

ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال

حسن دیواندری*، استادیار، معاونت مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

امیر مدرس، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

سید مسعود حسینی علی‌آباد، کارشناس ارشد راه و ترابری

مسعود رستمی انکاس، کارشناس ارشد راه و ترابری

E-mail: h_divandari@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۷/۱۵ - پذیرش: ۹۲/۱۲/۰۸

چکیده

شیارشدگی یکی از مهمترین انواع خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر است که سالیانه بخش عمده‌ای از هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها، صرف ترمیم آن می‌گردد. افزایش میزان تغییر شکل‌های ماندگار که خود منجر به افزایش عمق شیار می‌گردد، می‌تواند مشکلات جبران‌ناپذیری را در روسازی ایجاد کند. از سوی دیگر، در روش مارشال، که به عنوان اصلی‌ترین روش طرح اختلاط آسفالت در کشور شناخته می‌شود، فقدان یک آزمایش ساده برای تعیین مقاومت نمونه‌ها در مقابل تغییر شکل دائم کاملاً محسوس است. اگرچه امروزه دستگاه‌های متعددی برای سنجش شیارشدگی استفاده می‌شوند، اما هیچ‌یک قابلیت استفاده وسیع در سطح کارگاهی را ندارند. از طرفی، روش‌های موجود ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اغلب پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند. مجموع موارد ذکرشده، لزوم ارائه روشی ساده که ضمن دارا بودن دقت لازم، بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه‌ی اندک، وضعیت نمونه‌ها را از نظر شیارشدگی در آزمایشگاه مشخص نماید، آشکار می‌سازد. در این مقاله، با ساخت نمونه‌های آسفالتی مارشال با استفاده از سنگدانه‌های آهکی، دو نوع قیر، فیلر پودر سنگ و سه درصد قیر مختلف، یک مدل ریاضی جهت تخمین عمق شیار ناشی از ویل‌تراک ارائه شده است. مدل ارائه شده، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از ترکیب نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال مشخص می‌کند. اعتبار مدل حاصل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با درصد اطمینان مناسبی تأیید شده است. این مدل می‌تواند همزمان با ارائه طرح اختلاط آسفالت در آزمایشگاه، بدون صرف زمان و هزینه اضافی، مقاومت شیارشدگی آسفالت را پیش‌بینی نماید. بدین ترتیب از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای، جلوگیری می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شیارشدگی آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم، پارامترهای مارشال، ویل‌تراک، شبکه عصبی مصنوعی.

۱. مقدمه

بروز خرابی شیارشدگی^۱ می‌گردد (PIARC, ۲۰۰۶). شیارشدگی، اغلب به تغییر شکل‌های دائمی^۲ اطلاق می‌شود که به صورت یک شیار فرورفته در مسیر

امروزه، روسازی‌های آسفالتی به دلیل افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی در راه‌های با ظرفیت بالا، تحت بارگذاری‌های شدید قرار دارند که این عامل منجر به

1- Rutting

2- Permanent Deformation

دلیل، توجه به قابلیت تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی در طرح اختلاط به عنوان یک امر ضروری تلقی می‌گردد (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۷؛ دراکوس، ۲۰۰۳). میزان و بزرگی شیارشدگی به فاکتورهای درونی و بیرونی مختلفی بستگی دارد. عوامل خارجی شامل بار و وسایل نقلیه سنگین، حجم ترافیک و وسایل نقلیه سنگین، فشار تایر، دما، نحوه ساخت و تراکم و عوامل داخلی شامل خصوصیات قیر، مصالح سنگی، خصوصیات مخلوط و ضخامت لایه‌های روسازی می‌باشد (زانیوسکی و همکاران، ۲۰۰۴).

پژوهشگران مختلف از روش‌های متعددی برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، آزمایش خزش دینامیک به طور وسیعی در کشورهای فنلاند، سوئد و استرالیا مورد استفاده قرار گرفته است. در حالی که آزمایش اثر جای چرخ یا ویل تراک (LCPC)^۱ بیشتر در اتریش، فرانسه، مجارستان، رومانی و سوئیس به کار گرفته شده است. دستگاه ویل تراک هامبورگ نیز برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است (زیاری و همکاران، ۲۰۱۳). دستگاه ویل تراک، سیکل‌های بارگذاری چرخ را روی نمونه‌ها اعمال کرده و میزان عمق شیار را پس از ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری در یک دمای معین ثبت می‌کند. اگر چه ویل تراک آزمایش ساده‌ای می‌باشد، اما مدت زمان انجام این آزمایش نسبتاً طولانی است و از طرفی تجهیزات انجام آزمایش چرخ بارگذاری بسیار گران بوده و در نتیجه انجام این آزمایش در مجموع بسیار پرهزینه است. بنابراین، ارائه روشی برای تعیین مقاومت برشی مخلوط‌های آسفالتی در مدت زمان کوتاه و با تجهیزات ارزان، ضروری می‌باشد (زیاری و همکاران، ۲۰۱۲).

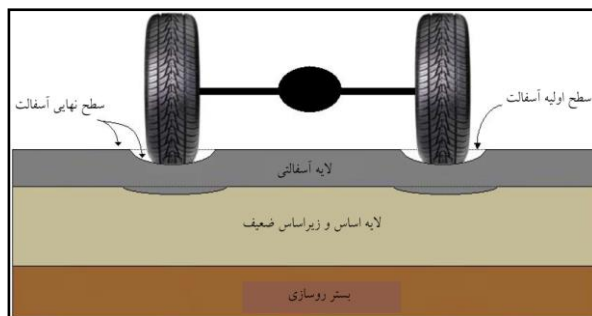
چرخ‌های وسایل نقلیه به موازات محور طولی، همراه با برآمدگی کوچکی در کناره‌ی مسیر چرخ‌ها، نمایان می‌شود. بروز چنین خرابی در آسفالت عمر خدمت دهی روسازی را کاهش داده و با تحت تأثیر قرار دادن عوامل کنترل وسایل نقلیه، خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند (TRI، ۲۰۰۹). به طور کلی، سه مکانیزم متفاوت باعث شیارشدگی آسفالت می‌شود. استفاده از زنجیر چرخ و لاستیک‌های دارای گل-میخ، به ویژه در فصل زمستان، باعث به وجود آمدن شیارشدگی سطحی یا سایشی می‌گردد (Onyango، ۲۰۰۹). مکانیزم دوم ناشی از تحکیم روسازی است که معمولاً در اوایل عمر روسازی رخ می‌دهد (پاردهان، ۱۹۹۵). این نوع شیارشدگی می‌تواند در اثر زهکشی زیرسطحی ضعیف و تراکم ناکافی هر یک از لایه‌های بستر، زیر اساس و اساس به وجود آید. به عبارت دیگر، این خرابی زمانی به وجود می‌آید که مقدار تنش‌های قائم حاصل از بارگذاری ترافیکی از مقاومت فشاری لایه‌ها تجاوز نماید (دراکوس، ۲۰۰۳). این نوع شیار که تحت عنوان شیارشدگی سازه‌ای شناخته می‌شود، باعث تغییر شکل آسفالت در حجم ثابت می‌گردد. نیمرخ این نوع شیار V شکل بوده و در کنار محل گودی شیار، برآمدگی دیده نمی‌شود (شکل ۱) (سانتوسی، ۲۰۰۰). مکانیزم سوم به وجود آمدن شیار، تغییر شکل‌های پلاستیک یا خمیری آسفالت است. اگر تنش‌های برشی اعمال شده از مقاومت برشی آسفالت بیشتر باشد، تغییر شکل دائمی آسفالت در حجم ثابت اتفاق می‌افتد. نیمرخ این نوع خرابی به شکل M بوده و در دو طرف محل شیار، برآمدگی‌هایی به وجود می‌آید (شکل ۲) (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲). این خرابی که ناشی از ضعف برشی لایه آسفالتی است، تحت عنوان شیارشدگی ناپایداری یا روانی شناخته می‌شود (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۵). در میان لایه‌های مختلف سهیم در شیارشدگی، تغییر مکان دائمی در لایه‌ی رویه روسازی، بخش عمده‌ای از شیارشدگی را به خود اختصاص می‌دهد (فخری و همکاران، ۱۳۸۹). به همین

1- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Wheel Tracker

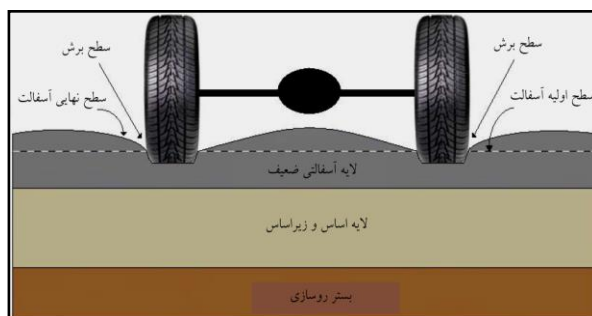
اصلی‌ترین روش طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی در ایران شناخته می‌شود، فقدان یک آزمایش ساده برای تعیین مقاومت نمونه‌ها در مقابل بروز تغییر شکل‌های دائم، که علت اصلی به وجود آمدن شیار در روسازی آسفالتی می‌باشد، کاملاً محسوس است (زیاری و همکاران، ۲۰۱۲). اگرچه امروزه دستگاه‌های متعددی برای سنجش شیارشدگی به کار گرفته شده‌اند، اما هیچ‌کدام دارای قابلیت‌های کارگاهی مناسبی برای استفاده نیستند. همچنین، روش‌های موجود ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اغلب پرهزینه بوده، انجام آنها مستلزم صرف زمان زیادی است و انجام همیشگی آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد. مجموع موارد ذکرشده، لزوم ارائه روشی ساده که ضمن دارا بودن دقت لازم، بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه‌ی اندک، وضعیت نمونه‌ها را از نظر شیارشدگی در آزمایشگاه مشخص نماید، آشکار می‌سازد.

۳. پیشینه تحقیق

فقدان یک آزمایش ساده برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، مراکز معتبر تحقیقاتی جهان از جمله NCHRP^۱، اداره فدرال بزرگراه‌ها (FHWA)^۴ و سازمان بزرگراه‌های ایالتی^۵ را به حمایت از پروژه‌هایی با اهداف توسعه‌ی روش آزمایش‌ها و به ویژه توسعه‌ی یک آزمایش اجرایی ساده برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، برانگیخت (ویتزاک و همکاران، ۲۰۰۲؛ مک‌گاری و همکاران، ۲۰۱۰). چندین پروژه توسط NCHRP به منظور مطالعه در رابطه با توسعه‌ی یک آزمایش عملکردی ساده برای ارزیابی تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آغاز شد. یکی از این پروژه‌ها، پروژه NCHRP 9-16 بود که به بررسی استفاده از



شکل ۱. شیارشدگی ناشی از ضعف بستر یا تحکیم لایه‌های (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲)



شکل ۲. شیارشدگی ناشی از ضعف مقاومت برشی لایه زیرین آسفالتی (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲)

۲. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

افزایش وسعت و شدت تغییر شکل‌های دائم در سال‌های اخیر، نگرانی‌هایی را در ارتباط با اثر این نوع خرابی بر 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 (آب-پیمایی)^۱ در شیار جای چرخ، افزایش می‌دهد (فوا و همکاران، ۲۰۱۲). بعلاوه، این پدیده سبب ایجاد قیرزدگی^۲ نیز می‌شود که طی آن قیر به سطح روسازی آمده و با کاهش اصطکاک، بستر مناسبی برای بروز حوادث رانندگی را مهیا می‌سازد. تأثیر دیگر شیارشدگی، کاهش ضخامت روسازی است که باعث افزایش احتمال شکست روسازی بر اثر ترک‌های خستگی می‌گردد (عامری و همکاران، ۱۳۸۹؛ باهوگونا، ۲۰۰۳). از سوی دیگر، در روش طرح اختلاط مارشال که به عنوان

3- National Cooperative Highway Research Program

4- Federal Highway Administration

5- State Highway Agencies

1- Hydroplaning

2- Bleeding

(IDT)، درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)^{۱۳} و شیب تراکم دورانی (K)، پتانسیل شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی را پیش‌بینی کنند. در این پژوهش، مقاومت کششی غیرمستقیم نماد چسبندگی و پارامتر شیب تراکم شاخص زاویه‌ی اصطکاک داخلی^{۱۴} مخلوط‌های آسفالتی بودند. در ادامه پژوهش‌های اندرسون و همکاران، در رابطه با ارزیابی شیارشدگی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی، در سال ۲۰۰۴ پژوهشی مشابه با اصول و روش‌های اندرسون، اما با کمی اختلاف، توسط زانیوسکی و سرینی‌واسان (۲۰۰۴) صورت پذیرفت. این تحقیق بر این فرض استوار بود که پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی که توسط دستگاه تحلیل‌گر روسازی‌های آسفالتی (APA)^{۱۵} اندازه‌گیری می‌شود به سه پارامتر شیب تراکم (K)، مقاومت کششی غیرمستقیم (IDT) و درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)، وابسته می‌باشد. تفاوت اصلی این پژوهش‌ها، تجهیزات و دستگاه‌های بکار برده شده در آنها برای ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است. اندرسون برای ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی از دستگاه بارگذاری برشی تکراری در ارتفاع ثابت (RSCH)^{۱۶} استفاده کرد، اما در تحقیقات اخیر، از تحلیل‌گر روسازی آسفالتی استفاده شده است.

۴. اهداف و فرضیات تحقیق

۴-۱. اهداف تحقیق

هر چند مطالعات اندرسون و همکاران در سال ۲۰۰۳ منجر به ارائه روشی ساده جهت ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گردید، اما ابزار و تجهیزاتی که توسط آنها به‌کار گرفته شد، در مقیاس کارگاهی، به ویژه در شرایط امروز ایران، قابل استفاده نیستند. هدف اصلی این پژوهش بررسی قابلیت ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش مقاومت کششی

خواص متراکم‌کننده‌ی دورانی سوپریپو (SGC)^۱ در طول فرایند تراکم می‌پرداخت. فرضیه‌ی این پژوهش بر این اصل استوار بود که برخی از خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در طول فرایند تراکم توسط متراکم‌کننده‌ی دورانی سوپریپو با مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارتباط دارند. در این پژوهش، این نتیجه حاصل شد که برخی از خواص مخلوط آسفالتی در طول تراکم ژیراتوری، همانند شیب تراکم (k)^۲، با بعضی از ویژگی‌های مصالح سنگی، مانند دانه‌بندی^۳، شکل و بافت سطحی دانه‌ها^۴ و زاویه‌دار بودن مصالح سنگی^۵، مرتبط بوده اما هیچ‌گونه ارتباطی با خصوصیات قیر مانند میزان قیر^۶ و نوع قیر (میزان سختی قیر)^۷ ندارند (اندرسون، ۲۰۰۲). در یک پژوهش دیگر، مؤسسه‌ی حمل‌ونقل پنسیلوانیا (PTI)^۸ و مؤسسه‌ی فناوری پیشرفته آسفالت (AAT)^۹ نشان دادند که در تئوری مور-کولومب^{۱۰}، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)^{۱۱} مخلوط‌های آسفالتی با چسبندگی^{۱۲} مرتبط بوده و در نتیجه طبق رابطه (۱) با شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی رابطه دارد (اندرسون و همکاران، ۲۰۰۳).

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c \quad (1)$$

که در آن τ تنش برشی، σ تنش قائم، c پارامتر گسیختگی چسبندگی و ϕ پارامتر گسیختگی زاویه‌ی اصطکاک داخلی می‌باشد.

در راستای این مطالعات، اندرسون (۲۰۰۲) توانست با به‌کارگیری تئوری مور-کولومب، شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی کند. همچنین، اندرسون و همکاران (۲۰۰۳) توانستند با استفاده از مقاومت کششی غیرمستقیم

- 1- Superpave gyratory compactor
- 2- Compaction slope
- 3- Gradation
- 4- Particle shape/texture
- 5- Aggregate angularity
- 6- Asphalt binder content
- 7- Binder grade (stiffness)
- 8- Pennsylvania Transportation Institute
- 9- Advanced asphalt technologies
- 10 - Mohr-Coulomb theory
- 11 - Indirect tensile strength
- 12 - Cohesion

- 13 - Void in mineral aggregate
- 14- Angle of internal friction
- 15- Asphalt pavement analyze
- 16- Repeated shear testing at constant height

۱-۵. دانه‌بندی مصالح سنگی

از میان دانه‌بندی‌های مختلف پیشنهادی نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰)، به عنوان مرجع اصلی طرح روسازی‌های آسفالتی در ایران، حد وسط دانه‌بندی شماره ۴، برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این تحقیق انتخاب گردید. منحنی حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ به همراه حدود بالا و پایین آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۵. تهیه مصالح مصرفی

مصالح به‌کار رفته در این تحقیق شامل: یک نوع مصالح سنگی، دو نوع قیر و یک نوع فیلر می‌باشد. سنگدانه‌های مصرفی از نوع آهکی بوده که از مصالح مصرفی در پروژه‌ی روسازی منطقه ۴ آزادراه تهران- شمال بدین منظور استفاده شد. این مصالح در اندازه‌های مختلف ماسه (۰-۶ میلی‌متر)، شن ریز (۱۲-۶ میلی‌متر)، و شن متوسط (۱۲-۱۹ میلی‌متر) نمونه‌گیری شده است.

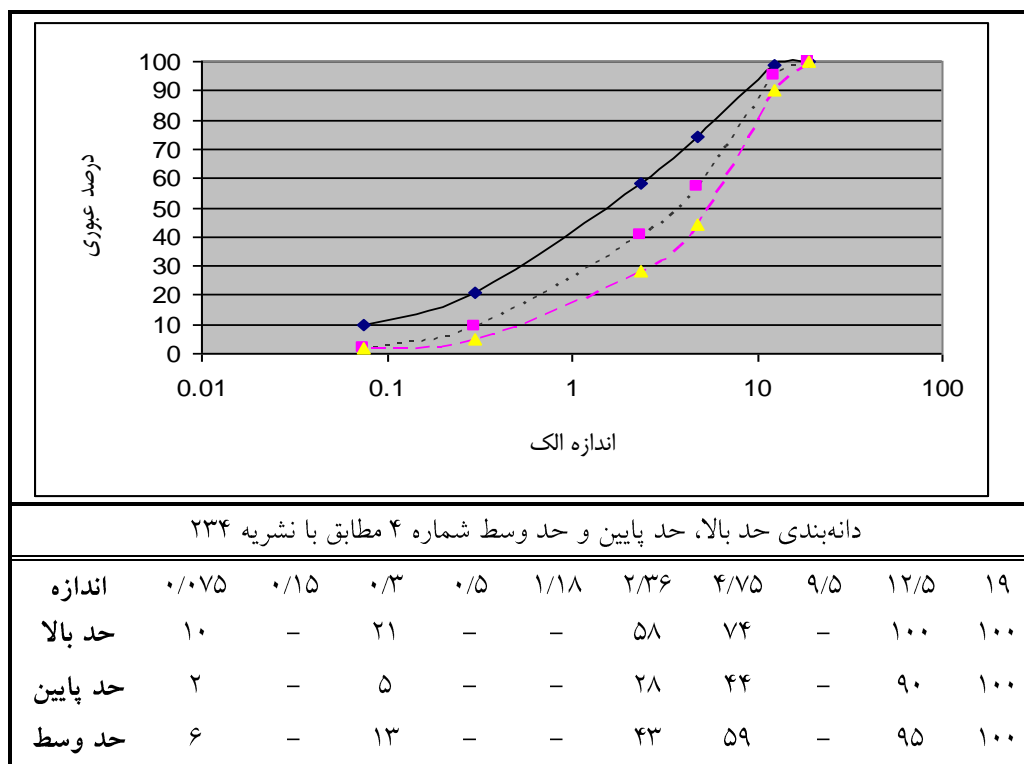
غیرمستقیم و بسط تحقیقات اندرسون در قالب آزمایش‌های ساده‌تر و با قابلیت دسترسی بیشتر در کشور بوده که می‌تواند معیاری ساده برای کنترل شیارشدگی، در طی مراحل طراحی مخلوط‌های آسفالتی باشد.

۲-۴. فرضیات و متغیرهای تحقیق

علاوه بر فرضیات عمومی که در جای خود به آنها پرداخته خواهد شد، فرض اصلی آن است که ترکیب نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال می‌تواند معیار مناسبی جهت ارزیابی شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی باشد. همچنین، دو متغیر نوع قیر و درصد‌های مختلف قیر، به منظور افزایش بازه‌ی نتایج این پژوهش در نظر گرفته شد.

۵. روش تحقیق

در این تحقیق سعی شده است انتخاب مصالح، دانه‌بندی، قیر و فیلر به گونه‌ای انجام گیرد که نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه، حتی‌الامکان مشابه طیف وسیع آسفالت گرم کارخانه‌ای در ایران باشد.



شکل ۳. منحنی حد وسط دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰)

شده در خصوص مصالح سنگی و قیرهای مصرفی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

۳-۵. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

طرح اختلاط و ساخت نمونه‌های آسفالتی این پژوهش بر اساس روش مارشال و طبق استاندارد ASTM-D1559 انجام شد. عمل تراکم نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیز توسط چکش مارشال و با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه صورت پذیرفت.

قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ محصول پالایشگاه پاسارگاد تهران و قیر با درجه نفوذ ۸۵-۱۰۰ محصول پالایشگاه تبریز، قیرهای مصرفی در این پژوهش هستند. ضمن این که از پودر سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ به عنوان فیلر استفاده شده است. با انجام آزمایش‌های مصالح سنگی، قیر و فیلر اطمینان حاصل شد که شرایط مورد نیاز هر یک طبق آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، برآورده می‌گردد. نتایج آزمایش‌های انجام

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی

مقدار مجاز آیین‌نامه برای لایه رویه	نتایج آزمایش	استاندارد روش آزمایش		آزمایش‌های مصالح سنگی
حداکثر ۳۰٪	۱۷٪	ASTM-C131	AASHTO-T96	درصد سایش به روش لوس‌آنجلس ^۱
-	۹٪	ASTM-D4791	BS-812	درصد تطویل ^۲
حداکثر ۲۵٪	۲۲٪	ASTM-D4791	BS-812	درصد تورق ^۳
حداقل ۹۰٪	۹۳٪	ASTM-D5821	BS-812	درصد شکستگی در دو جبهه ^۴
حداکثر ۸٪	۰/۴٪	ASTM-C88	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم ^۵

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های قیر

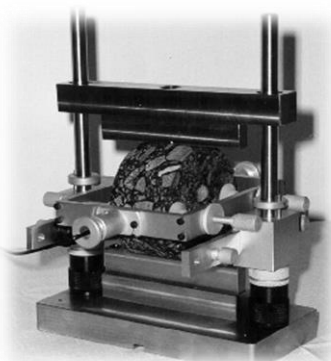
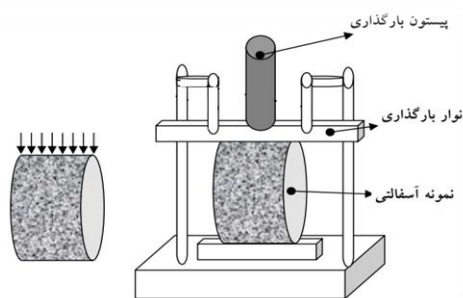
حدود مجاز قیر ۸۵-۱۰۰		نتایج قیر ۸۵-۱۰۰	حدود مجاز قیر ۶۰-۷۰		نتایج قیر ۶۰-۷۰	استاندارد آزمایش		آزمایش‌های قیر
حداقل	حداکثر		حداقل	حداکثر		ASTM	AASHTO	
-	-	۱/۰۱۱	-	-	۱/۰۱۷	D70	T228	وزن مخصوص قیر ^۶ (gr/cm ³)
۱۰۰	۸۵	۸۵	۷۰	۶۰	۶۰	D5	T49	درجه نفوذ قیر ^۷ (0.1mm)
۵۲	۴۵	۴۷/۶	۵۶	۴۹	۵۳	D36	T53	نقطه نرمی قیر ^۸ (°C)
-	۱۰۰	+۱۰۰	-	۱۰۰	+۱۰۰	D113	T51	میزان کشش‌پذیری قیر ^۹ (cm)
-	۲۳۲	۳۰۴	-	۲۳۲	۳۰۰	D92	T48	درجه اشتعال قیر ^{۱۰} (°C)
-	-	۲۶۰	-	-	۳۳۶	D88	T72	کندروانی قیر ^{۱۱} (sec)
-	۹۹	۹۹/۷۶	-	۹۹	۹۹/۶	D2042	T44	حلالیت قیر ^{۱۲} (%)
۱	-	۰/۰۷	۰/۸	-	-۰/۰۳	D1754	T179	افت وزنی قیر در اثر حرارت ^{۱۳} (%)

- 1- Los Angeles abrasion test
- 2- Elongation
- 3- Flakiness
- 4- Percentage of fractured particles
- 5- Soundness of aggregates by use of sodium sulfate
- 6- Density of bitumen
- 7- Penetration of bitumen
- 8- Softening point of bitumen
- 9- Ductility of bitumen
- 10- Flash point of bitumen
- 11- Viscosity of bitumen
- 12- Solubility of bitumen
- 13- Loosen heating of bitumen (Thin film over test)

حسب میلی‌متر پس از ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۶. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی است. همچنین، این آزمایش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی نیز استفاده می‌شود. نحوه‌ی انجام آزمایش در دستورالعمل ASTM-D4321 آورده شده است. برای سنجش مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی از دستگاه جک مارشال به همراه قالب بارگذاری اصلاح‌شده استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، بارگذاری به صورت خطی بر ارتفاع نمونه‌ها اعمال می‌گردد. همچنین سرعت بارگذاری در این آزمایش ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.



شکل ۴. قاب بارگذاری و چگونگی اعمال بار بر نمونه آسفالتی در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (دیواندری، ۱۳۹۱)

۳-۶. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها

نتایج آزمایش‌های مارشال (مقاومت و روانی)، مقاومت کششی غیرمستقیم و اثر جای چرخ در جدول ۳ ارائه شده است.

۵-۴. تعیین درصد قیر بهینه

با توجه به این که در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از دو نوع قیر ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ و حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ استفاده شده است، بنابراین پژوهش مذکور دارای دو نوع ترکیب مخلوط آسفالتی می‌باشد:

الف) مخلوط نوع اول: با دانه‌بندی حد وسط شماره ۴ و قیر ۷۰-۶۰

ب) مخلوط نوع دوم: با دانه‌بندی حد وسط شماره ۴ و قیر ۱۰۰-۸۵

برای هر یک از ترکیب‌ها، سه گروه مخلوط آسفالتی با درصد‌های قیر ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ ساخته شد و در مجموع جهت تعیین قیر بهینه‌ی ترکیب‌ها، ۳۶ نمونه‌ی استوانه‌ای آسفالت ساخته شد. پس از طی این مراحل، درصد قیر بهینه‌ی دو ترکیب به کمک منحنی‌های مارشال تعیین گردید. در نهایت، میزان قیر بهینه برای ترکیب اول، ۵/۵٪ و برای ترکیب دوم ۵/۳٪ حاصل گردید.

۵-۵. ساخت نمونه‌های اصلی

جهت انجام آزمایش‌ها با توجه به متغیرهای این پژوهش، ۵۴ نمونه با درصد قیر بهینه، ۵/۵٪ بیشتر و ۵/۵٪ کمتر از درصد قیر بهینه ساخته شده است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان نتایج، برای هر یک از شرایط مشابه، سه نمونه ساخته شده است. جهت ارزیابی عملکرد این نمونه‌های آسفالتی از سه آزمایش اصلی مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و اثر جای چرخ استفاده شد. با توجه به متغیرهای موجود، ۹۰ نمونه‌ی آسفالتی با درصد قیر بهینه، ۵/۵٪ بیشتر و ۵/۵٪ کمتر از درصد قیر بهینه ساخته شده است.

۶. انجام آزمایش‌ها و نتایج مربوطه

۱-۶. آزمایش اثر جای چرخ

آزمایش اثر جای چرخ یا ویل‌تراک به طور مستقیم برای اندازه‌گیری شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مترکم شده انجام می‌شود. نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده با چکش مارشال یا مترکم کننده چرخشی زیر چرخ بارگذاری با قابلیت اعمال فشار ۷۰۰ کیلوپاسکال قرار می‌گیرد. دمای انجام این آزمایش ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت بارگذاری آن ۶۰ بار در دقیقه است. میزان عمق شیار بر

ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های اصلی پژوهش

ترکیب مخلوط آسفالتی نوع دوم			ترکیب مخلوط آسفالتی نوع اول			انواع ترکیب‌ها			
٪۵/۸	٪۵/۳(OBC)	٪۴/۸	٪۶	٪۵/۵(OBC)	٪۵	درصد قیر			
٪۰/۵	۰	-٪۰/۵	٪۰/۵	۰	-٪۰/۵	مقدار اختلاف با درصد قیر بهینه			
نتایج پارامترهای مارشال						شماره	واحد	نماد	پارامترهای خروجی
۱۳/۷۴۳	۱۳/۸۸۹	۱۱/۸۲۲	۱۳/۷۴۳	۱۴/۷۹۳	۱۳/۶۳۴	۱			
۱۳/۶۴۱	۱۳/۶۸۸	۱۲/۲۷۱	۱۳/۰۱۲	۱۴/۶۴۹	۱۳/۷۸۸	۲	Kn	S _m	متوسط مقاومت مارشال
۱۳/۵۸۰	۱۴/۴۱۷	۱۱/۸۸۷	۱۳/۶۵۰	۱۴/۶۷۲	۱۳/۸۰۵	۳			
۱۳/۶۵۴	۱۳/۹۹۸	۱۱/۹۹۳	۱۳/۴۶۸	۱۴/۷۰۴	۱۳/۷۴۲	میانگین			
۳/۸	۳/۱	۳	۳/۸	۳/۴	۳/۴	۱	mm	F	متوسط روانی مارشال
۳/۶	۳/۲	۲/۸	۴	۳/۴	۳/۲	۲			
۳/۷	۳/۳	۳/۲	۳/۹	۳/۴	۳	۳			
۳/۷	۳/۲	۳/۰	۳/۹	۳/۴	۳/۲	میانگین			
۳/۶۲	۴/۴۸	۳/۹۴	۳/۶۲	۴/۳۵	۴/۰۱	۱	Kn/mm	S _m /F	نسبت مارشال
۳/۷۹	۴/۲۸	۴/۳۸	۳/۲۵	۴/۳۰	۴/۳۰	۲			
۳/۶۷	۴/۳۷	۳/۷۱	۳/۵۰	۴/۳۱	۴/۶۰	۳			
۳/۶۹	۴/۳۸	۴/۰۱	۳/۴۶	۴/۳۲	۴/۳۰	میانگین			
۳/۱۲	۴/۰۶	۵/۰۹	۳/۰۳	۴/۴۸	۴/۹۶	۱	%	V _a	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی
۳/۱۴	۳/۹۵	۵/۱۳	۲/۹۸	۴/۶۶	۵/۰۸	۲			
۳/۱۳	۳/۹۶	۴/۹۳	۲/۸۶	۴/۵۵	۵/۱۷	۳			
۳/۱۳	۳/۹۹	۵/۰۵	۲/۹۶	۴/۵۷	۵/۰۷	میانگین			
۱۳/۱۵	۱۳/۱۹	۱۳/۳۰	۱۳/۴۸	۱۲/۹۹	۱۳/۲۳	۱	%	VMA	درصد فضای خالی مصالح سنگی
۱۳/۳۶	۱۳/۰۶	۱۳/۴۲	۱۳/۵۶	۱۳/۱۰	۱۳/۲۸	۲			
۱۳/۲۷	۱۳/۲۶	۱۳/۱۸	۱۳/۴۰	۱۳/۰۰	۱۳/۱۲	۳			
۱۳/۲۶	۱۳/۱۷	۱۳/۳۰	۱۳/۴۸	۱۳/۰۳	۱۳/۲۱	میانگین			
۷۶/۲۷	۶۹/۲۲	۶۱/۷۳	۷۷/۵۲	۶۵/۵۱	۶۲/۵۱	۱	%	VFA	درصد فضای خالی پرشده با قیر
۷۶/۵۰	۶۹/۷۵	۶۱/۷۷	۷۸/۰۲	۶۴/۴۳	۶۱/۷۵	۲			
۷۶/۴۱	۷۰/۱۳	۶۲/۵۹	۷۸/۶۵	۶۵/۰۰	۶۰/۵۹	۳			
۷۶/۴۰	۶۹/۷۰	۶۲/۰۳	۷۸/۰۴	۶۴/۹۳	۶۱/۶۲	میانگین			
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم									
۷۸۸۷۰	۹۹۵/۳۸	۶۹۹/۰۰	۱۲۳۶/۰۰	۱۰۰۹/۹۵	۸۸۸/۳۳	۱	Kpa	S _t	مقاومت کششی
۸۰۷/۶۵	۹۸۰/۷۸	۶۵۶/۳۱	۱۲۹۳/۱۳	۱۰۵۳/۴۰	۸۲۹/۲۰	۲			
۷۹۸/۸۵	۱۰۰۸/۰۰	۶۲۸/۴۴	۱۲۳۸/۱۲	۱۰۵۶/۰۵	۸۵۶/۴۷	۳			
۷۹۸/۴۰	۹۹۴/۷۲	۶۶۱/۲۵	۱۲۵۵/۷۵	۱۰۳۹/۸۰	۸۵۸/۰۰	میانگین			
۳/۱۰	۲/۸۵	۲/۷۲	۲/۹۴	۲/۶۴	۲/۶۱	۱	mm	D _v	تغییر شکل قائم
۳/۱۹	۲/۸۳	۲/۶۷	۳/۱۲	۲/۶۹	۲/۴۰	۲			
۳/۱۶	۲/۹۶	۲/۶۲	۲/۹۴	۲/۷۴	۲/۴۹	۳			
۳/۱۵	۲/۸۸	۲/۶۷	۳/۰۰	۲/۶۹	۲/۵۰	میانگین			
نتایج آزمایش اثر جای چرخ									
۵/۶۶	۱/۹۷	۰/۹۵	۵/۰۷	۲/۶۹	۲/۵۱	۱	mm	R _d	عمق شیار
۸/۹۰	۳/۶۵	۲/۰۷	۶/۷۰	۳/۵۶	۲/۳۷	۲			
۳/۶۰	۲/۲۲	۲/۰۹	۴/۴۴	۴/۴۳	۳/۳۷	۳			
۶/۰۵	۲/۶۱	۱/۷۰	۵/۴۰	۳/۵۶	۲/۷۵	میانگین			

۷. ارائه مدل آزمایشگاهی

$$\begin{cases} H_0 & : & R = 0 \\ H_1 & : & R \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

۷-۱. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SPSS.20

هدف، رد فرض H_0 می‌باشد که اعتبار آن با ضریبی تحت عنوان Sig. F change سنجیده می‌شود. به هر میزان که مقدار این ضریب کمتر باشد، سطح معناداری ضریب (R^2) و مدل ارائه شده بیشتر خواهد بود. در این مقاله، جهت مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار SPSS.20 استفاده شده است. نتایج حاصل از آنالیز آماری داده‌ها در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. در نهایت، با توجه به جدول ۶، مدل نهایی به صورت رابطه (۳) تعیین گردید. آنالیز واریانس برای مدل نهایی در جدول ۷ ارائه شده است.

رگرسیون، ارائه رابطه یا تابعی ریاضی است که بین متغیر وابسته (پاسخ) که با Y نشان داده می‌شود از یک سو و متغیرهای مستقل (پیش‌گو) که با X نشان داده می‌شوند، برقرار می‌شود. میزان همبستگی بین نتایج، حدود یا مقدار برآورد رگرسیون را تعیین می‌کند. ضریب همبستگی (R)، میزان ارتباط بین دو متغیر را بیان می‌کند. در رگرسیون دو فرض H_0 و H_1 به شکل رابطه (۲) تعریف می‌شوند. فرض H_1 بیانگر این مطلب است که یک ارتباط علیتی بین دو متغیر وجود دارد، به شکلی که میزان یکی (متغیر مستقل) تا حدودی تعیین‌کننده (متغیر وابسته) است. فرض H_0 بر مبنای عدم وجود هرگونه ارتباطی بین دو متغیر استوار است.

جدول ۴. خلاصه آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

انحراف استاندارد	میانه	حداکثر	حداقل	تعداد	پارامترهای مورد بررسی
۱/۴۵۸۷۱	۳/۵۴۱۷	۸/۹۰	۰/۹۵	۲۴	R_d (Rut Depth)
۱/۱۹۲۵	۱۴/۳۶۰۳	۱۷/۳۰۳	۱۱/۸۲۲	۲۴	Sm
۱۷۹/۵۸۰۶۲	۱۱۰۶/۶۷۵۰	۱۴۲۳/۶۸	۶۲۸/۴۴	۲۴	St
۰/۲۴۴۵۱	۲/۶۵۲۵	۳/۱۹	۲/۳۶	۲۴	Dv

جدول ۵. خلاصه مشخصات آماری مدل (خروجی نرم‌افزار SPSS. 20)

دوربین-واتسون	انحراف از معیار	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل
۱/۶۷۷	۰/۴۶۹۵۳	۰/۸۹۶	۰/۹۲۵	۰/۹۶۲	۱

جدول ۶. ضرایب پارامترهای مستقل مدل

مدل و پارامترهای مستقل	ضریب اطمینان ۹۵٪		ضریب استاندارد شده	پارامتر t	پارامتر sig.	ضرایب غیراستاندارد شده	
	کران بالا	کران پایین				انحراف از معیار	ضریب هر پارامتر مستقل
Constant	۹/۹۵۷	-۴/۴۸۳	-	۰/۸۷۴	۰/۴۰۷	۳/۱۳۱	۲/۷۳۷
D_v	۴/۵۹۳	-۱/۳۰۸	۰/۴۹۵	۴/۱۴۳	/۰۰۳	۰/۷۱۲	۲/۹۵۱
S_m	-۰/۳۸۵	-۱/۰۸۷	-۰/۶۰۲	-۴/۸۳۵	۰/۰۰۱	۰/۱۵۲	-۰/۷۳۶
S_t	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۳۹۰	۳/۳۴۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳

جدول ۷. آنالیز واریانس مدل

سطح معناداری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۰۰	۳۲/۷۲۴	۷/۲۱۴	۳	۲۱/۶۴۳	رگرسیون
-	-	۰/۲۲۰	۸	۱/۷۶۴	باقی مانده
-	-	-	۱۱	۲۳/۴۰۶	مجموع

می‌شود تا خروجی نرون مطابق خروجی مطلوب باشد. تعیین w و b برای کل شبکه، تحت عنوان آموزش شبکه شناخته می‌شود. در طول آموزش، خروجی شبکه با مشاهدات واقعی مقایسه می‌شود و میزان خطا محاسبه می‌شود (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲). بر اساس میزان این خطا، ضرایب اصلاح می‌شوند. با توجه به رابطه (۴)، هرچه میزان مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) ^۱ به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل در برآورد داده‌ها کمتر می‌باشد. الگوریتم عملکرد شبکه عصبی در شکل ۶ نشان داده شده است. مدل نهایی در این پژوهش دارای سه متغیر مستقل و یک متغیر وابسته می‌باشد و هدف از اعتبارسنجی مدل ارائه شده، تعیین متغیرهای مستقل به گونه‌ای است که کمترین تفاوت بین مقدار واقعی متغیر وابسته با مقدار تخمین زده شده متغیر توسط مدل، وجود داشته باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

در این پژوهش، از نرم‌افزار MATLAB (۲۰۱۳) برای کد نویسی شبکه عصبی استفاده شد. حدود ۷۰٪ داده‌ها پس از نرمال‌سازی توسط رابطه (۵) جهت آموزش شبکه استفاده شد و سایر داده‌ها برای مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند.

$$X_n = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad 0 \leq X_n \leq 1 \quad (5)$$

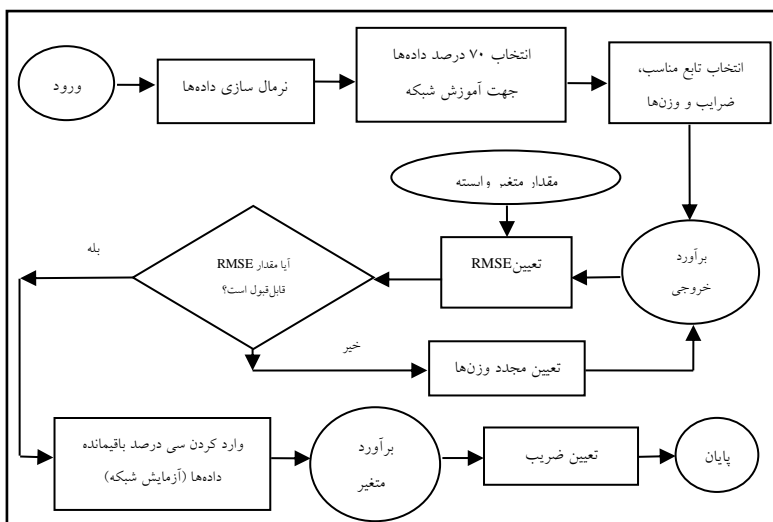
$$R_d \text{ (mm)} = 2.951 D_v - 0.736 S_m + 0.003 S_t + 2.737 \quad (3)$$

که R_d عمق شیار به دست آمده از آزمایش اثر جای چرخ، بر حسب میلی‌متر، D_v تغییر شکل قائم به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، بر حسب میلی‌متر، S_m مقاومت مارشال به دست آمده از آزمایش مارشال، بر حسب کیلونیوتن و S_t مقاومت کششی غیرمستقیم حاصل شده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، بر حسب کیلوپاسکال، می‌باشد. همان طور که در جدول ۵ مشخص شده، R محاسبه شده برای مدل نهایی برابر با ۰/۹۶۲ است و در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار می‌باشد.

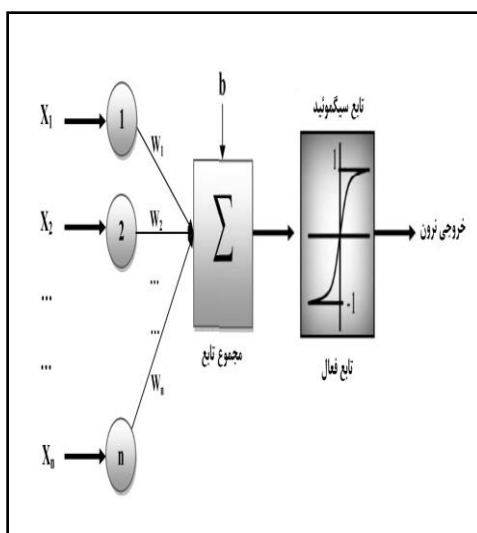
۷-۲. اعتبارسنجی مدل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

امروزه از شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور گسترده و تقریباً در تمام علوم استفاده می‌شود. در سیستم عصبی، نرون (سلول عصبی) به عنوان اصلی‌ترین عنصر پردازش شناخته شده است. نرون‌ها در گروه‌هایی به صورت لایه طبقه‌بندی می‌شوند. عموماً دو لایه برای ارتباط با خارج از شبکه وجود دارد که یکی از آنها به نام لایه ورودی و دیگری به نام لایه خروجی است. سایر لایه‌هایی که معمولاً در بین این دو بخش قرار دارند، به نام لایه‌های مخفی مشهورند. تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه به ترتیب بستگی به تعداد متغیرهای مستقل و وابسته مورد نظر دارند. شکل ۵، ساختار یک نرون از شبکه عصبی را نشان می‌دهد. پارامترهای w و b قابل تنظیم می‌باشند و نوع f توسط طراح به شکلی انتخاب

1- Root mean square error (RMSE)



شکل ۵. نمایی از ساختار یک عصب مصنوعی (میرزا حسینی و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۶. الگوریتم عملکرد شبکه عصبی مصنوعی (دیواندری، ۱۳۹۱)

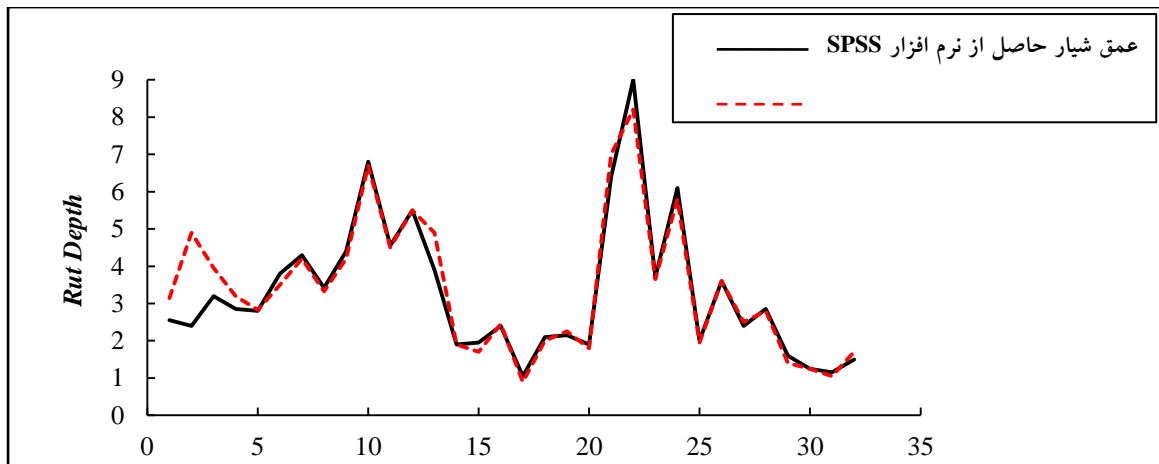
۳-۷. نتایج حاصل از آنالیز مدل با شبکه عصبی

در این پژوهش، با در نظر گرفتن سه نرون در لایه ورودی، یک نرون در لایه خارجی و تعداد ۳۰ نرون در لایه مخفی، اعتبارسنجی مدل انجام شد. نتایج این اعتبارسنجی مطابق

جدول ۸ و شکل ۷ حاصل شد. مطابق با این جدول در مرحله صحت‌سنجی، در بهترین ساختار $R^2 = 0/9835$ تعیین گردید.

جدول ۸. نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی برای اعتبارسنجی مدل عمق شیار

مرحله آزمایش	مرحله آموزش		شاخص شبکه	تعداد نرون‌ها در هر لایه		
	RMSE	R^2		لایه خروجی	لایه پنهان	لایه ورودی
۰/۶۶۸۸	۰/۰۱۰۵	۰/۷۹۶۳	۳-۵-۱	۱	۵	۳
۰/۸۰۲۵	۰/۰۱۱۸	۰/۸۹۷۷	۳-۱۵-۱	۱	۱۵	۳
۰/۹۸۳۵	۰/۰۰۹۲۶	۰/۹۹۱۹	۳-۳۰-۱	۱	۳۰	۳



شکل ۷. نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی برای اعتبارسنجی مدل به دست آمده ($R^2=0.9835$)

۸. نتیجه‌گیری

- ضریب مقاومت کششی غیرمستقیم در مدل ارائه شده، مثبت می‌باشد. بنابراین، نمونه‌هایی با مقاومت کششی بالاتر، دارای مقاومت شیارشدگی کمتر و به تبع آن عمق شیار بیشتر هستند.
- پس از انجام آنالیز حساسیت مشخص گردید که عمق شیار برای مخلوط‌های ساخته شده با حدود قیر بهینه از پارامترهایی نظیر روانی مارشال، نسبت مارشال، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر، مستقل می‌باشد.
- با استفاده از این مدل و مدل‌های مشابه که سایر شرایط نمونه‌ها را نیز شامل شوند، می‌توان در آزمایشگاه به سرعت و با هزینه اندک، پتانسیل مخلوط آسفالتی را مشخص نمود.

در این پژوهش، پس از انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از ترکیب نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال و در راستای فرض اصلی تحقیق مدلی برای ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شد. در این مدل با استفاده از پارامترهای مقاومت مارشال، تغییر شکل قائم و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی، می‌توان پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را پیش‌بینی نمود. سایر دستاوردهای این پژوهش را می‌توان به ترتیب زیر طبقه‌بندی نمود:

- در مدل ارائه شده برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، ضریب تغییر شکل قائم مثبت است. به عبارت دیگر، هر چه میزان تغییر شکل قائم نمونه‌های آسفالتی در آزمایش کشش غیر مستقیم بیشتر باشد، پتانسیل شیارشدگی آنها نیز افزایش می‌یابد.
- ضریب منفی مقاومت مارشال در این مدل، بیانگر این حقیقت است که مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت مارشال بیشتر، کمتر مستعد شیارشدگی هستند. به عبارت دیگر، افزایش هرچه بیشتر مقاومت مارشال، نشان‌دهنده مقاومت برشی بیشتر مخلوط خواهد بود.

۹. سپاسگزاری

از زحمات و همکاری مسئولین محترم آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک واحد شهرستان نوشهر و واحد پروژه آزادراه تهران- شمال قطعات ۲۱-۲۲ و همچنین پرسنل مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) که امکان انجام آزمایش‌ها را مهیا کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۱۰. مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل. ۱۳۸۵. "مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالا در برابر شیارشدگی". دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک)، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، چاپ اول، صفحات ۱۰-۱۱.
- پژوهشکده حمل و نقل. ۱۳۸۷. "بررسی آزمایشگاهی اثر نوع دانه‌بندی و فضای خالی در بتن آسفالتی بر شیار جای چرخ و قیرزدگی در راه‌های کشور". وزارت راه و ترابری، چاپ اول، فصل اول، صفحات ۱-۴.
- دیواندری، ح. ۱۳۹۱. "ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از منحنی تنش برشی متراکم کننده دورانی". رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران، تهران.
- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، شفابخش، غ. و فخری، م. ۱۳۹۲. "ارائه مدل تخمین عدد روانی آسفالت با استفاده از منحنی تنش برشی و شیب تراکم ژیراتوری". پژوهشکده حمل و نقل، فصلنامه علمی و پژوهشی پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۰(۲): ۱۷۱-۱۹۱.
- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، شفابخش، غ. و حسامی، س. ۱۳۹۲. "ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی آسفالت با استفاده از پارامترهای خروجی متراکم کننده ژیراتوری". پژوهشکده حمل و نقل، فصلنامه علمی و پژوهشی پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۰(۱): ۲۹-۴۳.
- عامری، م.، مقدس نژاد، ف. و میرزاحسینی، م. ۱۳۸۹. "ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای حاصل از طرح اختلاط مارشال و بررسی تأثیر این پارامترها بر عدد روانی". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت، دانشگاه فردوسی مشهد.
- فخری، م. و توفیق، ع. ر. ۱۳۸۹. "ارزیابی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت، دانشگاه فردوسی مشهد.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. ۱۳۹۰. "آئین نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.
- Anderson, R. M., Christensen, W. D. and Bonaquist, R. 2003. "Estimating the Rutting Potential of Asphalt Mixtures using Superpave Gyratory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength". Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 72.
- Anderson, R. M., Turner, A. P., Peterson, L. R. and Mallick, B. R. 2002. "Relationship of Superpave Gyratory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior". NCHRP Report 478, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 1-16.
- Anderson, R. M. 2002. "Relationship between Superpave Gyratory Compaction Properties and the Rutting Potential of Asphalt Mixtures". Asphalt Paving Technology, Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 71, pp. 207-247.
- Bahuguna, S. 2003. "Permanent Deformation and Rate Effects in Asphalt Concrete: Constitutive Modeling and Numerical Implementation". PhD Dissertation, Case Western Reserve University.
- Drakos, C. 2003. "Identification of a Physical Model to Evaluate Rutting Performance of Asphalt Mixtures". PhD Dissertation, University of Florida.
- Fwa, T. F., Pasindu, H. R. and Ong, G. P. 2012. "Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration". J. Transport. Eng. 138(4): 423-429.
- Iran Ministry of Road and Transportation, 2009. "Effect of Gradation Type and Void in Asphalt Concrete on Rutting and Bleeding in Iran Roads". 1st Ed., Transportation Research Institute (TRI).
- McGarvey, K., Panko, M., Hurt, C., Mehta, Y. and Sukumaran, B. 2010. "Use of the Superpave Gyratory Compactor as a Predictor of Field Performance". FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Mirzahassemi, M. R., Najjar, Y. M., Alavi, A. H. and Gandomi, A. H. 2013. "ANN-Based Prediction Model for Rutting Propensity of Asphalt Mixtures". Transportation Research Board, 92nd Annual Meeting, No. 13-2180.
- Onyango, M. 2009. "Verification of Mechanistic Prediction Models for Permanent Deformation in Asphalt Mixes Using Accelerated Pavement Testing". PhD Dissertation, Kansas State University.
- Pardhan, M. M. 1995. "Permanent Deformation Characteristics of Asphalt-Aggregate Mixture Using Varied Material and Modeling Procedure with Marshall Method". PhD Dissertation, Montana University.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congresses)- World Road Association. 2006. "Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting". The Bureau of Technology and Safety Studies, PIARC Secretariat in Iran.

- Santucci, L. 2000. "Rut Resistant Asphalt Pavements". LTAP Field Engineer, Tech. Transfer Program Specialist, Pavement Research Center, UC Berkeley, Institute of Transportation Studies.
- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyoun, M. and Von Quintus, H. 2002. "Simple Performance Test for Superpave Mix Design ". NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Zaniewski, J. and Srinivasan, G. 2004. "Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential". Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Ziari, H. and Divandari, H. 2013. "Presenting asphalt mixtures flow number prediction model using Gyratory curves". Intl. J. Civil Eng., Trans. A: Civil Eng. 11(2): 125-133.
- Ziari, H., Divandari, H., Behbahani, H. and Ameri, M. 2012. "Developing a forecasting model for asphalt rutting potential using Gyratory compactor parameters". Life Sci. J. 9(4): 4140-4149.