

## ارایه مدل عملکرد خزشی آسفالت با استفاده از گراف نیرو- جابه‌جایی و اعتبارسنجی آن با الگوریتم ژنتیک

### مقاله پژوهشی

حسن دیوانداری\*، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۴/۲۵- پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۰

صفحه ۶۲-۴۵

### چکیده

هزینه‌های چشمگیر تعمیر و نگهداری راه‌های موجود، تحقیقات گسترده‌ای را در این خصوص، موجب شده است. بخش عمده‌ای از هزینه‌های مذکور، در ترمیم روسازی‌های آسفالتی انجام می‌شود. از طرفی، بروز تغییر شکل‌های ماندگار در این نوع روسازی، به عنوان یکی از عوامل شایع خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر، شناخته شده است. این تغییر شکل‌ها به شدت تحت تاثیر عملکرد خزشی آسفالت است. شناخت و پیش‌بینی پتانسیل بروز تغییر شکل‌های مذکور در مرحله آزمایشگاهی ساخت نمونه‌ها، تاثیر چشمگیری در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی خواهد داشت. اما تجهیزات ارزیابی عملکرد خزشی آسفالت، پرهزینه بوده و در شرایط کنونی کشور و با وجود تحریم‌ها، دور از دسترس هستند. در این پژوهش سعی شده است که با ساخت نمونه‌های متعدد از مواد و مصالحی که به صورت عرف در ساخت روسازی آسفالتی در ایران استفاده می‌شود و با استفاده از منحنی تنش- کرنش آسفالت، عملکرد خزشی آن را پیش‌بینی نمود. بدین منظور منحنی نیرو-جابه‌جایی آزمایش کشش برزیلی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش به راحتی و با هزینه اندک با تغییر فک دستگاه مارشال، انجام می‌شود. مدل ارایه شده نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از پارامترهای این منحنی، تخمین مناسبی از عملکرد خزشی بدست آورد. اعتبار مدل مذکور با استفاده از روش تحلیل میانگین‌ها و همچنین با الگوریتم ژنتیک، تایید گردیده است.

واژه‌های کلیدی: رفتار خزشی آسفالت، منحنی نیرو-جابه‌جایی، آزمایش کشش برزیلی، الگوریتم ژنتیک

### ۱- مقدمه

ارزش روز راه است که بر اساس عمر مفید راه مورد نظر تعیین می‌گردد (کی‌منش و فصیحی، ۱۳۹۳). روسازی راه به دلیل تماس مستقیم با شرایط مخرب محیطی و بارهای وارده، بیشترین پتانسیل را برای آسیب‌پذیری دارد. به همین دلیل شناخت هر چه بیشتر انواع خرابی‌های آسفالت و علل بروز آنها در مراحل مختلف ساخت و بهره‌برداری، کمک شایانی به کاهش هزینه‌های نگهداری می‌نماید. یکی از خرابی‌های عمده روسازی، شیارشدگی است. این خرابی که به صورت یک گودی در طول

ساخت روسازی راه، پرهزینه‌ترین بخش در احداث یک راه جدید است. در هنگام بهره‌برداری نیز، هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی<sup>۱</sup>، بسیار چشمگیر و قابل توجه است (Suhartono et al., 2019). اگرچه نگهداری راه‌ها، یکی از فعالیت‌های پرهزینه در زمینه حمل و نقل به شمار می‌آید، اما می‌توان با یک برنامه‌ریزی بهینه و مناسب، هزینه‌های نگهداری را به میزان قابل توجهی، کاهش داد (فخری و همکاران، ۱۳۹۵). براساس مطالعات اقتصادی انجام شده، هزینه نگهداری راه در حدود ۴ تا ۶ درصد

اعمال شده برحسب کیلوپاسکال،  $E$ : مدول الاستیسیته برحسب کیلوپاسکال است. کرنش پلاستیک، عامل یکی از خرابی‌های عمده روسازی‌های انعطاف‌پذیر است که تحت عنوان تغییر شکل‌های ماندگار<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. این نوع تغییر شکل، بخش برگشت ناپذیر تغییر شکل‌هایی است که پس از باربرداری، در منحنی تنش-کرنش باقی می‌ماند و تحت عنوان تغییر شکل پلاستیک شناخته می‌شود (شکل ۱). تجمع تغییر شکل‌های پلاستیک رویه آسفالتی، موجب بروز کرنش ماندگار در آن می‌شود که عامل اصلی بروز شیارشدگی در آسفالت است (طاهرخانی و ارشدی، ۱۳۹۷). شیارشدگی، تجمع تغییر شکل‌های پلاستیک روسازی در امتداد مسیر چرخ خودروها است. شیارشدگی می‌تواند ناشی از عدم تراکم لایه‌های مختلف روسازی و یا کمبود مقاومت برشی رویه آسفالتی باشد. هرچند استفاده از زنجیر چرخ و لاستیک‌های یخ شکن نیز می‌تواند باعث ساییدگی سطح رویه در امتداد مسیر چرخ‌ها گردد، اما این نوع خرابی را نمی‌توان تحت عنوان خرابی سازه‌ای معرفی نمود (Han et al., 2018).

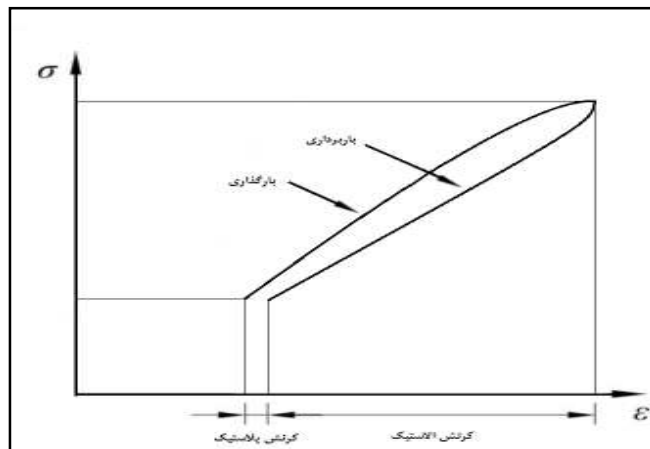
روسازی و در امتداد مسیر چرخ‌های خودرو ایجاد می‌شود، می‌تواند با کاهش ضخامت روسازی، جمع شدن آب و بروز پدیده آب‌پاشش<sup>۲</sup>، ضمن تخریب روسازی، ایمنی استفاده کنندگان از راه را بشدت تحت تاثیر قرار دهد (Gu, Zhang & Lv, 2018). اما تجهیزاتی که امکان پیش‌بینی این خرابی را در آزمایشگاه داشته‌باشند، اغلب پرهزینه بوده و در دسترس نیستند. بدین ترتیب راهکارهایی که بتوانند با تجهیزات موجود، در مرحله آزمایشگاهی تولید آسفالت و تعیین طرح اختلاط، پتانسیل بروز شیارشدگی آن را ارزیابی کنند، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند.

## ۲- بیان مساله

کرنش حاصل از بارگذاری در مصالح الاستوپلاستیک، شامل دو بخش کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک است (رابطه ۱).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad , \quad \varepsilon_e = \sigma/E \quad (1)$$

که در این روابط:  $\varepsilon_t$ : کرنش کل،  $\varepsilon_e$ : کرنش الاستیک (برگشت پذیر)،  $\varepsilon_p$ : کرنش پلاستیک (ماندگار)،  $\sigma$ : تنش



شکل ۱. منحنی تنش-کرنش در دو حالت بارگذاری و باربرداری (Zhang et al., 2019)

شرایط کنترل شده دما ثابت، کرنش کل از رابطه زیر تعیین می‌شود: (Shanbara, Ruddock and Atherton, 2018)

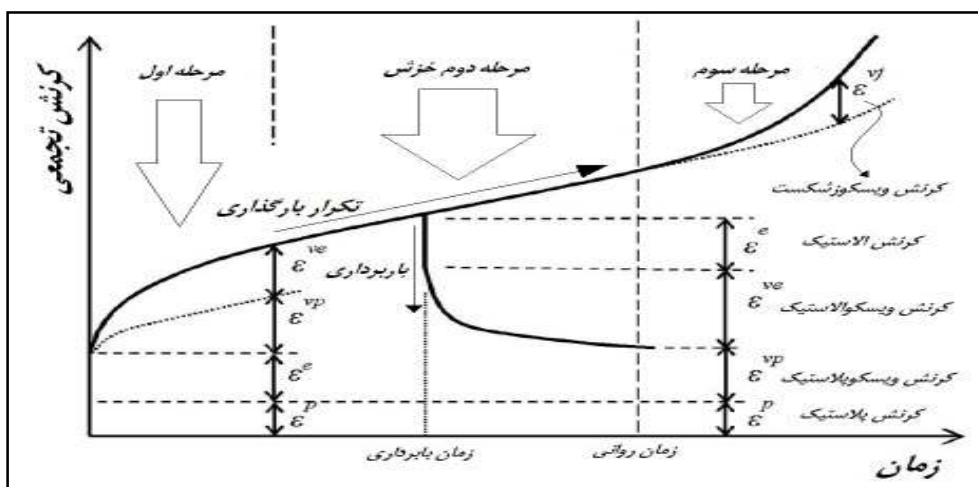
$$\varepsilon_t(\sigma, t, N) = \varepsilon_e(\sigma) + \varepsilon_p(\sigma, N) + \varepsilon_{ve}(\sigma, t) + \varepsilon_{vp}(\sigma, t, N) \quad (2)$$

اما در مصالح ویسکوز، میزان کرنش به غیر از میزان تنش و مدول برجهندگی، تحت تاثیر زمان و دما نیز می‌باشد. در

که در این روابط:  $t, \bar{\sigma}, \varepsilon_e$

در ادامه تحت تاثیر بارگذاری و باربرداری های مکرر، کرنش تجمعی افزایش پیدا کرده و باعث می شود میکروتَرَکها بوجود آمده و گسترش یابند. انتشار این ترکهای ریز، باعث نرمی نمونه می گردد که سختی حاصل از مرحله قبل را تحت تاثیر قرار می دهد و تحت عنوان مرحله دوم خزش شناخته می شود. در این مرحله که شیب منحنی کرنش-زمان تقریباً ثابت است، نرخ سخت شدگی ناشی از جابجایی اجزا نمونه با نرخ نرم شدگی ناشی از انتشار میکرو ترکها با هم در تعادل هستند. با ادامه روند بارگذاری، از بهم پیوستن میکرو ترکها، ماکرو ترکها شکل می گیرند که نرخ نرم شدگی را به شدت افزایش می دهد. بدین ترتیب در مرحله سوم، مقدار کرنش های تجمعی و به تبع آن تغییر شکل های ماندگار، مجدداً رشد پیدا می کند. زمان شروع این مرحله، زمان روانی و تعداد سیکل بارگذاری منجر به آن عدد روانی<sup>۵</sup> نامیده می شود. مطالعات انجام شده نشان داده است که این عدد می تواند نشانگر پتانسیل شیارشدگی روسازی آسفالتی باشد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۶).

$\varepsilon_{ep}$ : مانند رابطه یک تعریف می شوند،  $N$ : تعداد دوره های بارگذاری و باربرداری،  $t$ : زمان بارگذاری بر حسب ثانیه،  $\varepsilon_{ve}$ : کرنش ویسکوالاستیک،  $\varepsilon_{vp}$ : کرنش ویسکو پلاستیک است. کرنش ماندگار، عملاً مجموع کرنش های پلاستیک و ویسکوپلاستیک است. در بارگذاری و باربرداری های مکرر نمونه های آسفالتی، مقدار کرنش پلاستیک تقریباً ثابت اما مقدار کرنش ویسکوپلاستیک در طول زمان افزایش می یابد (Hussan et al., 2019). مطالعات انجام شده نشان می دهد که نرخ تغییرات کرنش تجمعی در طول زمان، ثابت نیست. این تغییرات ابتدا با شیب زیادی شروع می شود. در مرحله دوم، نرخ تغییرات با شیب مثبت خطی اما ملایم است. در مرحله سوم، مجدداً میزان تغییرات کرنش با گذشت زمان، شدت می یابد (شکل ۲). از نظر فیزیکی، در مرحله نخست، تحت مراحل اولیه بارگذاری، جابجایی های سنگدانه ها و قیر باعث شدت تغییرات کرنش می گردد. در این مرحله چون مقدار این جابجایی ها قابل توجه است، مقدار افزایش کرنش تجمعی، در مدت زمان کم، قابل توجه است. این مرحله تحت عنوان مرحله سخت شدگی<sup>۴</sup> شناخته می شود.



شکل ۲. اجزای کرنش تجمعی و تغییرات آن در طول زمان در دو حالت بارگذاری مکرر و باربرداری

### ۳- پیشینه تحقیق

(Lv et al., 2019) (Al-Khateeb et al., 2018) (2018). آزمایش کشش غیر مستقیم<sup>۶</sup> آسفالت، بیشتر با هدف سنجش حساسیت رطوبتی نمونه های آسفالتی انجام می گردد (فائزی و فرخی، ۱۳۹۷) (Do et al., 2019) (Wang et al., 2019). در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، بارگذاری توسط دو تیغه با نوار فلزی

در تحقیقات گسترده ای برای تعیین پتانسیل شیارشدگی آسفالت، از آزمایش خزش استفاده شده است. بررسی نتایج حاصل از این پژوهش ها نشان می دهد که عدد روانی را می توان با اطمینان به عنوان معیاری برای شیارشدگی به کار برد. عدد روانی کمتر یک نمونه، نشان دهنده پتانسیل شیارشدگی بالاتر آسفالت خواهد بود (Irfan et al.,

نمود. این گراف ابتدا صعودی است و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر، نزولی شده و در نهایت شکست نمونه اتفاق می‌افتد. سطح زیر این منحنی در هر لحظه که حاصلضرب نیرو در جابجایی است، معادل انرژی صرف شده تا آن لحظه است. انرژی شکست تا گسیختگی<sup>۸</sup> کار انجام شده روی نمونه تا رسیدن به حداکثر نیرو (نیروی گسیختگی) و انرژی شکست نهایی<sup>۹</sup>، کل کار انجام شده است که برابر با کل سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. محققان زیادی از مفاهیم انرژی منحنی مذکور در ارزیابی عملکرد نمونه‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، تحقیقات اخیر نشان داده است که بین مقدار انرژی شکست تا رسیدن به نقطه گسیختگی (سطح زیر منحنی تا نقطه گسیختگی) و بروز ترک‌های خستگی (به دلیل کمبود مقاومت کششی مناسب در زیر لایه آسفالتی) ارتباط وجود دارد (Norouzi et al., 2017) (Pitawala et al., 2019). عاملی که در هنگام بروز کشش در آسفالت در مقابل آن مقاومت می‌کند، چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها است. در تحقیقات انجام شده مشخص شده است که ترد و شکننده بودن آسفالت می‌تواند باعث کاهش شکل‌پذیری و کاهش انرژی شکست آسفالت شود (گلی و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیقی که در سال ۱۳۹۴ انجام شد، ضمن ارائه مدل شیارشدگی با استفاده از پارامترهای مارشال و کشش غیر مستقیم، مشخص گردید که عمق شیار با حداکثر تغییر شکل قائم ناشی از آزمایش کشش غیر مستقیم، رابطه مستقیم دارد (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش سعی شده است که ارتباط پتانسیل شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی با مولفه‌های منحنی نیرو-تغییر شکل قائم بررسی و در صورت امکان، مدل مناسبی در این خصوص ارائه گردد.

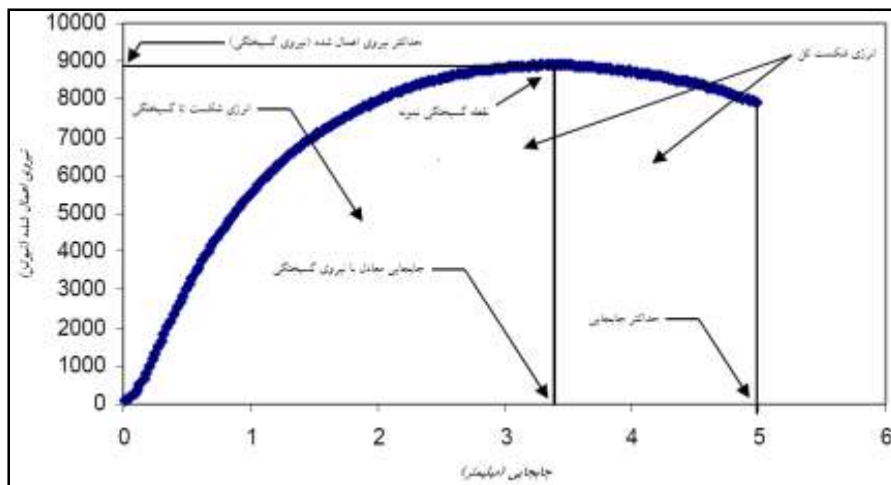
مطابق استاندارد (AASHTO T283) انجام می‌شود. هنگام آزمایش، نمونه در قالب بارگذاری مربوطه قرار داده می‌شود و بارگذاری با کمک دستگاه استحکام مارشال با سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه به صورت قطری اعمال می‌گردد. بار نهایی در هنگام شکستن نمونه اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید (دیواندری و سجادی، ۱۳۹۶).

$$ITS = \frac{2000P}{\pi d} \quad (3)$$

که در این رابطه، ITS: مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال، P: بار نهایی در هنگام گسیختگی بر حسب کیلونیوتن، d: قطر نمونه بر حسب میلی‌متر و t: ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر، هستند. در ادامه نسبت مقاومت نمونه‌هایی که در شرایط سیکل ذوب و یخ قرار می‌گیرند به مقاومت نمونه‌های خشک با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. مطابق نشریه ۲۳۴، این نسبت حداقل باید ۰/۷۵ باشد.

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (4)$$

که در این رابطه، TSR: نسبت مقاومت کششی آسفالت<sup>۷</sup>،  $ITS_{wet}$ : مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌هایی که تحت شرایط ذوب و یخبندان قرار گرفته‌اند بر حسب کیلوپاسکال،  $ITS_{dry}$ : مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک بر حسب کیلوپاسکال است. خروجی این آزمایش به غیر از مقدار نیروی قائم، تغییر مکان قائم نمونه تحت بارگذاری قائم است که در روابط فوق مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. هر چند آنچه در روابط فوق کاربرد دارد، صرفاً بیشینه نیروی قائم اعمال شده است، اما می‌توان با استفاده از زوج مقادیر نیرو و جابجایی قائم در هر لحظه، گراف نیروی قائم-تغییر شکل قائم را ترسیم



شکل ۳. مفهوم انرژی در منحنی نیرو-جابجایی قائم (Wu et al., 2019)

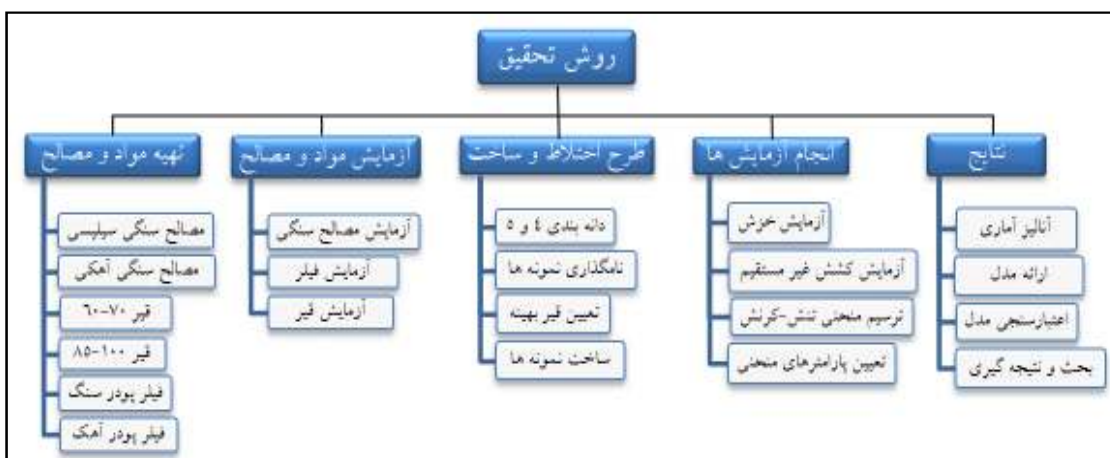
#### ۴- اهمیت موضوع

مارشال قابل انجام است. در این پژوهش سعی شده است که با ارایه مدلی که متغیرهای مستقل آن خروجی آزمایش کشش برزیلی هستند، عملکرد خزشی آسفالت را پیش‌بینی نمود.

همانطور که اشاره شد، شیارشدگی یکی از خرابی‌های عمده روسازی است. از طرفی در روش مارشال که به صورت عرف در ایران برای تعیین میزان قیر بهینه استفاده می‌شود، پتانسیل مخلوط برای شیارشدگی، ارزیابی نمی‌شود. تجهیزات پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی، مانند: دستگاه چرخ بارگذاری و دستگاه خزش دینامیکی نیز ضمن اینکه گران هستند، در کارگاه‌های دورافتاده، در دسترس نمی‌باشند. آزمایش کشش برزیلی صرفاً با تغییرات بسیار کمی، با دستگاه

#### روش تحقیق

مراحل انجام این پژوهش در شکل (۴) ارایه شده است. در ادامه توضیحات هر بخش ارایه خواهد گردید.



شکل ۴. مراحل مختلف انجام پژوهش

#### تهیه مواد و مصالح مورد نیاز

سازه و فیلر آهک نیز از معدن سنگ آهک شهر قم تهیه گردید.

همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود در این پژوهش از دو نوع مصالح سنگی (سیلیسی و آهکی)، دو نوع قیر (۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰) و دو نوع فیلر (آهک و پودر سنگ) استفاده شده است. مصالح سیلیسی از معدن ریوند واقع در شمال غربی نیشابور و مصالح آهکی از معدن اسب چران واقع در شمال شرقی تهران تهیه شده است. همچنین دو نوع قیر مورد استفاده، از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد. فیلر پودر سنگ از معدن سنگ سفید

#### آزمایش‌های تعیین مرغوبیت مواد و مصالح مورد استفاده

به منظور اطمینان از خواص فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی، فیلر و قیر مورد استفاده، آزمایش‌های لازم مطابق نشریه (۲۳۴) سازمان برنامه و بودجه، انجام شد که نتایج آن در جدول‌های (۱) تا (۳) ارایه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی سیلیسی و آهکی مورد استفاده در پژوهش

عنوان آزمایش مصالح سنگی	(واحد)	نتایج آزمایش مصالح		مقدار مجاز مصالح رویه آسفالتی	استانداردهای آزمایش
		سیلیسی	آهکی		
الف- سنگدانه‌های درشت مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی (مانده روی الک شماره ۴)					
وزن مخصوص مصالح	(gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۵۴	۲/۶۷	-	ASTM C 127 / AASHTO T 85
سایش به روش لوس آنجلس	درصد	۱۹	۱۲	حداکثر ۲۵	ASTM C 131 / AASHTO T 96
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	درصد	۲	۱/۲	حداکثر ۸	ASTM C 88 / AASHTO T 104

ASTM C 127	AASHTO T 85	حداکثر ۲/۵	۰/۳	۰/۹	درصد	جذب آب
ASTM D 4791	BS 812	حداکثر ۱۵	۹	۱۱	درصد	سنگدانه‌های پهن و دراز
ASTM D 5821	AASHTO TP 61	حداقل ۸۵	۹۱	۹۶	درصد	شکستگی مصالح در یک جبهه
ASTM D 5821	AASHTO TP 61	حداقل ۸۰	۸۵	۹۰	درصد	شکستگی مصالح در دو جبهه
ب- سنگدانه‌های ریز مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی (عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰)						
ASTM C 128	AASHTO T 87	-	۲/۶۷	۲/۵۴	(gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص مصالح
ASTM D 4318	AASHTO T 90	غیر خمیری	غیر	غیر	درصد	نشانه خمیری
ASTM C 88	AASHTO T 104	حداکثر ۱۲	۶	۷	درصد	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
ASTM C 128	AASHTO T 87	حداکثر ۲/۵	۰/۳	۱	درصد	جذب آب
ASTM D 2419	AASHTO T 176	حداقل ۵۰	۶۹	۷۹	درصد	ارزش ماسه‌ای مصالح
ASTM C 1252	AASHTO T 304	حداقل ۴۵	۵۳	۵۵	درصد	میزان گوشه‌داری <sup>۱۱</sup> (عبوری از ۲/۳۶)

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های دو نوع فیلر مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

استانداردهای آزمایش	مقدار مجاز در آسفالت	نتایج آزمایش فیلر		(واحد)	عنوان آزمایش	
		پودر سنگ	آهک			
ASTM D 4318	AASHTO T 90	حداکثر ۴	غیر خمیری	درصد	نشانه خمیری	
ASTM C 29	AASHTO T 19	۰/۵ < < ۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۷۹	(gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص

نام هر نمونه شامل چهار کاراکتر است که دو حرف و دو عدد است. بخش اول، نشان‌دهنده نوع سنگدانه است. حرف S سنگدانه سیلیسی و حرف L، سنگدانه آهکی را نشان می‌دهد. حرف دوم نشان دهنده نوع فیلر مخلوط است. حرف A برای فیلر آهک و حرف B برای فیلر پودر سنگ استفاده شد. کاراکتر سوم نوع قیر را نشان می‌دهد. اعداد ۶ و ۸ به ترتیب نشان دهنده استفاده از قیر ۶۰-۷۰ و ۱۰۰-۸۵ در ساخت نمونه، هستند. کاراکتر چهارم، نوع دانه‌بندی نمونه را نشان می‌دهد. اعداد ۴ و ۵ به ترتیب نشان دهنده دانه‌بندی شماره چهار و پنج نمونه است.

#### دانه‌بندی مصالح سنگی

مطابق نشریه ۲۳۴، دو دانه‌بندی پیوسته پرکاربرد برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. در این پژوهش، حد وسط دانه‌بندی چهار که جهت ساخت آستر و رویه استفاده می‌شود و حد وسط دانه‌بندی پنج که فقط برای ساخت رویه استفاده می‌شود، مطابق شکل (۵) استفاده شد.

#### نامگذاری نمونه‌ها

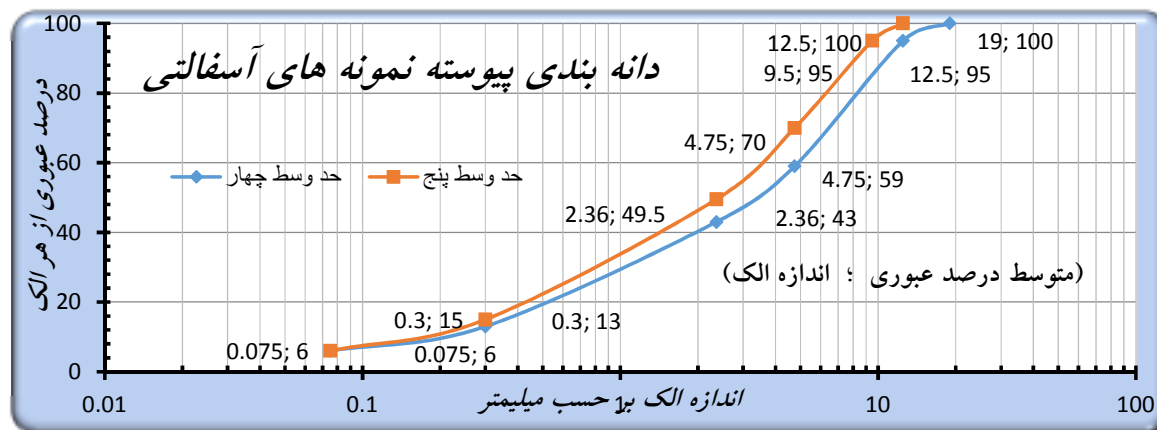
جدول ۳. نتایج آزمایش‌های دو نوع قیر مورد استفاده به همراه استانداردهای مربوطه

استانداردهای آزمایش قیر			مقدار مجاز		نوع قیر		(واحد)	عنوان آزمایش قیر
			۸۵-۱۰۰	۶۰-۷۰	۸۵-۱۰۰	۶۰-۷۰		
ASTM D 5	AASHTO T 49	ISIRI 2950	۸۵ < ۱۰۰	۶۰ < ۷۰	۸۹	۶۴	10 <sup>-1</sup> mm	درجه نفوذ قیر
ASTM D 36	AASHTO T 53	ISIRI 3868	۴۵ < ۵۲	۴۹ < ۵۶	۴۷	۵۲	°C	نقطه نرمی قیر
ASTM D 70	AASHTO T 228	ISIRI 3872	۱/۰۱ < ۱/۰۵	۱/۰۱ < ۱/۰۶	۱/۰۲	۱/۰۵	gr/cm <sup>3</sup>	چگالی قیر
ASTM D 92	AASHTO T 48	ISIRI 2954	۲۳۲ <	۲۳۲ <	۲۹۵	۳۰۵	°C	درجه اشتعال قیر
ASTM D 113	AASHTO T 51	ISI RI 3866	۱۰۰ <	۱۰۰ <	+۱۰۰	+۱۰۰	Cm	میزان کشش‌پذیری قیر
ASTM D 2170	AASHTO T 201	ISIRI 12855	۲۵۰ <	۳۰۰ <	۲۸۵	۳۴۸	cSt	کندروانی قیر در دمای ۱۳۵ °C
ASTM D 1754	AASHTO T 179	ISIRI 2957	< ۱/۰	< ۰/۸	۰/۳۳	۰/۱۶	%	افت وزنی قیر در اثر حرارت
ASTM D 2042	AASHTO T 44	ISIRI 2953	۹۹ <	۹۹ <	۹۹/۵۹	۹۹/۵۱	%	حلالیت قیر در تری‌کلرواتیلن
ASTM D 5	AASHTO T 49	2950 ISIRI	۵۰ <	۵۴ <	۶۰	۶۵	%	تغییر درجه نفوذ پس از گرمایش

### تعیین میزان قیر بهینه

وجود آمد. برای هر ترکیب مطابق روش مارشال هجده نمونه و در مجموع ۲۸۸ نمونه ساخته شد.

در این پژوهش مقدار قیر بهینه<sup>۱۱</sup> با استفاده از روش مارشال تعیین گردید. با توجه به دو نوع مصالح سنگی، دو نوع فیلر، دو نوع قیر و دو دانه‌بندی، عملاً شانزده ترکیب



شکل ۵. دانه‌بندی‌های پیوسته شماره چهار و پنج جهت ساخت مخلوط آسفالتی گرم

### مشخصات آزمایش خزش دینامیکی

- استاندارد آزمایش: استاندارد استرالیا<sup>۱۳</sup>،
- بار اعمال شده: موج مربعی و شامل ۵۰۰ میلی ثانیه بارگذاری<sup>۱۴</sup> و ۱۵۰۰ میلی ثانیه استراحت<sup>۱۵</sup>،
- تنش: مقدار تنش تماسی<sup>۱۶</sup> برابر ۲ کیلوپاسکال و تنش انحرافی<sup>۱۷</sup> معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال،
- شرط پایان آزمایش<sup>۱۸</sup>: کرنش تجمعی محوری ۴۰۰۰۰ یا تعداد سیکل بارگذاری ۱۰۰۰۰ سیکل، هرکدام زودتر اتفاق بیافتد،
- دمای انجام آزمایش: ۵۰ درجه سانتیگراد.

### مشخصات آزمایش کشش برزیلی

- دستگاه: مارشال با فک تیغه‌ای مخصوص آزمایش کشش غیر مستقیم آسفالت به وزن ۸/۷ کیلوگرم،
- سرعت بارگذاری: ۵۰/۸ میلیمتر در دقیقه،
- دقت ثبت جابجایی: یک دهم میلیمتر،
- دمای انجام آزمایش: ۲۵ درجه سانتیگراد.

### مقدار قیر بهینه ترکیب‌های مختلف

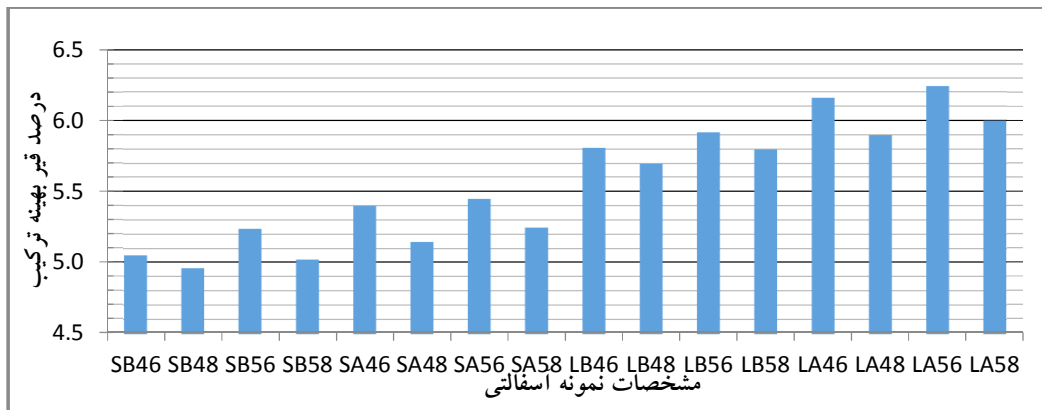
پس از انجام مراحل مختلف آزمایش مارشال و رسم شش منحنی برای شانزده ترکیب مختلف، میزان قیر بهینه ترکیب‌های مذکور مشخص شد که مقادیر آن در شکل (۶) نشان داده شده است.

### ساخت نمونه‌های موردنیاز

نمونه‌های مورد نیاز در انجام آزمایش‌های عملکردی، با استفاده از متراکم کننده دورانی<sup>۱۲</sup> ساخته شد. مشخصات اصلی تراکم شامل: تنش فشاری ۶۰۰ کیلو پاسکال، تعداد دوران ۳۰ دور در دقیقه، زاویه انحراف ۱/۲۵ درجه تعیین شد. به ازای هر ترکیب ۹ نمونه شامل سه نمونه با درصد قیر بهینه، سه نمونه با نیم درصد پایین‌تر و سه نمونه با میزان قیر نیم درصد بالاتر از قیر بهینه، برای انجام آزمایش خزش و به همین تعداد نمونه برای انجام آزمایش کشش غیر مستقیم و رسم منحنی تنش-کرنش نمونه، تهیه گردید. بدین ترتیب در این مرحله نیز ۲۸۸ نمونه با متراکم کننده دورانی، ساخته شد.

### انجام آزمایش‌ها

دو آزمایش خزش دینامیکی و کشش برزیلی برای نمونه‌ها انجام شد. چون هر دو آزمایش مخرب هستند، ۱۴۴ نمونه تحت آزمایش خزش دینامیکی و ۱۴۴ نمونه مشابه سری اول، تحت آزمایش خزش دینامیکی قرار گرفتند. هدف از آزمایش اول، تعیین عدد روانی و به تبع آن پتانسیل شیارشدگی نمونه‌ها بود که در این پژوهش عملاً متغیر وابسته تحقیق محسوب می‌شود. خروجی آزمایش دوم، منحنی نیرو-جابجایی بود که لازم بود متغیرهای مستقل مورد نیاز انجام پژوهش، از آن تعیین گردند.

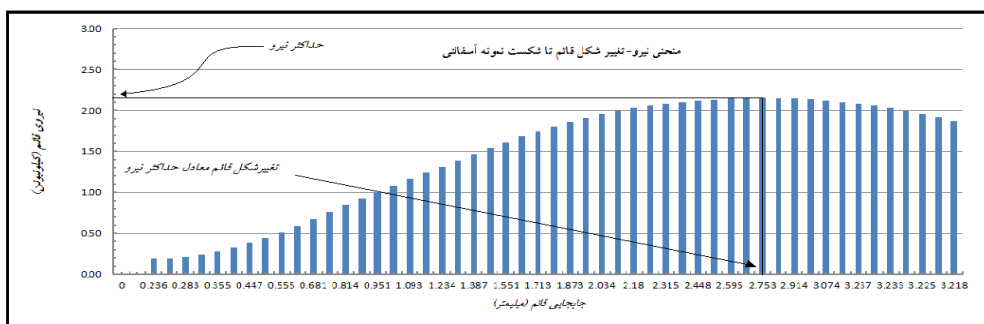


شکل ۶. مقایسه میزان قیر بهینه ترکیب‌های مختلف آسفالتی ساخته شده در این پژوهش

### نتایج آزمایش کشش برزیلی

شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این منحنی ابتدا صعودی و سپس نزولی است. برای تمامی نمونه‌ها، ابتدا مقادیر حداکثر نیرو و کرنش متناظر آن مشخص شد.

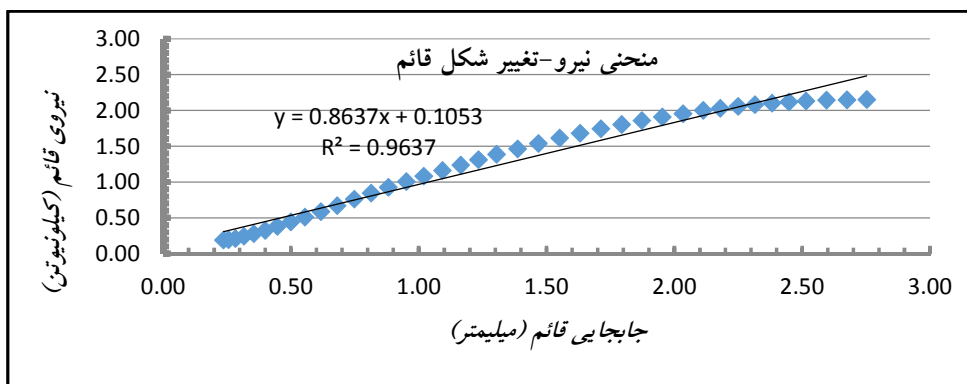
پس از انجام آزمایش کشش برای ۱۴۴ نمونه آسفالتی، منحنی نیرو-تغییر شکل قائم برای تمام نمونه‌ها ترسیم گردید. نمونه‌ای از این منحنی در شکل شماره (۷) ارایه



شکل ۷. منحنی نیرو-تغییر شکل حاصل از خروجی آزمایش کشش برزیلی برای نمونه آسفالتی

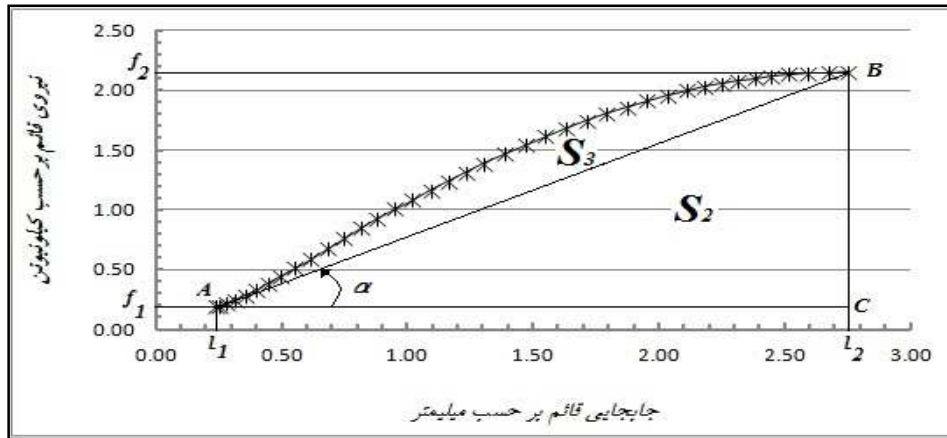
نشان دهنده این است که رگرسیون خطی با ضریب اطمینان قابل قبولی می‌تواند بخش اول منحنی نیرو-جابجایی را مدل نماید. نمونه‌ای از این مدل‌سازی در شکل (۸) ارایه شده است.

سپس برای هر گراف بهترین خطی که می‌توانست بخش صعودی منحنی را مدل کند، با استفاده از رگرسیون خطی و نرم افزار اکسل تعیین شد. ضریب همبستگی تمام مدل‌های بدست آمده در این بخش بالای ۹۲ درصد بود که



شکل ۸. رگرسیون خطی بخش صعودی منحنی نیرو-تغییر شکل حاصل از آزمایش کشش برزیلی





شکل ۹. شیب خط حداکثر نیرو در منحنی نیرو-جابجایی قائم

### نتایج آزمایش خزش

آزمایش خزش برای ۱۴۴ نمونه ساخته انجام شد. با استفاده از گراف خروجی کرنش تجمعی-تعداد سیکل بارگذاری، تعداد سیکل معادل شروع مرحله سوم این گراف برای هر نمونه تعیین و تحت عنوان عدد روانی آن نمونه، ثبت گردید.

### مدلسازی با استفاده از SPSS

تحلیل رگرسیونی یک تکنیک آماری به منظور بررسی و مدلسازی ارتباط بین متغیرها است. اگر بین متغیر وابسته با سطح سنجش کمی و متغیرهای مستقل کمی و یا کیفی دو وجهی، رابطه خطی وجود داشته باشد، رگرسیون خطی قادر است این رابطه را با کمترین خطای ممکن پیش‌بینی کند و در قالب یک معادله‌ی چند متغیره نشان دهد. معادله (۹)، معادله عمومی رگرسیون خطی است که متغیر وابسته را به صورت تابعی از متغیر مستقل بیان می‌کند.

$$\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_jX_j + \dots + b_kX_k \quad (9)$$

در این پژوهش عدد روانی تحت عنوان متغیر وابسته و حداکثر نیروی اعمالی هنگام شکست ( $f_2$ )، میزان تغییر شکل در زمان شکست ( $l_2$ )، شیب خط حداکثر نیرو ( $a$ )، ضریب زاویه خط برآزش داده شده روی منحنی نیرو-جابجایی قائم ( $A$ )، عرض از مبدا خط مذکور ( $B$ )، کل سطح زیر منحنی ( $S_1$ )، سطح زیر منحنی شیب خط با حداکثر نیرو ( $S_2$ ) و تفاضل بین این دو مساحت ( $S_3$ ) به عنوان متغیرهای مستقل فرض شدند. آماره‌های توصیفی این متغیرها، در جدول (۴) ارائه گردیده است.

برای همه ۱۴۴ نمونه آسفالتی، رگرسیون خطی فوق انجام شد و ضریب زاویه و عرض از مبدا خطوط برآزش داده شده تعیین گردید. در ادامه برای تمامی نمونه‌ها، مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی از رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$S_1 = \int_{l_1}^{l_2} F * d(l) \quad (5)$$

$S_1$ : مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی بر حسب کیلونیوتن-میلی‌متر (کارانجام شده)،  $l_1$ : میزان جابجایی اولیه بر حسب میلیمتر،  $l_2$ : میزان جابجایی معادل با حداکثر نیروی قائم بر حسب میلیمتر،  $F$ : نیروی اعمال شده بر حسب کیلونیوتن.

در ادامه به منظور تعریف پارامترهای مستقل بیشتر، خط حداکثر شیب ترسیم شد. این خط نقطه شروع منحنی نیرو-جابجایی را به نقطه ماکزیموم منحنی وصل می‌کند. خط  $AB$  در شکل (۹) نشان داده شده است.

شیب خط حداکثر نیرو برای منحنی تمام نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید. در ادامه مساحت‌های  $S_2$  و  $S_3$  با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه گردید.

$$a = \tan(a) = \frac{BC}{AC} = \frac{f_2 - f_1}{l_2 - l_1} \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} * AC * BC = \frac{(f_2 - f_1) * (l_2 - l_1)}{2} \quad (7)$$

$$S_3 = S_1 - S_2 = \int_{l_1}^{l_2} F * d(l) - \frac{(f_2 - f_1) * (l_2 - l_1)}{2} \quad (8)$$

در روابط فوق پارامترها به شکل ذیل تعریف می‌شوند:

$a$ : شیب خط حداکثر نیرو،  $l_1$  و  $l_2$ : مانند رابطه (۵)،  $f_1$  و  $f_2$ : به ترتیب نیروی اولیه و حداکثر نیروی شکست،  $S_1$ : کل مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی،  $S_2$ : مساحت دوزنقه حداکثر شیب ( $Al_1Bl_2$ )،  $S_3$ : تفاضل مساحت کل مساحت دوزنقه حداکثر شیب.

اگر به صفر نزدیک باشد نشان دهنده همبستگی مثبت و اگر به ۴ نزدیک باشد نشان دهنده همبستگی منفی می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار آماره آزمون اگر کمتر از ۱ یا بیشتر از ۳ باشد زنگ هشدار برای وجود خود همبستگی مثبت یا منفی بین باقیمانده است. نتایج این آزمون در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۵)، آماره دوربین واتسون برابر ۱/۳۵۱ است و فرض استقلال خطاها تایید می‌شود. بدین ترتیب می‌توان از رگرسیون برای مدلسازی استفاده نمود.

یکی از مفروضاتی که در رگرسیون مدنظر قرار می‌گیرد، استقلال خطاها (تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده توسط معادله رگرسیون) از یکدیگر است. در صورتی که فرضیه استقلال خطاها رد شود و خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد. به منظور بررسی استقلال مشاهدات (استقلال مقادیر باقی مانده یا خطاها) از یکدیگر از آزمون دوربین- واتسون استفاده می‌شود. آماره دوربین واتسون بین ۰ تا ۴ می‌باشد. اگر بین باقیمانده‌ها همبستگی متوالی وجود نداشته باشد، مقدار این آماره باید به ۲ نزدیک باشد.

جدول ۴. آماره‌های توصیفی متغیرهای اولیه

متغیر	تعداد	میانگین	واریانس	انحراف معیار	انحراف استاندارد میانگین	حد اقل	حداکثر
Y	۱۴۴	۲۰۱۴/۳۸	۲۷۰۲۰۲۴/۱۸۲	۱۶۴۳/۷۸۳	۱۳۶/۹۸۲	۲۳۵	۷۳۷۵
$f_2$	۱۴۴	۱/۵۱۷۸	۰/۱۸۱	۰/۴۲۵۱۲	۰/۰۳۵۴۹	۰/۴۵	۲/۴۹
$l_2$	۱۴۴	۵/۱۴۷۱	۳/۹۵۳	۱/۹۸۸۲۲	۰/۱۶۵۶۸	۱/۲۶	۱۱/۷۶
a	۱۴۴	۰/۴۰۱۳	۰/۱۰۸	۰/۳۲۹۲۷	۰/۰۲۷۴۴	۰/۰۷	۱/۶۱
A	۱۴۴	۰/۳۸۹۸	۰/۱۲۹	۰/۳۵۹۷۶	۰/۰۲۹۹۸	۰/۰۴	۱/۶۹
B	۱۴۴	۰/۲۴۳۸	۰/۰۳۵	۰/۱۸۵۸۰	۰/۰۱۵۴۸	-۰/۲۰	۰/۸۷
$S_1$	۱۴۴	۳/۹۱۷۰	۱/۹۷۶	۱/۴۰۵۶۰	۰/۱۱۷۱۶	۰/۹۴	۷/۸۳
$S_2$	۱۴۴	۳/۴۶۱۵	۱/۶۳۶	۱/۲۷۹۰۰	۰/۱۰۶۵۸	۰/۹۲	۶/۸۳
$S_3$	۱۴۴	۰/۴۵۷۰	۰/۰۶۲	۰/۲۴۹۰۱	۰/۰۲۰۷۵	-۰/۵۵	۱/۰۳

جدول ۵. آماره دوربین واتسون

df1	df2	سطح معناداری	آماره دوربین-واتسون
۴	۱۳۸	۰/۰۰۰	۱/۳۵۱

جدول ۶. جدول ضریب همبستگی میان متغیرها

R	$R^2$	$R^2$ تعدیل شده	آماره F	سطح معناداری
۰/۸۸۱	۰/۷۷۶	۰/۷۶۹	۱۱۹/۵۰۲	۰/۰۰۰

جدول ۷. آنالیز واریانس متغیرها

مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معناداری
۶۸۲۰۴۹۹۴۷/۷۷۸	۴	۱۷۰۵۱۲۴۸۶/۹۴۵	۱۱۹/۵۰۲	۰/۰۰۰
۱۹۶۹۰۶۱۲۶/۲۲۲	۱۳۸	۱۴۲۶۸۵۵/۹۸۷		
۸۷۸۹۵۶۰۷۴	۱۴۲			

پس از بررسی متغیرها و شکل توزیع آنها و بررسی رابطه تک تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته، تبدیلات لازم روی متغیرهای مستقل انجام شد و  $f_2$ ،  $\ln(l_2)$  و  $1/a$  و  $A^2$  متغیرهای تاثیر گذار شناخته شدند. در رگرسیون چندگانه آزمون‌های فرضیه در مورد پارامترهای مدل و شاخص‌هایی برای تعیین نکویی مدل مورد استفاده

پس از بررسی متغیرها و شکل توزیع آنها و بررسی رابطه تک تک متغیرهای مستقل با متغیر وابسته، تبدیلات لازم روی متغیرهای مستقل انجام شد و  $f_2$ ،  $\ln(l_2)$  و  $1/a$  و  $A^2$  متغیرهای تاثیر گذار شناخته شدند. در رگرسیون چندگانه آزمون‌های فرضیه در مورد پارامترهای مدل و شاخص‌هایی برای تعیین نکویی مدل مورد استفاده

آزمون  $t$ ، آزمون آماری برای ضریب رگرسیون غیراستاندارد هر یک از متغیرهای مستقل مدل رگرسیون خطی است و با این فرض صفر که مقدار ضریب رگرسیون هر متغیر مستقل در جمعیت مبنای نمونه‌گیری صفر است، انجام می‌شود. مقدار آزمون  $t$  ضریب رگرسیون متغیر مستقل برابر با نسبت ضریب رگرسیون متغیر مستقل به خطای استاندارد آن است. با در نظر گرفتن خطای ۵ درصد هرگاه سطح آزمون  $t$  مساوی یا کمتر از ۰/۰۵ باشد، مقدار  $t$  در ناحیهی پذیرفته نشدن قرار می‌گیرد و در این صورت این نتیجه حاصل می‌گردد که به احتمال ۹۵ درصد فرضیهی صفر این آزمون رد می‌شود و ضریب رگرسیون متغیر مستقل در جمعیت مبنای نمونه صفر نخواهد بود. همچنین مشخص می‌گردد که نتایج حاصل از نمونه، ناشی از خطای نمونه‌گیری نیستند. نتایج این آزمون در جدول (۸) نشان داده شده است.

قرار می‌گیرند. شاخص همبستگی چندگانه، ضریب تعیین، آزمون  $F$ ، میانگین مربعات خطاها و آزمون  $t$  از اصلی‌ترین این آزمون‌ها هستند. همبستگی چندگانه که با نماد  $R$  نمایش داده می‌شود نشان دهنده همبستگی مقادیر متغیر وابسته با مقادیر پیش‌بینی آن است. تحلیل آماری این ضریب این است که با تغییر متغیر مستقل به اندازه یک انحراف معیار، میزان متغیر وابسته به اندازه  $R$  برابر انحراف معیارش تغییر می‌یابد.

آزمون  $F$  آزمون کلی برازندگی مدل رگرسیون خطی است و با این فرض صفر که همبستگی چندگانه در جمعیت مبنای نمونه‌گیری صفر است، انجام می‌گیرد. نسبت  $F$ ، نسبت واریانس تبیین شده خطاهاست. چنانچه سطح معناداری نسبت  $F$  مساوی یا کمتر از پنج درصد باشد، فرضیه صفر این آزمون رد می‌شود و این حاکی از این است که به احتمال ۹۵ درصد همبستگی چندگانه در جمعیت مبنای نمونه، صفر نیست. همانطور که در جدول (۷) ملاحظه می‌شود، مقدار سطح معناداری نسبت  $F$  بسیار کم و نزدیک به صفر است.

جدول ۸ آزمون  $t$  و ضرایب مدل رگرسیونی

متغیر	ضرایب	انحراف استاندارد		$t$	سطح معناداری		
		ضرایب	استاندارد شده		کران پایین	کران بالا	
$F_2$	۳۴۳۹/۸۰۷	۴۵۳/۷۲۵	۲/۱۷۷	۷/۵۸۱	۰/۰۰۰	۲۵۴۲/۶۵۶	۴۳۳۶/۹۵۹
$\ln(I_2)$	-۲۸۲۲/۳۷۹	۵۹۴/۳۵۲	-۱/۸۳۳	-۴/۷۴۹	۰/۰۰۰	-۳۹۹۷/۵۹۳	-۱۶۴۷/۱۶۴
$1/a$	۴۰۵/۶۵۳	۱۰۴/۷۱۷	۰/۷۵۲	۳/۸۷۴	۰/۰۰۰	۱۹۸/۵۹۶	۶۱۲/۷۰۹
$A^2$	-۱۷۵۷/۷۸۰	۵۲۱/۵۳۵	-۰/۳۹۹	-۳/۳۷۰	۰/۰۰۱	-۲۷۸۹/۰۱۳	-۷۲۶/۵۴۷

با توجه به جدول فوق، مدل رگرسیونی به شکل رابطه (۱۰) تعیین می‌گردد.

$$y = 3439/807 f_2 - 2822/379 \ln(I_2) + 405/653 \frac{1}{a} - 1757/780 A^2 \quad (10)$$

#### اعتبارسنجی مدل

مجموعاً ۴۸ گروه نمونه در این پژوهش در نظر گرفته شد. از هر گروه سه نمونه مشابه ساخته شد و بدین ترتیب در مجموع ۱۴۴ نمونه ساخته شد. در این مرحله به منظور سنجش اعتبار مدل بدست آمده در مرحله قبل، صرفاً میانگین متغیرهای مستقل و وابسته یک گروه در مدل‌سازی شرکت داده شد. به عبارت دیگر در این مرحله، ۴۸ سری داده در مدل‌سازی استفاده شد. مجدداً چهار متغیر  $f_2$ ،  $d_2$ ،  $a$  و  $A$  به عنوان متغیرهای تأثیر گذار شناخته شدند. جدول (۹) مقادیر  $R$  و  $R^2$  را در این مدل‌سازی نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی مدل بدست آمده به دو صورت انجام گردید. در روش اول، میانگین مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته در شرایط یکسان، برای مدل‌سازی استفاده شد. در روش دوم اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۱۹</sup>، انجام گردید.

#### مدلسازی میانگین‌ها

همانطور که توضیح داده شد، با توجه به شانزده ترکیب مختلف و در نظر گرفتن سه مقدار برای درصد قیر،

مقدار R برابر با ۰/۹۰۶ است که همبستگی کامل و مستقیم  
 بین متغیرها را نشان می‌دهد. همان طور که از مقدار  
 R(همبستگی پیرسون بین دو متغیر) نمایان است، بین  
 متغیرها همبستگی در حد زیاد وجود دارد. جدول (۱۰)،  
 جدول آنالیز واریانس متغیرهای موجود در مدل را نشان  
 می‌دهد.

جدول ۹. جدول ضریب همبستگی میان متغیرها

سطح معناداری	آماره F	R <sup>2</sup>	R
۰/۰۰۰	۵۰/۳۷۹	۰/۸۲۱	۰/۹۰۶

جدول ۱۰. جدول آنالیز واریانس متغیرها

سطح معناداری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	رگرسیون
۰/۰۰۰	۵۰/۳۷۹	۶۲۴۳۲۷۵۰/۲۶۰	۴	۲۴۹۷۳۱۰۰۱/۰۴۱	رگرسیون
		۱۲۳۹۲۶۵/۱۹۳	۴۴	۵۴۵۲۷۶۶۸/۴۷۵	باقیمانده
			۴۸	۳۰۴۲۵۸۶۶۹/۵	کل

جدول ۱۱. ضرایب رگرسیونی مدل تعیین شده و آزمون t

متغیر	ضرایب	انحراف استاندارد ضرایب	ضرایب استاندارد شده	t	سطح معناداری	فاصله اطمینان ۹۵٪ برای ضرایب
						کران بالا / کران پایین
f <sub>2</sub>	۴۳۳۲/۶۶۹	۹۶۶/۴۳۹	۲/۷۰۴	۴/۴۸۳	۰/۰۰۰	۶۲۸۰/۳۹۸ / ۲۳۸۴/۹۴۰
Ln(l <sub>2</sub> )	-۴۱۴۶/۱۲۳	۱۳۸۴/۰۰۶	-۲/۶۶۰	-۲/۹۹۶	۰/۰۰۴	-۱۳۵۶/۸۴۳ / -۶۹۳۵/۴۰۴
1/a	۶۷۸/۳۹۷	۲۷۰/۴۶۶	۱/۱۶۹	۲/۵۰۸	۰/۰۱۶	۱۲۲۳/۴۸۵ / ۱۳۳/۳۱۰
A <sup>2</sup>	-۲۵۹۱/۳۶۸	۱۰۸۷/۳۶۳	-۰/۵۵۸	-۲/۳۸۳	۰/۰۲۲	-۳۹۹/۹۳۳ / -۴۷۸/۸۰۴

با توجه به مقدار سطح معناداری در جدول فوق، مدل به کار رفته پیش‌بینی کننده خوبی برای متغیرهاست. میزان معناداری در جدول فوق کمتر از مقدار ۰/۰۵ است و بیانگر این است که مدل رگرسیونی معنادار است. جدول (۱۱)، اطلاعاتی را در مورد متغیرهای پیش‌بینی ارایه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تمامی متغیرهای

موجود در مدل اولیه، معنادار شناخته شده‌اند. مدل نهایی بدست آمده در این حالت به صورت معادله (۱۱) است. این مدل و ضرایب آن تا حد زیادی مشابه مدل اولیه است که با اطلاعات تمامی ۱۴۴ نمونه (بدون میانگین‌گیری)، بدست آمد.

$$y = 4332/669 f_2 - 4146/123 \ln(l_2) + 678/397 \frac{1}{a} - 2591/368 A^2 \quad (11)$$

بیشتری را نسبت به مرحله قبل، نتیجه می‌دهد. در اعتبار سنجی مدل‌ها، هدف اصلی تعیین ضرایب مدل به شکلی است که در هر مرحله، متغیرهای مستقل مدل جدید، کمترین اختلاف را با مقادیر واقعی آن داشته باشد. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولید مثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی بدست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که

#### اعتبار سنجی مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی است که از آن می‌توان جهت سنجش صحت مدل‌ها، استفاده نمود. این الگوریتم با الهام از طبیعت و بر پایه اصل تکاملی (پایداری بهترین‌ها) عمل می‌کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یکسری از جواب‌های مساله با هدف بدست آوردن جواب‌های بهتر، قانون بقای بهترین‌ها را اعمال می‌کند. بدین ترتیب در هر مرحله، جواب‌های بهتر و با مقبولیت

در این پژوهش، تابع  $f$  به صورت رابطه (۱۳) در نظر گرفته شده که نشان دهنده وجود یک رابطه غیرخطی برحسب پارامترها خواهد بود. این تابع نسبت به پارامترها، غیرخطی است زیرا نمی‌تواند به صورت یک ترکیب خطی از ضرایب  $\beta$  نوشته شود. پس هدف بدست آوردن ضرایب تابع است به شکلی که با توجه به داده‌ها، بهترین برازش را داشته یا حداقل تقریبی مناسب برای تابع مورد نظر باشد.

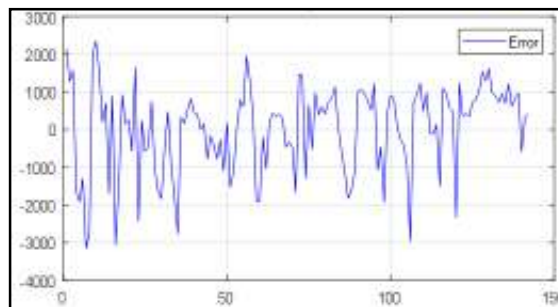
$$f(X, \beta) = \beta_1 X_1 + \beta_2 \ln(X_2) + \frac{\beta_3}{X_3} + \beta_4 X_4^2 \quad (13)$$

اطمینان حاصل نمود. با توجه به شکل (۱۰)، چولگی و کشیدگی خاصی در داده‌ها مشاهده نمی‌شود و تقریب نسبتاً مناسبی حول میانگین خطاها وجود دارد. برای اطمینان از عدم همبستگی متغیرها، نمودار باقیمانده‌ها به شکل (۱۱) ترسیم گردید. این نمودار باید حول صفر تغییر مقدار دهد و روند خاصی در آن قابل مشاهده نباشد تا بین خطاهای مدل همبستگی وجود نداشته باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند خاصی در نمودار مذکور مشاهده نمی‌گردد.

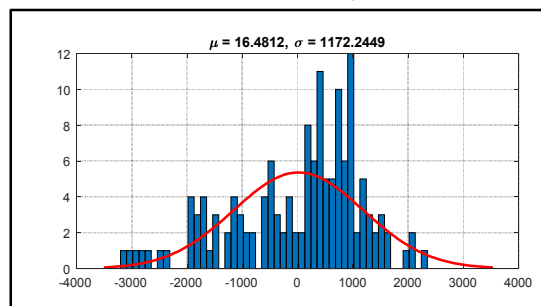
نسل‌های جدید با شرایط مساله سازگارتر باشد. در اعتبار سنجی مدل، فرض می‌شود مدل به شکل رابطه (۱۲) است. بدین ترتیب بین بردار  $y$  به عنوان متغیر وابسته و بردارهای متغیرهای مستقل رابطه‌ای مانند  $f$  با توجه به پارامترهای  $\beta$  وجود دارد.

$$y = f(x, \beta) \quad (12)$$

برعکس روش‌های رگرسیون خطی، برای پیدا کردن پارامترهای تابع غیرخطی  $f$  فرم بسته‌ای وجود ندارد و معمولاً به کمک تکنیک‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی<sup>۲۰</sup>، سعی می‌شود پارامترهای مدل برآورد شود. برای این کار، ضرایب رابطه پیشنهادی به وسیله الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردند. از آنجا که کاهش میانگین خطا همراه با افزایش قابلیت اطمینان مورد توجه است، این کار در قالب یک موضوع بهینه‌سازی چند متغیره با فرض قطعی بودن متغیرها انجام می‌پذیرد. در ابتدا باید از نرمال بودن داده‌ها



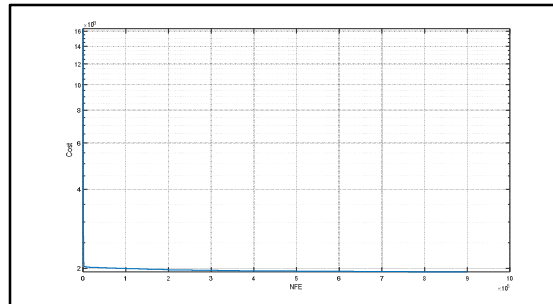
شکل ۱۰. هیستوگرام داده‌ها به همراه منحنی توزیع نرمال



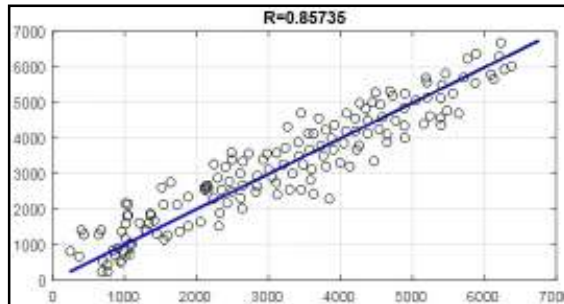
شکل ۱۱. نمودار باقیمانده‌ها

در شکل (۱۳) مقایسه شده‌اند. ضریب همبستگی بالای ۰/۸۵، تاییدکننده اعتبار مدل بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک است.

نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف در هر تکرار کاهش یافته و در نهایت به صفر رسیده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با نتایج حاصل از مدل،



شکل ۱۲. نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک (میزان خطا-تعداد تکرار)



شکل ۱۳. مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی و الگوریتم ژنتیک

قدرت پوشش بیشتر قیر ۱۰۰-۸۵ را میتوان دلیلی بر این اتفاق دانست.

\*مدلسازی تک تک منحنی‌های نیرو-جابجایی قائم نشان داد که با ضریب اطمینان بالایی می‌توان بخش صعودی منحنی مذکور را به شکل یک خط مدل نمود.

\*از بین متغیرهای مورد بررسی، متغیرهای حداکثر نیرو اعمالی هنگام شکست، میزان تغییر شکل در زمان شکست، شیب خط حداکثر نیرو و ضریب زاویه خط برازش داده شده روی منحنی نیرو-جابجایی قائم به عنوان متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر عدد روانی، شناخته شدند.

\*در ادامه مشخص شد که کل سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و سطح زیر منحنی خط با حداکثر نیرو را نمی‌توان در مقدار عدد روانی نمونه آسفالتی، موثر دانست.

\*حداکثر نیرو (نیروی گسیختگی) با ضریب مثبت در مدل وارد شده است. به عبارت دیگر اگر برای تغییر شکل به میزان واحد، نیروی بیشتری لازم است، پس می‌توان انتظار داشت نمونه ساخته شده در مقابل شیارشدگی هم مقاومت بیشتری خواهد داشت.

\*حداکثر تغییر شکل در هنگام گسیختگی با ضریب منفی وارد مدل شده است. هرچه تغییر شکل نمونه بیشتر باشد،

در این پژوهش ضمن تعیین قیر بهینه شانزده ترکیب مورد استفاده، ۱۴۴ نمونه استوانه‌ای آسفالتی با استفاده از مترکم کننده دورانی ساخته شد و آزمایش‌های خزش و کشش غیر مستقیم برای آنها، انجام شد. نتایج بدست آمده را به شرح زیر می‌توان عنوان نمود:

\*مخلوط‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های آهکی، به مراتب قیر بهینه بیشتری نسبت به مخلوط‌های سیلیسی داشتند (به طور متوسط ۰/۷۵ درصد). وجود تخلخل سطحی بیشتر مصالح آهکی را می‌توان در این خصوص موثر دانست. همچنین مشخص شده که قیر بهینه مخلوط‌های ساخته شده از فیلر آهک، به طور میانگین حدود ۰/۲۵ درصد بیشتر از مخلوط‌های مشابهی بود که در ساخت آن‌ها از پودر سنگ به عنوان فیلر استفاده شده بود.

\*مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره پنج، قیر بهینه بیشتری نسبت به دانه‌بندی شماره چهار داشتند. دانه‌بندی ریزتر پنج و سطح بیشتر سنگدانه‌ها در این دانه‌بندی، عامل این افزایش است.

\*تمام مخلوط‌های ساخته شده از قیر ۱۰۰-۸۵ دارای قیر بهینه کمتری (حدود ۰/۲ درصد) نسبت به مخلوط‌های ساخته شده از قیر ۷۰-۶۰ بودند. ویسکوزیته کمتر و

15. Rest Period
16. Contact Stress
17. Deviator Stress
18. Termination
19. Genetic Algorithm
20. Optimization Algorithm

قاعدتاً باید انتظار داشت پتانسیل بروز تغییر شکل‌های ماندگار نیز در آن بیشتر خواهد بود.  
\*شیب خط حداکثر نیرو، با عدد روانی نسبت عکس دارد. به عبارت دیگر نیروی گسیختگی زیاد در کرنش‌های کم، تاثیر بسیار ناچیزی در افزایش عدد روانی دارد.

## ۸- مراجع

- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، مرادی، م. و باباگلی، ر. (۱۳۹۶)، "بررسی آزمایشگاهی اثر افزودنی خاکستر بادی بر عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اصلاح شده پلیمری"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۱، بهار، ص. ۹۶-۱۱۳.

- دیواندری، ح. و سجادی، س.ر. (۱۳۹۶)، "ارزیابی عملکرد آسفالت گرم اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۴، زمستان، ص. ۱۷۵-۱۹۴.

- دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی علی آباد، س.م. و رستمی انکاس، م. (۱۳۹۴)، "ارایه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و پارامترهای مارشال"، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، دوره ۱، شماره ۲، تابستان، ص. ۵۱-۵۴.

- طاهرخانی، ح. و ارشدی، م. ر. (۱۳۹۷)، "مقایسه تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفتالات (PET) بر عملکرد بتن آسفالتی حاوی قیر اصلاح نشده و اصلاح شده با لاستیک ضایعاتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۴، زمستان، ص. ۳۴۷-۳۶۱.

- فائزی، س.ف. و فرخی، ع. (۱۳۹۷)، "تأثیر نانو زایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی مناطق سردسیر (نمونه موردی: شهرستان سقز)"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۴، زمستان، ص. ۱-۱۷.

- فخری، م.، آلاله، م. و ادیسی، ع. (۱۳۹۵)، "ارایه مدل بهینه تعمیر و نگهداری روسازی با در نظر گرفتن

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر ضمن بررسی شانزده ترکیب مختلف آسفالتی پرکاربرد در ایران و انجام آزمایش‌های خزش و کشش غیر مستقیم، مدلی جهت برآورد عدد روانی نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی، ارائه شده است. از این مدل می‌توان برای برآورد و مقایسه پتانسیل شیارشدگی نمونه‌ها در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای آسفالت، استفاده نمود.

## ۶- سپاسگزاری

نگارنده بر خود لازم می‌داند بدینوسیله از ریاست و پرسنل محترم مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) که شرایط ساخت نمونه‌های آسفالتی و انجام آزمایش‌های این پژوهش را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی نماید.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

1. Pavement Repair & Maintenance Cost
2. Hydroplaning
3. Permanent Deformation
4. Work-Hardening
5. Flow Number ( $F_n$ )
6. Indirect Tensile Strength Test (ITS)
7. Tensile Strength Ratio (TSR)
8. Fracture Energy to Failure
9. Total Fracture Energy
10. Fine Aggregate Angularity (FAA)
11. Optimum Bitumen Content (OBC)
12. Gyratory Compactor
13. Australian: AS 2891.12.1
14. Pulse Width

Journal of Pavement Engineering, May 3, pp. 1-9.

- Hussan, S., Kamal, M. A., Hafeez, I., Farooq, D., Ahmad, N., & Khanzada, S., (2019), "Statistical Evaluation of Factors Affecting the Laboratory Rutting Susceptibility of Asphalt Mixtures", International Journal of Pavement Engineering, 20(4), pp. 402-416.

- Irfan, M., Ali, Y., Iqbal, S., Ahmed, S., & Hafeez, I., (2018), "Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures Using Static, Dynamic, and Repeated Creep Load Tests", Arabian Journal for Science and Engineering, 43(10), pp.5143-5155.

- Lv, Q., Huang, W., Sadek, H., Xiao, F., & Yan, C., (2019), "Investigation of the Rutting Performance of Various Modified Asphalt Mixtures Using the Hamburg Wheel-Tracking Device Test and Multiple Stress Creep Recovery Test", Construction and Building Materials, 206, pp.62-70.

- Norouzi, A., Sabouri, M., & Richard Kim, Y. (2017), "Fatigue Life and Endurance Limit Prediction of Asphalt Mixtures Using Energy-Based Failure Criterion", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 990-1003.

- Pitawala, S., Sountharajah, A., Grenfell, J., Bodin, D., & Kodikara, J., (2019), "Experimental Characterisation of Fatigue Damage in Foamed Bitumen Stabilised Materials Using Dissipated Energy Approach", Construction and Building Materials, Vol. 216, pp. 1-10.

- Shanbara, H.K., Ruddock, F. & Atherton, W., (2018), "A Viscoplastic Model for Permanent Deformation Prediction of Reinforced Cold mix Asphalt", Construction and Building Materials, 186, pp. 287-302.

- Suhartono, E., Muhammad, A., Rengananda, B. P., Martono, M., Kusumastuti, D. R., Setiawan, D. B., & Setiaji, N., (2019), "Estimated Cost of Repairing Road Pavement Damage Assessment: A Case Study of Indonesia", International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE), Volume 5, Issue 6 June, pp. 37-49.

- Wang, W., Wang, L., Xiong, H., & Luo, R. (2019), "A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water

هزینه کاربران برای ایران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۳، بهار، ص. ۵۲۳-۵۴۰.

- کی‌منش، م.ر. و فصیحی، ف.، (۱۳۹۳)، "انتخاب گزینه برتر مرمت و نگهداری روسازی راه‌های بین شهری در کاهش هزینه‌های کشور با استفاده از نرم افزار Real Cost (مطالعه موردی: آزاده راه مشهد-باغچه)", هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ۱۷-۱۸ اردیبهشت.

- گلی، ا.، حاجیان فرد، م. و کاظمی، م.ج.، (۱۳۹۶)، "بررسی اثر پلیمر پلی اتیلن سبک بر انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی"، نهمین همایش ملی قیر و آسفالت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۲ تا ۴ آبان.

- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰)، "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، موسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.

- Al-Khateeb, G. G., Al-Suleiman Obaidat, T. I., Khedaywi, T. S., & Elayan, M. S. (2018) "Studying Rutting Performance of Superpave Asphalt Mixtures Using Unconfined Dynamic Creep and Simple Performance Tests", Road Materials and Pavement Design, 19(2), pp. 315-333.

- Do, T. C., Lee, H. J., Baek, C. M., & Nguyen, T. T. (2019), "Mechanical Characteristics of Shear Strength Ratio Used for Moisture Susceptibility Evaluation of Asphalt Mixtures", International Journal of Pavement Engineering, 1-8, DOI: 10.1080/10298436.2019.1614586.

- Gu, X., Zhang, X., & Lv, J. (2018), "Establishment and Verification of Prediction Models of Creep Instability Points of Asphalt Mixtures at High temperatures", Construction and Building Materials, 171, 2018 May 20, pp. 303-311.

- Han, S., Ren, W., Jia, J., Yang, H., & Niu, D., (2018), "Study on Road Performances of Asphalt Mixtures with Granulated Polymer Anti-Rutting Additive", and International



- Zhang, Z., Chen, Z. D., Guo, L. H., Niu, X. F., Xue, P. T., & Zhang, S. J., (2019), "The Mechanical Behavior of Epoxy Asphalt Mixture Under Cyclic Loading", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 504, No. 1, pp. 1-8.

pressure", Construction and Building Materials, 204, pp.631-642.

- Wu, S., Wen, H., Zhang, W., Shen, S., Mohammad, L.N., Faheem, A. & Muhunthan, B., (2019), "Field Performance of Top-Down Fatigue Cracking for Warm Mix Asphalt Pavements", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 20, No.1, pp. 33-43, DOI: 10.1080/10298436.2016.1248204.

# **Presenting the Creep Performance Model of Asphalt Using Force-Displacement Curve and Its Validation by Genetic Algorithm**

*H. Divandari, Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

*E-mail: divandari@iauns.ac.ir*

Received: September 2019-Accepted: December 2019

## **ABSTRACT**

The enormous costs of repairing and maintaining of the existing roads have led to extensive researches in this area. Much of the cost goes to repairing asphalt pavements. On the other hand, the occurrence of permanent deformations in this type of pavement has been recognized as one of the most common causes of the failure of flexible pavements. These deformations are strongly influenced by the creep performance of the asphalt. Understanding and predicting the potential of the occurrence of these deformations in the laboratory phase of specimen fabrication will have a significant impact on reducing pavement repair and maintenance costs. But asphalt creep performance assessment equipment is expensive and out of reach in the current country situation which is under sanctions. In this study, it has been attempted to predict its creep performance by constructing numerous samples of materials commonly used in asphalt pavement construction in Iran and using asphalt stress-strain curve. For this purpose, the force-displacement curve of the Brazilian tensile test was used. This test is done easily and at a low cost with a change in the Marshall Machine jaw. The proposed model shows that by using the parameters of this curve, a proper estimation of creep performance can be obtained. The validity of the mentioned model is confirmed by means of the analysis method of average and also by genetic algorithm.

**Keywords:** Asphalt Creep Performance, Force-Displacement Curve, Brazilian Tensile Test, Genetic Algorithm