ۲۰) و قیر با درجه‌ی نفوذ ۶۰/۷۰ هستند. مصالح سنگی مورد استفاده از جنس آهکی بوده و از پودر سنگ الک شده با الک شماره ۲۰ به عنوان فیلر در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌ها از حد وسط دانه بندی شماره ۵ موجود در نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران (۱۳۹۰)) استفاده شده است. مشخصات دانه بندی استفاده شده در تولید نمونه‌های آسفالتی، در شکل ۱

ارائه شده است. قیر مورد استفاده نیز از نوع ۶۰-۷۰ محصول شرکت نفت پاسارگاد بوده است. به منظور اطمینان از کیفیت مصالح سنگی، فیلر و قیر، آزمایش‌های کنترل کیفیت انجام شده است که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲.۴. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

طرح اختلاط و ساخت نمونه‌های آسفالتی مارشال در پژوهش حاضر براساس روش مارشال و طبق استاندارد ASTM-D ۱۵۵۹ انجام شده و نمونه‌ها تحت ۷۵ ضربه

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی.

مقدار مجاز آیین‌نامه برای لایه‌ی رویه	نتایج آزمایش‌ها	استاندارد روش آزمایش	آزمایش‌های مصالح سنگی
بیشینه‌ی ۳٪	۱۹٪	ASTM-C ۱۳۱	AASHTO-T ۹۶ درصد سایش به روش لوس‌آنجلس *
-	۸٪	ASTM-D ۴۷۹۱	BS-۸۱۲ درصد تطویل **
بیشینه‌ی ۲۵٪	۲۳٪	ASTM-D ۴۷۹۱	BS-۸۱۲ درصد تورق ***
کمینه‌ی ۹۰٪	۹۲٪	ASTM-D ۵۸۲۱	BS-۸۱۲ درصد شکستگی در دو جهه ****
بیشینه‌ی ۸٪	۱۵٪	ASTM-C ۸۸	AASHTO-T ۱۰۴ درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم *****

* Los Angeles abrasion test

** elongation

*** flakiness

**** percentage of fractured particles

***** soundness of aggregates by use of sodium sulfate

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی.

مقدار مجاز آیین‌نامه	نتایج آزمایش‌ها		استاندارد روش آزمایش		آزمایش‌های قیر
	بیشینه	کمینه	ASTM	AASHTO	
-	-	۱۷۰۰۸	D ۷۰	T ۲۲۸	وزن مخصوص قیر * (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۷۰	۶۰	۶۵	D ۵	T ۴۹	درجه‌ی نفوذ قیر ** (۱/۰ میلی‌متر)
۵۶	۴۹	۴۹	D ۳۶	T ۵۳	نقطه‌ی نرمی قیر *** (میلی‌متر)
-	۱۰۰	۱۰۵	D ۱۱۳	T ۵۱	میزان کشش‌پذیری قیر ****
-	۲۳۲	۳۱۵	D ۹۲	T ۴۸	درجه‌ی اشتغال قیر *****
-	-	۳۴۰	D ۸۸	T ۷۲	کندروانی قیر *****
-	۹۹	۹۹٫۸	D ۲۰۴۲	T ۴۴	حلالیت قیر *****
۰٫۸	-	۰٫۲۵	D ۱۷۵۴	T ۱۷۹	افت وزنی قیر در اثر حرارت *****

* density of bitumen

** penetration of bitumen

*** softening point of bitumen

**** ductility of bitumen

***** flash point of bitumen

***** viscosity of bitumen

***** solubility of bitumen

***** loosen heating of bitumen (thin film over test)

به هر طرف نمونه قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌های ساخته شده جهت تعیین درصد قیر بهینه، تحت آزمایش‌های مارشال قرار گرفته‌اند.

۳.۴. تعیین درصد قیر بهینه

به منظور تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های مارشال با درصد قیرهای ۴، ۴٫۵، ۵ و ۵٫۵ تهیه و آزمایش شده‌اند. نهایتاً درصد قیر بهینه، ۵ تعیین شده است. پس از تعیین درصد قیر بهینه، به منظور انجام آزمایش‌های نهایی نمونه‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به وزن ۱۲۰۰ گرم توسط دستگاه تراکم کننده چرخشی تهیه شده است.

۵. انجام آزمایش‌ها و نتایج مرتبط

۱.۵. آزمایش بارگذاری تکرارپذیر

مهم‌ترین هدف آزمایش خزش دینامیکی، مطالعه‌ی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارافتادگی است و مهم‌ترین پارامتر به دست آمده از آن، کرنش تجمعی است که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. نکته‌ی مهم در مورد آزمایش مذکور این است که از مقادیر تغییر مکان تجمعی حاصل نمی‌توان به‌عنوان عمق شیاراستناد کرد و در واقع جهت مقایسه بین انواع مختلف نمونه‌ی آسفالتی کاربرد دارد. دلیل آن این است که مخلوط آسفالتی در آزمایش خزش دینامیکی، از شرایط مهار جانبی که در حالت واقعیت از آن برخوردار است، استفاده نمی‌کند و لذا تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد.^[۱۳]

۲.۵. شرایط انجام آزمون‌ها بر روی نمونه‌ها

هدف پژوهش حاضر، مقایسه‌ی حساسیت نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با دانه‌بندی شماره‌ی ۵ با قیر ۶۰/۷۰ اصلاح نشده تحت شرایط دمایی و زمان بارگذاری متفاوت است. در جدول ۳، شرایط بارگذاری اعمالی به نمونه‌ها و در جدول ۴، ترکیبات بارگذاری برای حالت‌های مختلف ارائه شده است. تأمین شرایط یکسان دمایی پیش از شروع آزمایش بسیار مهم است، به این منظور نمونه‌ها ۱۲ ساعت قبل از انجام آزمایش در محفظه‌ی^{۱۱} قرار داده می‌شوند و این دما تا پایان آزمون ثابت می‌ماند.

۶. ارائه و تحلیل نتایج

۱.۶. انتخاب روش تحلیل نتایج

براساس توضیحات ارائه شده در قسمت‌های پیش و مدل‌های مذکور، پارامترهای متغیر در مدل آشتو ۲۰۰۲ (رابطه‌ی ۶)، ارزشی برابر با سیکل بارگذاری دارند و میزان تأثیرگذاری آن‌ها از طریق ضرایب توانی در رابطه‌ی (b, c) نمایان می‌شود. به این منظور برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایش تغییر شکل ماندگار، با الگوبرداری از مدل پیشنهادی آشتو، ارزش کلیه‌ی متغیرها یکسان در نظر گرفته شده و با استفاده از ضریب توانی، اثر هر یک در مدل نشان داده شده است.

با توجه به اینکه هدف نوشتار حاضر، تولید مدل پیش‌بینی تغییر شکل ماندگار در سیکل ثابت است، لذا فرمت رابطه‌ی مذکور نیازمند کمی تغییرات است. فرمت نهایی موردنظر به‌صورت رابطه‌ی ۹ است:

$$\varepsilon = a + b \times (T^{\alpha_1} \times L^{\alpha_2} \times S^{\alpha_3} \times R^{\alpha_4}) \quad (9)$$

جدول ۳. شرایط اعمال بارگذاری.

متغیر	مقدار	واحد
شکل بارگذاری	نیم سینوسی	-
سطح تنش	۱۰۰ ۲۰۰	مگاپاسکال
زمان استراحت	۹ برابر زمان بارگذاری ۱ برابر زمان بارگذاری	-
دما	۴۰ ۵۵	درجه سانتی‌گراد
بارگذاری	۱۰۰ ۵۰۰ ۱۰۰۰	میلی‌ثانیه

که در آن: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ، a و b ثابت‌های رگرسیون؛ T : دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)؛ L زمان بارگذاری (میلی‌ثانیه)؛ S سطح تنش (کیلوپاسکال)؛ R : زمان استراحت (میلی‌ثانیه)؛ ε : کرنش خمیری در مخلوط‌های آسفالتی است. با توجه به اینکه مدل مورد نظر در سیکل مشخص ۱۵۰۰ که نماینده‌ی ناحیه‌ی دوم نمودار عملکردی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالت است، تولید شده است؛ لذا، سیکل بارگذاری در فرمت معادله‌ی مذکور حذف شده است.

۲.۶. ارائه‌ی مدل آزمایشگاهی

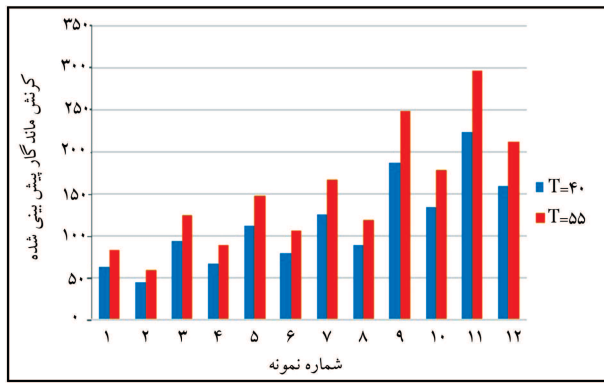
برای تولید مدل نهایی از نرم‌افزار مطلب^{۱۲} استفاده و براساس روش مجموع کمینه‌ی مربعات، بهترین رابطه بین ۴ متغیر و کرنش که نتیجه‌ی نهایی بوده است، تولید شده است. رابطه‌ی مذکور در یک فضای ۵ بعدی برازش داده شده و به‌صورت معادله‌ی ۱۰ ارائه شده است. منظور از فضای ۵ بعدی، فضایی متشکل از ۴ متغیر مستقل: دما، سطح تنش، زمان بارگذاری و زمان استراحت به همراه کرنش خمیری (متغیر وابسته‌ی مدل مذکور) است:

$$\varepsilon = -0.0635 + 0.0018 \times (T^{1.275} \times S^{1.001} \times L^{0.248} \times R^{0.1522}) \quad (10)$$

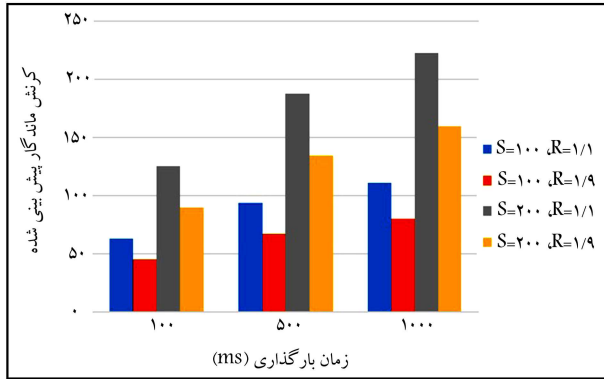
مدل فوق با $R^2 = 0.9077$ تولید شده و پیش‌بینی قابل قبولی از رفتار مخلوط آسفالتی در ناحیه‌ی دوم ارائه داده است.

۷. تحلیل و تفسیر نتایج

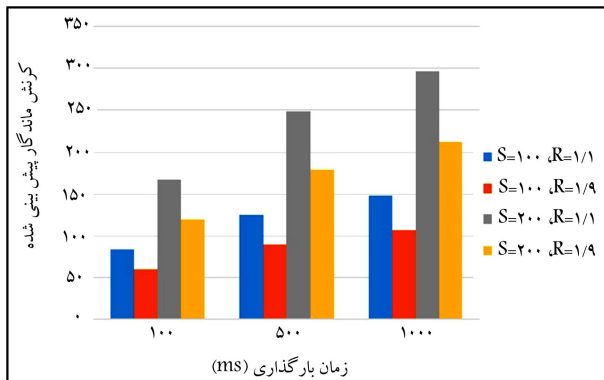
نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده در ۲۴ حالت مختلف آزمایش و نتایج حاصل به‌صورت رابطه‌ی ۱۰ به‌عنوان مدل تغییر شکل ماندگار ارائه شده است. براساس مدل به‌دست آمده، رفتار آسفالت قابل پیش‌بینی و ارزیابی است. در شکل ۲، مقادیر پیش‌بینی شده براساس مدل نهایی نمایش داده شده‌اند. نتایج مذکور براساس دماهای مختلف ارزیابی و مشاهده شده است که دمای بیشتر در تمامی شرایط و حالات بارگذاری، کرنش بیشتری ایجاد کرده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین



شکل ۲. نتایج حاصل از مدل در ۲۴ حالت مختلف بارگذاری.



شکل ۳. نتایج حاصل مدل در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۴. نتایج حاصل از مدل در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد.

سنگین تر باشد، خرابی بیشتری مشاهده می شود. از طرفی با دقت به محور افقی شکل های ۳ و ۴ که نماینده زمان بارگذاری هستند، این گونه نتیجه گیری می شود که با کاهش سرعت عبور خودرو، میزان آسیب پذیری روسازی افزایش چشم گیری نشان می دهد. به عبارتی می توان گفت که محل هایی مانند: خطوط توقف چراغ قرمزها، بنادر، محل های اخذ عوارض و نمونه های مشابه که در آن ها خودروهای با بار سنگین توقف طولانی مدت دارند، بیشترین استعداد در خرابی خزشی را از خود نشان می دهند.

در ادامه، نتایج حاصل از مدل برازش داده شده در تمام حالاتی که تحت بارگذاری سیکلی به منظور تولید مدل تغییر شکل ماندگار در پژوهش حاضر استفاده شده است، در شکل ۵ ارائه شده است. که با توجه به آن، خطرناک ترین و کم خطرترین حالت بارگذاری مخلوط آسفالتی قابل مشاهده است. در شرایطی که مخلوط تحت

جدول ۴. شرایط اعمال بارگذاری.

شماره ترکیب	دما	سطح تنش	زمان بارگذاری	زمان استراحت
۱	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۱۰۰	۱
۲	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۱۰۰	۹
۳	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۵۰۰	۱
۴	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۵۰۰	۹
۵	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۱
۶	۴۰ ۵۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۹
۷	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۱۰۰	۱
۸	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۱۰۰	۹
۹	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۵۰۰	۱
۱۰	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۵۰۰	۹
۱۱	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۱۰۰۰	۱
۱۲	۴۰ ۵۵	۲۰۰	۱۰۰۰	۹

و مطالعات پژوهشگران گذشته و نکات ارائه شده در بخش های قبل، مدل مذکور حساسیت مخلوط های آسفالتی نسبت به دما را به درستی نشان داده است. بر همین اساس و با توجه به مدل به دست آمده در پژوهش حاضر، به بررسی حساسیت مخلوط های آسفالتی در دماهای مشخص، تحت شرایط متفاوت دیگر پرداخته شده است. در شکل های ۳ و ۴، کرنش خمیری پیش بینی شده توسط مدل در دماهای ۴۰ و ۵۵ درجه سانتی گراد ارائه شده است. با دقت در شکل های مذکور مشاهده می شود که در هر دما با افزایش سطح تنش و کاهش زمان استراحت، کرنش خمیری در مخلوط های آسفالتی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، هر چه سرعت بارگذاری افزایش یابد (ترافیک عبوری متراکم تر باشد) و میزان بار اعمالی به نمونه

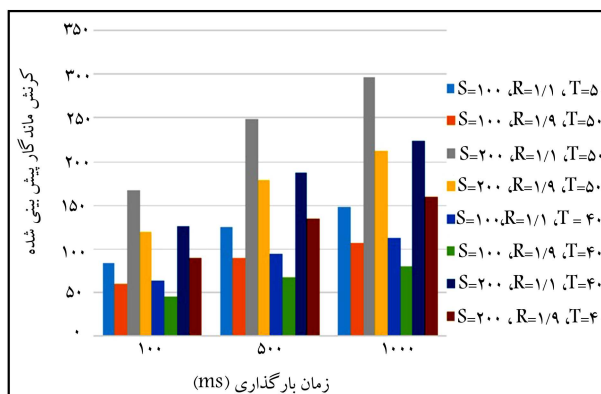
جدول ۵. رابطه‌ی زمان بارگذاری با سرعت عبور خودرو. [۱۲]

سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
زمان بارگذاری (ثانیه)	۰٫۲۴۸	۰٫۱۲۴	۰٫۰۸۲	۰٫۰۶۲	۰٫۰۴۹	۰٫۰۴۱

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده و مدل تولید شده که در متن نوشتار ارائه شده است، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که:

- پژوهش حاضر با هدف تولید مدلی جهت پیش‌بینی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در ناحیه‌ی دوم عملکردی صورت گرفته است که نتیجه‌ی آن به صورت یک مدل ریاضی با $R^2 = 0.977$ ارائه شده است.
- افزایش زمان بارگذاری و افزایش تنش بعد از افزایش دما، تأثیرگذارترین عوامل در رشد خرابی خزشی روسازی‌های آسفالتی هستند.
- مطابق شکل ۵، علی‌رغم تأثیر مثبت افزایش زمان استراحت در کاهش خرابی روسازی آسفالتی، پارامتر مذکور توانایی مقابله با اثر مخرب تنش وارده به نمونه و همچنین کاهش سرعت عبور خودرو را ندارد.
- با کاهش سرعت عبور خودرو، میزان آسیب‌پذیری روسازی افزایش چشم‌گیری نشان می‌دهد. به عبارتی می‌توان محل‌هایی مانند: خطوط توقف چراغ قرمزها، بنادر، محل‌های اخذ عوارض و نمونه‌های مشابه که در آن‌ها توقف خودروهای بار سنگین مشاهده می‌شود، بیشترین استعداد در خرابی خزشی را از خود نشان می‌دهند.
- در مدل به دست آمده رشدی حدود ۷۶٪ در عمق شیار روسازی در سخت‌ترین شرایط محیطی برای روسازی، با افزایش زمان بارگذاری از ۱۰۰ میلی‌ثانیه به ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه مشاهده شده است؛ که بدین معناست که در محیط‌های گرمسیری که بارهای سنگین حمل می‌شود، تعیین کمیته‌ی سرعتی برای عبور وسایط نقلیه می‌تواند تأثیر مثبتی در کاهش خرابی روسازی از خود نشان دهد.
- در مناطق با دمای بسیار بالا ترجیحاً از ایجاد توقف در معابر و جاده‌ها خودداری شود و در مناطقی که این موضوع اجتناب‌ناپذیر است، روسازی‌های بتنی جایگزین روسازی آسفالتی شود.



شکل ۵. نتایج حاصل از مدل در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه براساس زمان بارگذاری.

تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال، دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نسبت استراحت ۱/۱ بوده است، بیشترین آسیب تحت سرعت‌های عبوری مختلف به نمونه وارد شده است. در مقابل در تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال، دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نسبت استراحت ۱/۹، کمترین آسیب‌پذیری در نمونه مشاهده شده است. با توجه به مباحث ذکر شده و شکل ۲، می‌توان بدترین و بهترین شرایط را در حالات ۲ و ۱۱ بارگذاری که در محور افقی شکل مذکور ارائه شده است، مشاهده کرد.

در مطالعات خاک‌ی و همکاران،^[۱۲] طول سیکل بارگذاری متناسب با سرعت حرکت خودروها تعیین شده است. در جدول ۵، سرعت حرکت خودروها متناظر با زمان‌های مختلف بارگذاری نمونه‌ی آسفالتی در آزمایشگاه ارائه شده است. براساس مندرجات جدول ۵ و نتایج حاصل از مدل پیش‌رو، کمیته‌ی سرعت حرکت خودرو ۲۰ کیلومتر بر ساعت تعیین شده است. این موضوع به این معناست که در مناطق با دمای بسیار بالا ترجیحاً از ایجاد توقف در معابر و جاده‌ها خودداری شود و در مناطقی که این موضوع اجتناب‌ناپذیر است، روسازی‌های بتنی جایگزین روسازی آسفالتی شود.

12. Matlab

پانوشته‌ها

1. hydroplaning
2. national cooperative highway research program (NCHRP)
3. federal highway administration (FHWA)
4. state highway agencies
5. vesis
6. monismith
7. superpave
8. aashto
9. sharp
10. Vermeer
11. chamber

منابع (References)

1. Ali Khodaii, A.M. "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Construction and Building Materials*, **23**, pp. 2586-2592 (2009).
2. Huang, H.Y., *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs (2004).

3. Kim, Y.R., *Modeling of Asphalt Concrete*, ASCE (American Society of Civil Engineers) Press (2008).
4. Oscarsson, E. "Mechanistic-empirical modeling of permanent deformation in asphalt concrete layers", Doctoral Thesis, Bulletin - Lunds Universitet (2011).
5. Xu, T. "Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests", *Construction and Building Materials*, **53**, pp. 561-567 (2014).
6. Divandari, H. "Creep model of asphalt mixtures using the indirect tensile strength test results and parameters marshall", *Transport Infrastructure Engineering*, **1**(2)(2013).
7. Ameri, M. "Model prediction of creep potential of asphalt mixtures using Marshall mix design parameters and the effect of these parameters on the Flow number", *5th National Congress on Civil Engineering*(2012).
8. McGarvey, K. "Use of the superpave gyratory compactor as a predictor of field performance of unbound Material", *Atlantic City, New Jersey, USA, 2010 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference* (April 2010).
9. *Simple Performance Test For Superpave Mix Design*, NCHRP-Report 465.
10. Muraya, P.M. "Permanent deformation of asphalt mixtures", Master of Science in Road Engineering Thesis, IHE/TU Delft (2007).
11. Moghaddam, T.B. "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Materials and Design*, **53**, pp.317-324 (2014).
12. Mansourkhaki, A. "Analytical assessment of the number of cycles of loading timeout leads to disruption of road", *6th National Congress on Civil Engineering*(2012).
13. Onyango, M. "Verification of mechanistic prediction models for permanent deformation in asphalt mixes using accelerated pavement testing", Ph.D. Thesis, Kansas State University (2009).