

ارایه مدل تخمین عدد روانی با استفاده از پارامترهای مارشال و نتایج آزمایش

مقاومت کششی غیرمستقیم

حسن دیوانداری*، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نوشهر، نوشهر، ایران

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

مسعود رستمی انکاس، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات آیت ...

آملی، آمل، ایران

سید مسعود حسینی علی آباد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات آیت ...

آملی، آمل، ایران

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

دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۵

چکیده

رشد سریع آمد و شد، به ویژه تکرار بارگذاری ناشی از عبور وسایل نقلیه سنگین، کیفیت نامناسب مخلوط‌های آسفالتی و نرسیدن به تراکم مورد نیاز، باعث ایجاد خرابی‌های متفاوت در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌شود. یکی از مهم‌ترین انواع خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی، تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد که با نام شیارشدگی شناخته می‌شوند. شیارشدگی به واسطه تجمع تغییر شکل‌های دائمی و برگشت‌ناپذیر در لایه‌های روسازی تحت تکرار بارگذاری ترافیکی به وجود می‌آید. در میان تمام لایه‌های مختلف سهیم در شیارشدگی، تغییر مکان دائمی در لایه سطحی روسازی بخش عمده‌ای از شیارشدگی را به خود اختصاص می‌دهد. به همین دلیل در ارایه طرح اختلاط مناسب، توجه به پتانسیل بروز تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی که نشانه ضعف مقاومت برشی در آسفالت است، امری ضروری تلقی می‌گردد. از طرفی مشخص شده است که عددروانی نشانگر آغاز تغییر شکل‌های برشی در مخلوط‌های آسفالتی است که به عنوان شاخصی در ارزیابی پتانسیل شیارشدگی این روسازی شناخته می‌شود. در این پژوهش سعی شده است تا با ساخت نمونه‌هایی آسفالتی به روش مارشال که طیف وسیعی از مصالح سنگی، قیر، دانه بندی، فیلر و درصد قیر را شامل می‌شود، با توسعه یک رابطه میان عددروانی به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی با مقاومت کششی ناشی از آزمایش کشش غیر مستقیم و پارامترهای حاصل از طرح اختلاط مارشال، ضمن صرفه جویی در هزینه‌های اجرایی، بدون صرف زمان اضافی، وضعیت شیارشدگی مخلوط مورد نظر را پیش بینی نمود. این رابطه که صحت آن توسط شبکه عصبی مصنوعی نیز مورد تایید قرار گرفته است، این امکان را به وجود می‌آورد تا از تولید آسفالت با مقاومت برشی پایین در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای جلوگیری گردد. بدین ترتیب صرفه جویی چشمگیری در زمان و هزینه‌های آتی طرح اختلاط به وجود خواهد آمد.

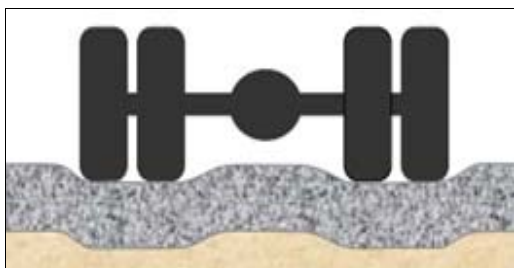
واژه‌های کلیدی: شیارشدگی، عدد روانی، خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیرمستقیم، شبکه عصبی

۱- مقدمه

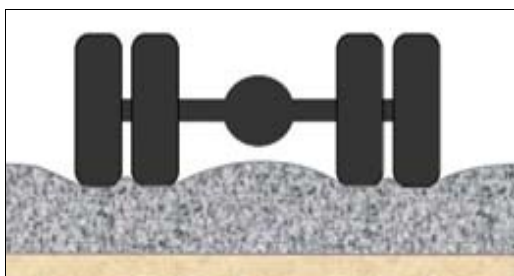
(Feyissa, 2009). یکی از مشکلات روسازی‌های آسفالتی، وقوع خزش‌های قابل توجه در آن‌ها است. پدیده خزش، پیدایش تدریجی نشست‌ها و تغییر مکان‌های دائمی^۱، بدون ایجاد ترک در روسازی‌ها تحت اعمال بارهای ثابت می‌باشد (عربانی و همکاران، ۱۳۹۰). نتیجه این تغییر شکل‌ها، به وجود آمدن شیار در روسازی آسفالتی خواهد بود. شیارشدگی^۲ به

رویه‌های آسفالتی به دلیل ترافیک امروزی در راه‌های با ظرفیت بالا، تحت بارگذاری شدید قرار دارند. فشار لاستیک وارد شده از چرخ‌های منفرد و حرکت بسیار آرام وسایل نقلیه سنگین در تراکم ترافیکی راه‌های شریانی، افزایش یافته است. افزایش تعداد آمد و شد در سطح جاده‌ها و خرابی‌های ناشی از آن، نگهداری راه‌ها را با مشکلات زیادی روبرو ساخته است

سطوح نشست کرده آثار سایش مشاهده می‌شود. از این رو توجه به آن نیز در طرح اختلاط ضروری می‌باشد (Onyango, 2009).



شکل ۱. شیارشدگی ناشی از نشست لایه‌های زیرین (Feyissa, 2009)



شکل ۲. شیارشدگی ناشی از ضعف مقاومت برشی (Feyissa, 2009)

روش‌های آزمایشگاهی متفاوتی جهت ارزیابی تغییر شکل‌های دائمی روسازی در کشورهای مختلف ابداع شده است. یکی از این روش‌ها آزمایش خزش دینامیکی^۷ است که با استفاده از دستگاه (UTM)^۸ انجام می‌شود. در این آزمایش نمونه تحت بارگذاری و باربرداری مکرر قرار داده شده و تغییرات کرنش تجمعی^۹ بارگذاری، در هر سیکل محاسبه می‌شود (Ziari et al., 2013). عدد روانی^{۱۰} که از آزمایش خزش دینامیکی به دست می‌آید، معادل تعداد سیکل بارگذاری است که مرحله سوم تغییرشکل‌های دائمی در آن آغاز می‌گردد. از عدد روانی به عنوان شاخصی برای تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود (Dongré et al., 2009). از این رو در این تحقیق سعی شده است با توجه به عدد روانی به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی و با استفاده از نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و پارامترهای مارشال، رابطه‌ای جهت پیش بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی رایج در روسازی راه‌های کشور، ارائه شود.

واسطه تجمع تغییرشکل‌های دائمی و برگشت‌ناپذیر در لایه‌های روسازی تحت تکرار بارگذاری ترافیکی ایجاد می‌شوند. در میان تمام لایه‌های مختلف سهم در شیارشدگی، تغییر مکان دائمی در لایه سطحی روسازی سهم عمده‌ای از شیارشدگی را به خود اختصاص می‌دهد. شدت و وسعت شیارشدگی بر ظرفیت باربری، کارایی و خدمت دهی روسازی موثر می‌باشد. افزایش میزان تغییرشکل‌های ماندگار که خود منجر به افزایش عمق شیار می‌گردد، می‌تواند مشکلات جدی برای روسازی و ایمنی تردد ایجاد کند. شیار با عمق بیش از پنج میلیمتر، توانایی نگه داشتن آب را خواهد داشت. در این حالت، ظرفیت زهکشی روسازی کاهش پیدا کرده و با تجمع آب و بروز پدیده هیدروپلنینگ^{۱۱}، بستر مناسبی برای به وجود آمدن حوادث ترافیکی مهیا می‌گردد (Fwa et al., 2012). همچنین تجمع آب می‌تواند باعث تسریع روند خرابی روسازی بر اثر رطوبت شود. از طرفی شیارشدگی سبب ایجاد قیرزدگی^{۱۲} شده که طی آن قیر به سطح روسازی آمده و با کاهش ضریب اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی، باعث کاهش ایمنی مسیر می‌گردد. تأثیر دیگر شیارشدگی کاهش ضخامت روسازی است که باعث افزایش احتمال شکست روسازی بر اثر ترک‌های خستگی^{۱۳} می‌شود (عامری و همکاران، ۱۳۸۹). این عوامل باعث شده است که شیارشدگی به عنوان یکی از پرهزینه‌ترین خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر شناخته شود. مکانیزم‌های بروز شیارشدگی که وجود آن با نامنظم بودن پروفیل‌های طولی و خصوصاً تغییرشکل پروفیل عرضی در مسیر چرخ‌ها (شیارها) آشکار می‌شود، اصولاً در سه گروه تقسیم بندی می‌شوند. نوع اول تغییرشکل مکانیکی ناشی از بارگذاری و ضعف بستر (تحکیم) است (Onyango, 2009). این نوع تغییرشکل زمانی به وجود می‌آید که ضخامت لایه‌های روسازی و یا خاک بستر توانایی تحمل ترافیک موجود را ندارند (شکل ۱). این نوع شیار که تحت عنوان شیارشدگی سازه‌ای^{۱۴} شناخته می‌شود، باعث تغییرشکل آسفالت در حجم ثابت می‌گردد (دیواندری، ۱۳۹۱). نوع دوم تغییرشکل‌های برشی یا پلاستیک است که به صورت شیار طولی، در وسط چرخ و با برآمدگی‌هایی در اطراف شیار به وجود می‌آید (شکل ۲). نوع دیگری از شیارشدگی نیز شناخته شده است که تغییرشکل‌هایی مشابه آن چه در مکانیزم تحکیم مشاهده می‌شود در قشر آسفالتی به وجود می‌آید با این تفاوت که در

۲- تعریف مسأله

۲-۱- هدف پژوهش

شناسایی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در زمانی که تحت شرایط بارگذاری ترافیکی قرار می‌گیرند، نقش بسزایی در ارایه طرح اختلاط مناسب ایفا می‌کند. در واقع شناسایی نحوه رفتار مخلوط آسفالتی کمک می‌کند تا در هنگام طرح اختلاط، پیش‌بینی‌های لازم برای پیشگیری خرابی صورت پذیرد. شیارشدهگی لایه‌های آسفالتی از جمله خرابی‌هایی است که سالیانه مبلغ قابل ملاحظه‌ای از بودجه تعمیر و نگهداری روسازی‌های انعطاف‌پذیر، صرف ترمیم آن می‌گردد. از طرفی روش‌های موجود ارزیابی پتانسیل شیارشدهگی مخلوط‌های آسفالتی اغلب پرهزینه بوده و در عین حال به تعداد زیادی نمونه برای انجام آزمایش‌ها نیاز دارد. بنابراین ارایه روشی ساده با توجه به محدودیت‌ها و امکانات آزمایشگاهی موجود در کشور که بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه اندک، وضعیت نمونه‌ها را از نظر شیارشدهگی در آزمایشگاه مشخص نماید، لازم به نظر می‌رسد.

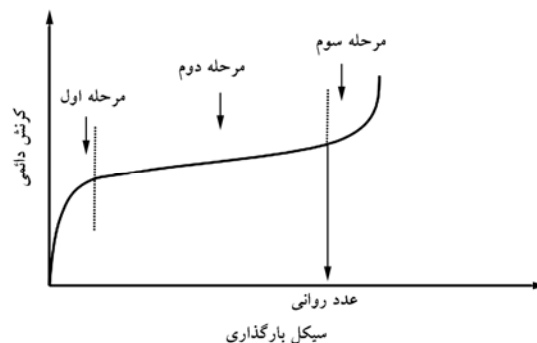
بنابر اهمیت این موضوع و نیز تأثیرات مخرب شیارشدهگی بر خرابی مخلوط‌های آسفالتی، در این پژوهش سعی شده است تا با ساخت نمونه‌هایی آسفالتی به روش مارشال که طیف وسیعی از مصالح سنگی، قیر، دانه بندی، فیلر و درصد قیر را شامل می‌شود، پس از انجام آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی و آزمایش کشش غیرمستقیم، مدلی ریاضی جهت تخمین میزان عدد روانی ارایه شود. بدین ترتیب این امکان به وجود می‌آید تا همزمان با ساخت نمونه‌ها، بدون صرف زمان و هزینه اضافی، پتانسیل شیارشدهگی آسفالت را در آزمایشگاه و پیش از تولید، ارزیابی نمود.

۲-۲- پیشینه تحقیق

تحقیقات محققین پیشین نشان داده است که عوامل متعددی سبب افزایش کرنش تجمعی و به تبع آن توسعه شیارشدهگی در لایه آسفالتی می‌گردند که برخی از آنها شامل بزرگی بارهای ترافیکی اعمال شده، سرعت بارگذاری، تعداد دفعات بارگذاری، دمای روسازی، مقاومت برشی آسفالت و... می‌باشند. در طی سالیان گذشته، مدل‌های زیادی با هدف توصیف رفتار تغییرشکل دائمی تحت آزمایش بارگذاری تکراری ارایه شده‌اند. هرچند هدف تمامی مدل‌ها تعیین میزان کرنش تجمعی می‌باشد، اما تغییر در مقدار هر یک از فاکتورهای اشاره شده، موجب می‌شود که نتایج به دست آمده فقط محدود به همان شرایط باشند (دیواندری، ۱۳۹۱). بدین ترتیب تجهیزاتی ساخته شد که با مهیا کردن شرایط دلخواه، وضعیت تغییرات کرنش تجمعی را ثبت نمایند. یکی از این آزمایش‌ها که با استفاده از دستگاه (UTM) انجام می‌شود، آزمایش خزش دینامیکی است (Bonaquist, 2012).

۲-۲-۱- کرنش تجمعی و عددروانی

مهم‌ترین خروجی آزمایش خزش دینامیکی، رسم نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری است. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، نمودار این آزمایش دارای سه بخش اصلی است. در ناحیه ابتدایی، تغییر مکان‌های دائم بر روی هم انباشته شده و سریعاً افزایش می‌یابند. در ناحیه دوم، افزایش کرنش‌های تجمعی با شیبی ملایم و ثابت صورت می‌پذیرد و در ناحیه سوم، شیب تغییرمکان دائم مجدداً افزایش می‌یابد. عدد روانی که از آزمایش خزش دینامیکی به دست می‌آید، تعداد بارگذاری است که در آن ناحیه سوم شروع می‌شود (Gandomi et al., 2011).



شکل ۳. نمودار تغییرات کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری (Gandomi et al., 2011)

پیشرفته (SUPERPAVE)^{۱۴}، گردید. این روش بر حسب میزان بارگذاری و تعداد وسایل نقلیه عبوری در طی عمر سرویس دهی، شامل سه سطح مجزای طراحی می‌باشد. سطح یک شامل آنالیز حجمی و آزمایش‌های مربوط به آن می‌باشد (Witzak, 2005). اما در این سطح، فقدان آزمایشی ساده که عملکرد آسفالت را در خصوص شیارشدگی پیش‌بینی نماید، کاملاً مشهود است. به همین سبب ابداع آزمایش یا مدل‌های ساده‌ای که توانایی تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط را همزمان با ارایه طرح اختلاط داشته باشند، لازم به نظر می‌رسد (دیواندری، ۱۳۹۱). بدین ترتیب این کمبود باعث شد تا مراکز معتبر تحقیقاتی همچون (NCHRP)^{۱۵}، (FHWA)^{۱۶}، تحقیقات گسترده‌ای را در این زمینه آغاز کنند. در همین راستا تحقیقات مشترکی توسط موسسه حمل و نقل پنسلوانیا (PTI)^{۱۷} و موسسه فناوری پیشرفته آسفالت (AAT)^{۱۸} صورت پذیرفت. در ادامه این مطالعات اندرسون توانست با به کار گیری نظریه موهر- کلمب در ارتباط با رفتار مصالح، شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی کند (Anderson et al., 2003). اندرسون و همکاران توانستند با استفاده از سه فاکتور مقاومت کششی غیرمستقیم (IDT)، درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و شیب تراکم (K) حاصل از تراکم کننده دورانی، پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی کنند. در این پژوهش، مقاومت کششی غیرمستقیم نمادی از چسبندگی و پارامتر شیب تراکم به عنوان نماد زاویه اصطکاک داخلی مخلوط‌های آسفالتی، معرفی شدند. در ادامه این پژوهش‌ها، تحقیقی مشابه و در جهت توسعه فعالیت اندرسون، توسط زانوسکی^{۱۹} و همکاران انجام پذیرفت. در این پژوهش میزان پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی توسط دستگاه تحلیل‌گر روسازی‌های آسفالتی (APA) اندازه‌گیری شد و رابطه‌ای بر اساس پارامترهای اصلی شیب تراکم، مقاومت کششی غیرمستقیم و درصد فضای خالی مصالح سنگی ارایه شد (Zaniewski et al., 2004).

۲-۳- فرضیات پژوهش

در این تحقیق با انتخاب مصالح، دانه بندی، قیر و فیلر رایج در صنعت راه سازی کشور سعی شده است تا مطالعات روندی عملیاتی و کارگاهی داشته باشد. بدین ترتیب نتایج به دست آمده کاربرد بیشتری در بخش اجرایی خواهد داشت. از طرفی

ژو^{۱۱} و همکارانش، نشان دادند که این سه مرحله آزمایشگاهی عملاً در محل نیز اتفاق می‌افتند. آن‌ها همچنین نوع آسیب فیزیکی اتفاق افتاده در هر مرحله را نیز مشخص کردند. مطابق نتایج پژوهش‌های انجام شده، در مرحله اول سخت شدگی کرنشی، در مرحله دوم ترک‌های میکروسکوپی و در مرحله سوم ترک‌های ماکروسکوپی اتفاق می‌افتد (Zhou et al., 2004).

۲-۲-۲- چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

کلمب^{۱۲} پوش گسیختگی موهر را به صورت یک تابع خطی از تنش قائم در نظر گرفت و پارامترهای گسیختگی (C) و (ϕ) را وارد پوش گسیختگی نمود. این رابطه به صورت زیر تعریف شده است (زیاری و همکاران، ۱۳۸۶).

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi) \quad (۱)$$

که در این رابطه:

τ : تنش برشی برحسب کیلو پاسکال،

σ_n : تنش نرمال قائم برحسب کیلو پاسکال،

C: چسبندگی برحسب کیلو پاسکال،

(ϕ): زاویه‌ی اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها برحسب درجه.

رفتار مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان با نظریه موهر - کلمب مورد تحلیل قرار داد. این نظریه مقاومت برشی آسفالت را با دو پارامتر چسبندگی قیر و زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌های آسفالت، اندازه گیری می‌نماید (Li et al., 2010). محققین زیادی سعی کرده‌اند با استفاده از تئوری موهر- کلمب، به عنوان یک مفهوم پایه‌ای سودمند، ارتباط بین چسبندگی قیر و زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها را با پارامترهای طراحی و عملکردی آسفالت به دست آورند. این پژوهش‌ها سبب گردیده است که تعیین پارامترهای چسبندگی و اصطکاک داخلی به روش‌های ساده آزمایشگاهی از اهمیت دوچندانی برخوردار گردد (زیاری و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۲-۳- آزمایش کشش غیرمستقیم

در طی برنامه تحقیقات استراتژیک راه‌های ایالات متحده (SHRP)^{۱۳}، پژوهش گسترده‌ای پیرامون مخلوط‌های آسفالتی انجام شد که منجر به ارایه روش طرح اختلاط روسازی

متداول است، حد وسط این دانه بندی در ساخت نمونه های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت که جزئیات بیشتر آن در جدول (۱) ارایه شده است.

۳-۲- انتخاب مواد و مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از مصالح سنگی آهکی برای ساخت نمونه ها استفاده شده است. مصالح سنگی مصرف شده از معدن منطقه ۴ آزادراه تهران شمال واقع در چالوس تهیه شد. با انجام آزمایش های لازم بر روی مصالح سنگی مشخص شد که همه پارامترها، حد مجاز آیین نامه روسازی ایران را دارا می باشند. نتایج آزمایش های انجام شده در جدول (۲) ارایه شده است. پودر سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰، به عنوان فیلر جهت ساخت نمونه ها استفاده شد. در ضمن اطمینان حاصل شد که نتیجه آزمایش خمیری و هیدرومتری فیلر مصرفی، در محدوده قابل قبول نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، ۱۳۹۰) قرار دارد. همچنین از دو نمونه قیر ۷۰-۶۰ مورد استفاده در پروژه مذکور و قیر ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تبریز جهت ساخت نمونه ها استفاده گردید. به جهت اطمینان از خصوصیات قیر مصرفی، آزمایش های مطرح شده در آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران برای دو نوع قیر انجام شد. نتایج این آزمایش ها و همچنین مشخصات مورد نظر نشریه ۲۳۴، در جدول (۳) ارایه شده است.

در این پژوهش، فرض اصلی آن است که عدد روانی حاصل از آزمایش خزش دینامیکی می تواند معیار مناسبی جهت ارزیابی پتانسیل شیارشدگی نمونه های آسفالتی باشد. ضمناً فرض شده است که ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط های آسفالتی با انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و پارامترهای مارشال، معیاری ساده و مناسب جهت ارزیابی شیارشدگی نمونه های آسفالتی است.

همچنین طبق رابطه موهر - کلمب، مقاومت برشی وابسته به چسبندگی قیر و زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه ها می باشد. پس می توان فرض نمود که بین عدد روانی که وابسته به مقاومت برشی است با نتیجه مقاومت کششی غیرمستقیم که وابسته به چسبندگی قیر و پارامترهای مارشال که وابسته به چسبندگی قیر و زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه ها می باشند، رابطه ای برقرار شود.

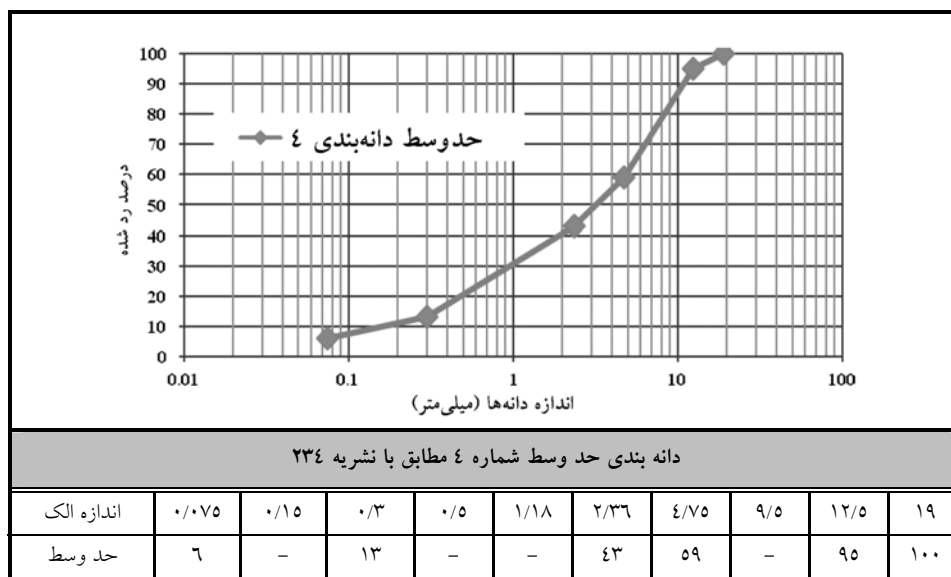
۳-۲ روش تحقیق

در انتخاب روش طرح اختلاط و مواد مصرفی شامل قیر و مصالح سنگی سعی شده طوری عمل شود که حداکثر امکان نمونه های آسفالتی ساخته شده در آزمایشگاه، بیشترین شباهت را به آسفالت کارگاهی کشور داشته باشند.

۳-۱- دانه بندی مورد استفاده

با توجه به گستردگی استفاده از دانه بندی شماره «۴» آیین نامه روسازی آسفالتی ایران که در ساخت لایه های آسفالتی

جدول ۱. نمودار دانه بندی شماره ۴ مخلوط های آسفالتی در ساخت لایه رویه (آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، ۱۳۹۰)



جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش مصالح سنگی مورد استفاده مطابق با ضوابط نشریه ۲۳۴

شرح آزمایش		نتیجه برای مصالح مصرفی		حدود مجاز نشریه ۲۳۴		روش استاندارد آزمایش	
۱	درصد سایش به روش لس آنجلس ^{۲۰}	۱۷	حداکثر ۲۵ درصد	AASHTO-T۵۳	ASTM-C۱۳۱		
۲	درصد افت وزنی با سولفات سدیم ^{۲۱}	۶۳	حداکثر ۸ درصد	T۴۹	CSA		
۳	درصد تورق ^{۲۲}	۲۲	-	BS-۸۱۲	-		
۴	درصد تطویل ^{۲۳}	۹	-	-	BS-۸۱۲		
۵	درصد شکستگی در دو جبهه ^{۲۴}	۹۵	حداقل ۹۰ درصد	-	D۵۸۲۱		

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش قیرهای مورد استفاده مطابق با ضوابط نشریه ۲۳۴

شرح آزمایش		نتیجه برای قیر مصرفی		حدود مجاز نشریه ۲۳۴		روش استاندارد آزمایش	
		۸۵-۱۰۰	۶۰-۷۰	۸۵-۱۰۰	۶۰-۷۰	AASHTO	ASTM
۱	آزمایش نقطه نرمی ^{۲۵} قیر (درجه سانتی‌گراد)	۵۱	۴۹	۵۶ تا ۴۹	۵۲ تا ۴۵	T۵۳	D۳۶
۲	آزمایش درجه نفوذ قیر ^{۲۶} (دهم میلی‌متر)	۶۱	۸۷	۷۰ تا ۶۰	۱۰۰ تا ۸۵	T۴۹	D۵
۳	درجه اشتعال قیر ^{۲۷} به روش ظرف روباز (درجه سانتی‌گراد)	۳۰۰	۲۹۷	حداقل ۲۳۲	حداقل ۲۳۲	T۴۸	D۹۲
۴	آزمایش تعیین وزن مخصوص قیر ^{۲۸} (gr/cm ³)	۱/۰۱۷	۱/۰۱۱	-	-	T۲۲۸	D۷۰
۵	آزمایش خاصیت انگمی قیر ^{۲۹} (سانتیمتر)	+۱۰۰	+۱۰۰	حداقل ۱۰۰	حداقل ۱۰۰	T۵۱	D۷۰
۶	آزمایش تعیین ویسکوزیته قیر ^{۳۰} (ثانیه)	۱۹۲	۱۵۱	-	-	TV۲	D۸۸

جدول ۴. نتایج نهایی آزمایش مارشال در درصد قیر بهینه

نوع ترکیب	مقاومت (کیلوئوتن)	روانی (میلیمتر)	متوسط چگالی (تن بر مترمکعب)	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی پر شده با قیر	درصد قیر بهینه
AP6	۱۴/۶۲۶	۳/۴۱	۲/۳۷	۴/۰۵	۱۳/۰۳	۶۸/۹۲	۵/۵
AP8	۱۳/۱۰۳	۳/۴۵	۴/۶۳	۴/۶۳	۱۳/۴۰۵	۶۵/۵۶	۵/۳

۳-۳- ساخت نمونه‌ها و فرآیند تعیین قیر بهینه

استفاده شده است. از سمت چپ به راست حرف اول «A» نوع سنگ دانه‌هاست که از جنس آهکی، حرف دوم «P» نوع فیلر مصرفی است که از جنس پودر سنگ و عدد ۶ نشان دهنده (قیر ۶۰-۷۰) و عدد ۸ نشان دهنده (قیر ۸۵-۱۰۰) می‌باشد. جدول ۴ درصد قیر بهینه به دست آمده به روش مارشال و پارامترهای آسفالت در این درصد قیر را برای هر یک از ترکیب‌ها نشان می‌دهد.

با توجه به مصالح مصرفی در این پژوهش، دو نوع ترکیب به وجود آمد. برای هر ترکیب هجده نمونه‌ی استوانه‌ای و مجموعاً ۳۶ نمونه آسفالتی جهت تعیین قیر بهینه به روش مارشال، طبق استاندارد (ASTM-D1559) ساخته شد. عمل تراکم نیز توسط چکش مارشال و با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف از نمونه استوانه‌ای صورت پذیرفت. در نام‌گذاری نمونه‌ها ترکیبی از سه مشخصه شامل دو حرف و یک عدد

$$S_t = \frac{2P_{\max}}{\pi t d} \quad (2)$$

که در این رابطه:

S_t : مقاومت کششی غیرمستقیم برحسب کیلو پاسکال،

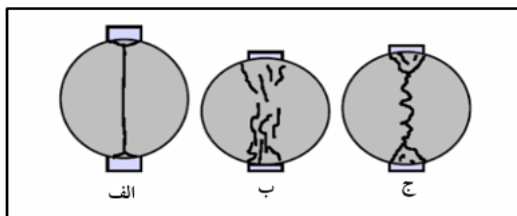
P_{\max} = بار اعمال شده برحسب نیوتن،

t = ارتفاع نمونه برحسب میلیمتر،

d = قطر نمونه برحسب میلیمتر می‌باشند.

شکست نمونه در این آزمایش مطابق شکل (۴) به یکی از

سه حالت زیر اتفاق می‌افتد:



شکل ۴. نحوه شکست نمونه‌ها در آزمایش کششی غیرمستقیم (Sunarjono, 2007)

الف: شکست آشکار نمونه در راستای قطر که گاهی با قطعات

مثلی در نزدیکی نوار بارگذاری همراه است.

ب: وقوع تغییرشکل بیش از حد در نمونه که مانع از تشکیل

یک صفحه شکست آشکار می‌شود.

ج: به صورت ترکیبی از دو حالت قبل که در نزدیکی نوارهای

بارگذاری تغییرشکل بیش از حد و در نزدیکی مرکز نمونه

یک صفحه شکست مشاهده می‌شود (Sunarjono, 2007).

۵- نتایج آزمایشگاهی

پس از انجام آزمایش‌های فوق، نتایج مطابق جدول (۵) به

دست آمد.

۶- ارایه مدل

۶-۱- توسعه مدل رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار

SPSS.20^{۳۵}

رگرسیون ارایه رابطه یا تابعی ریاضی است که بین متغیر

وابسته (پاسخ) که با X نشان داده می‌شود از یک سو و

متغیرهای مستقل (پیش گو) که با Y نشان داده می‌شود، ارتباط

برقرار می‌کند. میزان همبستگی بین نتایج، حدود یا مقدار

۳-۳-۱- تعیین تعداد نمونه‌ها

به منظور بررسی وضعیت نمونه‌ها در حدود قیر بهینه،

به ازای دو ترکیب مورد نظر، سه گروه نمونه ساخته شد. گروه

اول با میزان قیر معادل قیر بهینه به دست آمده و گروه دو و سه

به ترتیب با میزان ۰/۵ درصد قیر، بیشتر از قیر بهینه و ۰/۵

درصد قیر، کمتر از قیر بهینه ساخته شد. با توجه به پارامترهای

مختلف و انجام آزمایش‌های مارشال، خزش دینامیکی و کشش

غیرمستقیم، در این مقطع از تحقیق، تعداد ۷۲ نمونه استوانه‌ای

ساخته شد.

۴- آزمون‌های آزمایشگاهی

۴-۱- آزمایش خزش دینامیکی

همانطوری که بیان شد عدد روانی در منحنی کرنش

تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری حاصل از آزمایش

خزش دینامیکی، تعداد بارگذاری معادل با شروع ناحیه سوم

می‌باشد. در این پژوهش آزمایش خزش به وسیله دستگاه

(UTM-5) انجام شد. بار اعمال شده در دمای ۵۰ درجه

سانتی‌گراد به صورت موج مربعی^{۳۱}، شامل ۵۰۰ میلی ثانیه

بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی ثانیه استراحت طبق استاندارد استرالیا^{۳۳}

در نظر گرفته شد. مقدار تنش تماسی^{۳۳} برابر ۲ کیلوپاسکال و

تنش انحرافی^{۳۴} معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال تنظیم گردید. دو

ضابطه برای اتمام آزمایش در نظر گرفته شد: حداکثر کرنش

ایجاد شده که ۳۰۰۰۰ میکرو در نظر گرفته شد و حداکثر تعداد

بارگذاری که ۴۰۰۰۰ سیکل تعریف شد. نتایج آزمایش خزش

دینامیکی در جدول (۵) ارایه شده است.

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای

ارزیابی مقاومت کششی و پیش بینی ظهور ترک‌ها در

مخلوط‌های آسفالتی است (Kim et al., 2006). هنگام انجام

آزمایش کشش غیرمستقیم، نمونه استوانه‌ای تحت بارگذاری

قطری قرار گرفته و بار نهایی در موقع شکستن نمونه (دو

نیمه شدن) اندازه‌گیری می‌شود (مدرس و همکاران،

۱۳۹۰). مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه

می‌شود:

جدول ۵. نتایج حاصل از آزمایش‌های خزش دینامیکی و کششی غیرمستقیم و مارشال

نتایج آزمایش‌های نهایی در این پژوهش							
قیر ۸۵-۱۰۰			قیر ۶۰-۷۰			نوع قیر	
%/۴/۸	%/۵/۳(OBC)	%/۵/۸	%/۵	%/۵/۵(OBC)	%/۶	درصد قیر	
-%/۰/۵	۰	%/۰/۵	-%/۰/۵	۰	%/۰/۵	مقدار اختلاف با درصد قیر بهینه	
نتایج پارامترهای مارشال						شماره	
۱۱/۸۲۲	۱۳/۸۸۹	۱۳/۷۴۳	۱۳/۶۳۴	۱۴/۷۹۳	۱۳/۷۴۳	۱	مقاومت مارشال (کیلونیوتن)
۱۲/۲۷۱	۱۳/۶۸۸	۱۳/۶۴۱	۱۳/۷۸۸	۱۴/۶۴۹	۱۳/۰۱۲	۲	
۱۱/۸۸۷	۱۴/۴۱۷	۱۳/۵۸۰	۱۳/۸۰۵	۱۴/۶۷۲	۱۳/۶۵۰	۳	
۱۱/۹۹۳	۱۳/۹۹۸	۱۳/۶۵۴	۱۳/۷۴۲	۱۴/۷۰۴	۱۳/۴۶۸	میانگین	
۳	۳/۱	۳/۸	۳/۴	۳/۴	۳/۸	۱	روانی مارشال (میلی‌متر)
۲/۸	۳/۲	۳/۶	۳/۲	۳/۴	۴	۲	
۳/۲	۳/۳	۳/۷	۳	۳/۴	۳/۹	۳	
۳/۰	۳/۲	۳/۷	۳/۲	۳/۴	۳/۹	میانگین	
۳/۹۴	۴/۴۸	۳/۶۲	۴/۰۱	۴/۳۵	۳/۶۲	۱	نسبت مارشال
۴/۳۸	۴/۲۸	۳/۷۹	۴/۳۰	۴/۳۰	۳/۲۵	۲	
۳/۷۱	۴/۳۷	۳/۶۷	۴/۶۰	۴/۳۱	۳/۵۰	۳	
۴/۰۱	۴/۳۸	۳/۶۹	۴/۳۰	۴/۳۲	۳/۴۶	میانگین	
۵/۰۹	۴/۰۶	۳/۱۲	۴/۹۶	۴/۴۸	۳/۰۳	۱	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی
۵/۱۳	۳/۹۵	۳/۱۴	۵/۰۸	۴/۶۶	۲/۹۸	۲	
۴/۹۳	۳/۹۶	۳/۱۳	۵/۱۷	۴/۵۵	۲/۸۶	۳	
۵/۰۵	۳/۹۹	۳/۱۳	۵/۰۷	۴/۵۷	۲/۹۶	میانگین	
۱۳/۳۰	۱۳/۱۹	۱۳/۱۵	۱۳/۲۳	۱۲/۹۹	۱۳/۴۸	۱	درصد فضای خالی مصالح سنگی
۱۳/۴۲	۱۳/۰۶	۱۳/۳۶	۱۳/۲۸	۱۳/۱۰	۱۳/۵۶	۲	
۱۳/۱۸	۱۳/۲۶	۱۳/۲۷	۱۳/۱۲	۱۳/۰۰	۱۳/۴۰	۳	
۱۳/۳۰	۱۳/۱۷	۱۳/۲۶	۱۳/۲۱	۱۳/۰۳	۱۳/۴۸	میانگین	
۶۱/۷۳	۶۹/۲۲	۷۶/۲۷	۶۲/۵۱	۶۵/۵۱	۷۷/۵۲	۱	درصد فضای خالی پر شده با قیر
۶۱/۷۷	۶۹/۷۵	۷۶/۵۰	۶۱/۷۵	۶۴/۴۳	۷۸/۰۲	۲	
۶۲/۵۹	۷۰/۱۳	۷۶/۴۱	۶۰/۵۹	۶۵/۰۰	۷۸/۶۵	۳	
۶۲/۰۳	۶۹/۷۰	۷۶/۴۰	۶۱/۶۲	۶۴/۹۳	۷۸/۰۴	میانگین	
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم							
۶۹۹/۰۰	۹۹۵/۳۸	۷۸۸/۷۰	۸۸۸/۳۳	۱۰۰۹/۹۵	۱۲۳۶/۰۰	۱	مقاومت کششی (کیلو پاسکال)
۶۵۶/۳۱	۹۸۰/۷۸	۸۰۷/۶۵	۸۲۹/۲۰	۱۰۵۳/۴۰	۱۲۹۳/۱۳	۲	
۶۲۸/۴۴	۱۰۰۸/۰۰	۷۹۸/۸۵	۸۵۶/۴۷	۱۰۵۶/۰۵	۱۲۳۸/۱۲	۳	
۶۶۱/۲۵	۹۹۴/۷۲	۷۹۸/۴۰	۸۵۸/۰۰	۱۰۳۹/۸۰	۱۲۵۵/۷۵	میانگین	
۲/۷۲	۲/۸۵	۳/۱۰	۲/۶۱	۲/۶۴	۲/۹۴	۱	تغییر شکل قائم (میلی‌متر)
۲/۶۷	۲/۸۳	۳/۱۹	۲/۴۰	۲/۶۹	۳/۱۲	۲	
۲/۶۲	۲/۹۶	۳/۱۶	۲/۴۹	۲/۷۴	۲/۹۴	۳	
۲/۶۷	۲/۸۸	۳/۱۵	۲/۵۰	۲/۶۹	۳/۰۰	میانگین	
نتایج آزمایش خزش دینامیکی							
۱۹۸۸	۲۷۴۴	۳۳۶۹	۱۲۳۲	۱۲۳۲	۲۱۲۰	۱	عدد روانی
۱۷۷۱	۲۹۰۲	۳۱۹۱	۸۰۴	۱۳۰۰	۱۸۲۸	۲	
۲۰۱۳	۲۵۶۱	۳۴۸۰	۱۳۸۱	۱۷۵۰	۲۰۹۶	۳	
۱۹۲۷	۲۷۳۵	۳۳۴۶	۱۱۰۷	۱۴۲۸	۲۰۱۴	میانگین	

این ضریب کمتر باشد، سطح معناداری ضریب (R^2) و مدل ارایه شده بیشتر خواهد بود. در این مقاله جهت مدلسازی ریاضی از نرم افزار SPSS.20 استفاده شده است. نتایج حاصل از آنالیز آماری داده‌ها در نرم افزار SPSS.20 در جدول (۶) و (۷) ارایه شده است. در نهایت با توجه به جدول (۸)، مدل نهایی به صورت رابطه (۴) تعیین گردید.

$$F_n = 9783.535 - 807.499 VMA + 32.004 VFA + 0.884 S_t \quad (4)$$

که در این رابطه:

F_n : عدد روانی حاصل از آزمایش خزش دینامیکی،

VMA: درصد فضای خالی مصالح سنگی،

VFA: درصد فضای خالی پر شده با قیر و

S_t : مقاومت کششی حاصل از آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم می‌باشد.

برآورد رگرسیون را تعیین می‌کند. ضریب همبستگی (R)، میزان ارتباط بین دو متغیر را بیان می‌کند، اما در مورد ماهیت این همبستگی، اطلاعات زیادی در اختیار قرار نمی‌دهد. برای دست یابی به اطلاعات بیشتر در مورد همبستگی، به معیار دیگری به نام ضریب تعیین نیاز است. در رگرسیون دو فرض H_0 و H_1 به شکل رابطه (۳) تعریف می‌شوند. اغلب فرضیه بیانگر این مطلب است که یک ارتباط علیتی بین دو متغیر وجود دارد به شکلی که میزان یکی (متغیر مستقل) تا حدودی تعیین کننده (متغیر وابسته) است.

$$\begin{cases} H_0 & : & R = 0 \\ H_1 & : & R \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

هدف رد فرض H_0 می‌باشد که اعتبار آن با ضریبی تحت عنوان Sig. F change سنجیده می‌شود. به هر میزان که مقدار

جدول ۶. خلاصه آماره های توصیفی متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی (خروجی نرم افزار SPSS.20)

تعداد	انحراف استاندارد	میانه	دامنه	حداکثر	حداقل	پارامترهای مورد بررسی
۲۴	۵۴۰/۲۵۸۶۳	۲۴۰۲/۲	۲۹۹۹	۳۴۸۰	۸۰۴	Fn (Flow number)
۲۴	۰/۴۵۸۵	۱۳/۰۰۶	۱/۳۳	۱۳/۵۶	۱۲/۲۳	VMA
۲۴	۶/۵۴۵۰	۶۷/۵۸۵	۱۸/۰۶	۷۸/۶۵	۶۰۵۹	VFA
۲۴	۱۷۹/۵۸۰	۱۱۰۶/۶۷	۷۹۵/۶۸	۱۴۲۳/۶۸	۶۲۸	St

جدول ۷. سنجش آماری مدلسازی عدد روانی (خروجی نرم افزار SPSS.20)

دوربین - واتسون	انحراف از معیار	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل
۱/۶۹۲	۲۱۷/۲۹۲۱	۰/۸۶۵۳	۰/۸۷۶	۰/۹۳۶	۱

جدول ۸. ضرایب متغیرهای مستقل عدد روانی (خروجی نرم افزار SPSS.20)

مشخصات مدل	ضریب اطمینان ۹۵٪		ضریب استاندارد شده	پارامتر t	پارامتر sig.	ضرایب غیراستاندارد شده	
	کران بالا	کران پایین				انحراف ضریب معیار	ضریب
(Constant)	۱۵۴۸۲/۵۸۵	۴۱۰۴/۴۸۵	-۰/۸۳۵	۳/۸۹۷	۰/۰۰۴	۹۷۸۳/۵۳۵	۲۵۱۰/۴۵۸
1 VMA	-۴۴۰/۴۱۴	-۱۱۷۴/۵۸۴	-۰/۷۲۹	-۴/۹۷۶	۰/۰۰۱	-۸۰۷/۴۹۹	۱۶۲/۲۷۲
VFA	۶۰/۷۵۷	۳/۲۵۱	۰/۳۶۹	۲/۵۱۸	۰/۰۳۳	۳۲/۰۰۴	۱۲/۷۱۰
St	۱/۰۶۲	۰/۲۱۹	۰/۴۲۱	۲/۷۷۵	۰/۰۱۰	۰/۸۸۴	۰/۰۷۱۰

جدول ۹. آنالیز واریانس مدل عدد روانی (خروجی نرم افزار SPSS.20)

سطح معناداری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۰۰	۲۰/۹۰۲	۱۱۶۷۰۴۵/۵۳۵	۳	۲۳۳۴۰۹۱/۰۷۰	رگرسیون
		۵۵۸۳۴/۶۲۲	۸	۵۰۲۵۱۱/۵۹۷	باقیمانده
			۱۱	۲۸۳۶۶۰۲/۶۶۷	کل

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. هرچه میزان مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۲۸} به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل در برآورد داده‌ها کمتر بوده و به عبارت دیگر مدل مطلوب‌تر می‌باشد. الگوریتم عملکرد شبکه عصبی در شکل (۶) نشان داده شده است. در این پژوهش هدف از اعتبار سنجی مدل ارایه شده توسط شبکه عصبی، 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.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

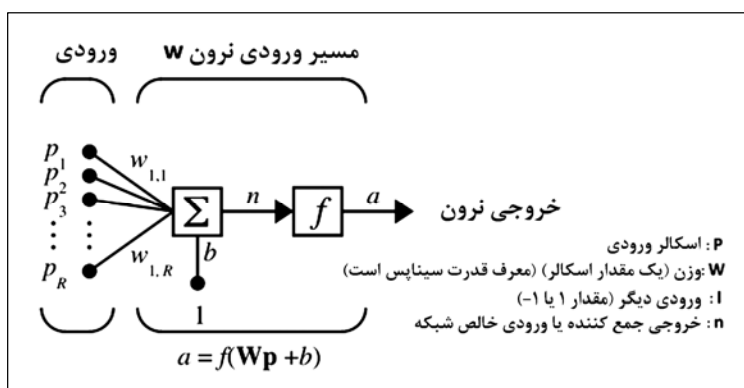
در این پژوهش از نرم افزار MATLAB 2011 برای کد نویسی شبکه عصبی استفاده شد.

همانطور که مشخص است R محاسبه شده برای مدل نهایی برابر با $۰/۹۳۶$ است و در سطح اطمینان ۹۵% معنادار می‌باشد (جداول ۸ و ۷). آنالیز واریانس^{۳۶} برای مدل نهایی در جدول (۹) ارایه شده است.

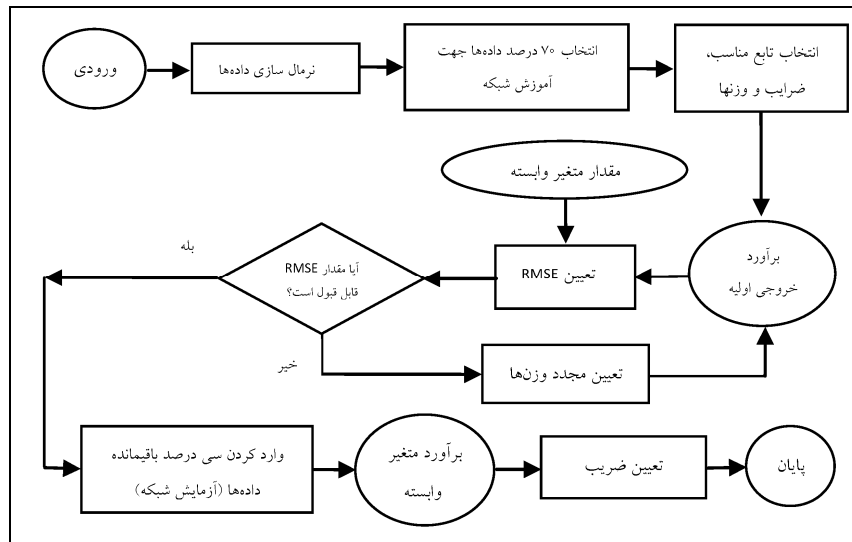
۲-۶- اعتبار سنجی مدل با استفاده از شبکه عصبی

مصنوعی

امروزه از شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۳۷} به طور گسترده و تقریباً در تمام علوم (مهندسی، پزشکی و علوم پایه) استفاده می‌شود. در سیستم عصبی، نرون (سلول عصبی) به عنوان اصلی‌ترین عنصر پردازش شناخته شده است. نرون‌ها در گروه‌هایی به صورت لایه طبقه بندی 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 رابطه مورد نظر دارند. مدل نهایی در این پژوهش دارای سه متغیر مستقل و یک متغیر وابسته می‌باشد. 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 می‌شود تا



شکل ۵. نمایی از ساختار یک عصب مصنوعی (Demuth et al., 2006).

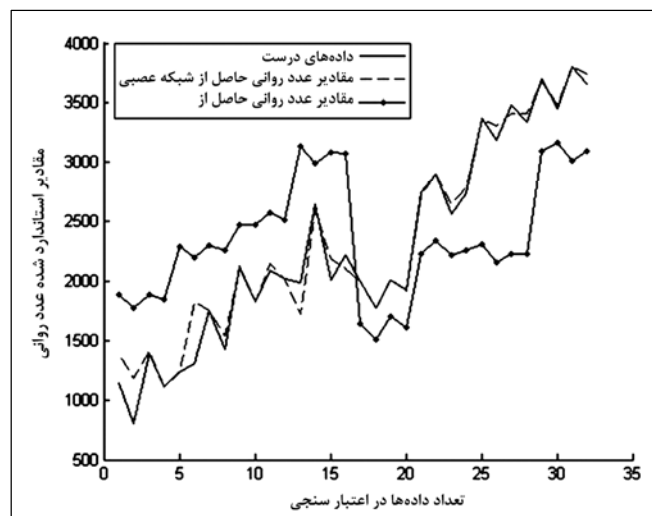


شکل ۶. الگوریتم عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در اعتبار سنجی یک مدل (دیواندری، ۱۳۹۱)

۶-۲-۱- نتیجه حاصل از آنالیز مدل با شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش با در نظر گرفتن سه نرون در لایه ورودی، یک نرون در لایه خارجی و تعداد ۳۰ نرون در لایه مخفی، اعتبار سنجی مدل انجام شد. نتایج این اعتبار سنجی مطابق جدول (۱۰) و شکل (۷) حاصل شد.

جدول ۱۰. خروجی شبکه عصبی برای مدل نهایی

ساختار شبکه عصبی مصنوعی						
آزمایش	آموزش		شاخص شبکه	تعداد نرون‌ها در هر لایه		
	RMSE	R ²		لایه خروجی	لایه پنهان	لایه ورودی
۰/۶۸۸۸	۰/۰۲۶۲	۰/۷۷۱۳	۳-۵-۱	۱	۵	۳
۰/۸۴۳۶	۰/۰۱۵۶	۰/۸۸۱۲	۳-۱۵-۱	۱	۱۵	۳
۰/۹۷۱۹	۰/۰۰۶۸۴	۰/۹۸۳۸	۳-۳۰-۱	۱	۳۰	۳



شکل ۷. نتایج حاصل از شبکه عصبی برای اعتبار سنجی مدل نهایی عدد روانی (R²=۰/۹۷۱۹)

۷- نتیجه گیری

برعکس می‌باشد که علت آن را می‌توان شکل‌پذیری بیشتر قیر ۱۰۰-۸۵ دانست.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC)^{۳۹}، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک شهرستان نوشهر و نیز جناب آقای مهندس پور امید و جناب آقای مهندس جهاندار به جهت مهیا نمودن امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاه و انجام آزمایش‌ها سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایند.

۹- پی‌نوشت‌ها

1. Permanent Deformation
2. Rutting
3. Hydroplaning
4. Bleeding
5. Fatigue Cracking
6. Structural Rutting
7. Dynamic creep
8. Universal Testing Machine
9. Accumulated Strain
10. Flow Number
11. Zhou
12. Colomb
13. Strategic Highway Research Program
14. Superior Performing Asphalt Pavement
15. National Cooperative Highway Research Program
16. Federal Highway Administration
17. Pennsylvania Transportation Institute
18. Advanced Asphalt Technologies
19. Zaniewski
20. Los Angeles Abrasion Test
21. Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate
22. Flakiness
23. Elongation
24. Percentage of Fractured Particles
25. Softening Point
26. Penetration of Bitumen
27. Flash Point of Bitumen
28. Density of Bitumen
29. Ductility of Bitumen
30. Viscosity of Bitumen
31. Square Pulse
32. Australian: AS 2891.12.1
33. Contact Stress
34. Deviator Stress
35. Statistical Package for the Social Sciences

در این تحقیق پس از انجام آزمایش خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیر مستقیم و آزمایش مارشال و انجام تحلیل آماری، مدلی برای محاسبه عدد روانی نمونه‌های آسفالتی ارائه شد. در این مدل با استفاده از درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی پر شده با قیر به همراه مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی، می‌توان عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی را پیش بینی نمود. سایر نتایج این پژوهش را می‌توان به ترتیب زیر طبقه بندی نمود:

- متغیرهای مستقل متعددی در مرحله آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفتند که در نهایت مشخص شد تنها سه متغیر S_f ، VMA و VFA بر مقدار عدد روانی تاثیر گذارند.
- در معادله مذکور، عدد روانی با مقاومت کششی غیر مستقیم رابطه مستقیم دارد. در مطالعات اندرسون رابطه مستقیم بین چسبندگی قیر و مقاومت کششی اثبات شده بود. بدین ترتیب می‌توان افزایش عدد روانی به ازای افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم را ناشی از افزایش نقش چسبندگی قیر دانست که باعث افزایش مقاومت برشی آسفالت می‌شود.
- در مدل ارائه شده درصد فضای خالی مصالح سنگی VMA با علامت منفی وارد معادله شده است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که مقدار عدد روانی با درصد فضای خالی مصالح سنگی نسبت عکس دارد. به عبارت دیگر افزایش درصد فضای خالی مصالح سنگی، باعث کاهش مقاومت برشی مخلوط‌های آسفالتی شده و در نتیجه پتانسیل شیارشدگی آسفالت افزایش می‌یابد.
- همانطور که در مدل نهایی مشاهده شد، درصد فضای خالی پر شده با قیر نمونه با ضریب مثبت در مدل اثر کرده و این به معنی رابطه مستقیم این پارامتر با عدد روانی است. بدین ترتیب با افزایش درصد فضای خالی پر شده با قیر، عدد روانی افزایش و این بدین معنی است که پتانسیل شیارشدگی کمتر خواهد شد. دلیل این امر را می‌توان افزایش نقش چسبندگی قیر طبق رابطه موهر - کلمب دانست.
- در نتایج بدست آمده مشخص گردید که مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با قیر ۷۰-۶۰ به مراتب بیشتر از نمونه‌های قیر ۱۰۰-۸۵ است. ضمن اینکه این روند در خصوص تغییر شکل قائم نمونه‌ها در طی آزمایش IDT،

امولسیون و سیمان"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی
حمل و نقل، سال دوم، زمستان ۱۳۹۰، ص. ۱۴۳-۱۵۴.

- Anderson, R.M., Christensen, D.W., and Bonaquist, R. (2003) "Estimating the Rutting Potential of Asphalt Mixtures Using Superpave Gyrotory Compaction Properties and Indirect Tensile Strength", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 72.
- Bonaquist, R. (2012) "Evaluation of Flow Number (F_n) as a Discriminating HMA Mixture Property", Advanced Asphalt Technologies, LLC, (No. WHRP 12-01).
- Dongré, R., D'Angelo, J., and Copeland, A. (2009) "Refinement of Flow Number as Determined by Asphalt Mixture Performance Tester", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2127(1), 127-136.
- Demuth, H., Beale, M., and Hagan, M. (2006) "Neural Network Toolbox For Use with MATLAB", Version 5.
- Feyissa, B. (2009) "Analysis and Modeling of Rutting for Long Life Asphalt Concrete Pavement", Department of Civil Engineering and Geodesy- Technische Universität Darmstadt, 05October.
- Fwa, T.F., Pasindu, H.R., and Ong, G.P. (2012) "Critical Rut Depth for Pavement Maintenance Based on Vehicle Skidding and Hydroplaning Consideration", Journal of Transportation Engineering, 138(4), 423-429.
- Gandomi, A.H., Alavi, A.H., Mirzahosseini, M.R., and Moghadas Nejad, F. (2011) "Nonlinear Genetic-Based Models for Prediction of Flow Number of Asphalt Mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 23(3), pp. 248-263.
- Kim, Y., and Lee, H.D. (2006) "Development of Mix Design Procedure for Cold in-place Recycling with Foamed Asphalt", Journal of materials in civil engineering, 18(1), 116-124.
- Li, Q., Lee, H.J., and Hwang, E.Y. (2010) "Characterization of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Based on Shear Properties", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2181(1), 1-10.
- Onyango, M. (2009) "Verification of Mechanistic Prediction Models for Permanent

- 36. Analysis of Variance
- 37. Artificial Neural Network (ANN)
- 38. Root Mean Square Error (RMSE)
- 39. Asphalt Mixtures and Bitumen Research Center

۱۰- مراجع

- دیواندری، ح. (۱۳۹۱) "ارایه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از منحنی تنش برشی متراکم کننده دورانی"، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران، تهران، ایران.
- زیاری، ح.، ایزدی، ا. و نصرآبادی، ع. (۱۳۸۶) "تعیین پارامتر چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تست مقاومت کششی غیر مستقیم"، سومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، ۱۱ تا ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۶، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی، مهندسی عمران، تبریز، ایران.
- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، شفابخش، غ. و حسامی، س. (۱۳۹۲). "ارایه 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، سال دهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۲، صفحه ۲۹-۴۳.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴)" ، تجدید نظر اول.
- عربانی، م. و میرعبدالعظیمی، م. (۱۳۹۰) "ارزیابی آزمایشگاهی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالت شیشه-ای"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- عامری، م.، مقدس نژاد، ف. و میرزاحسینی، م. (۱۳۸۹) "ارایه 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 ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- مدرس، ا. و کاوسی، ا. (۱۳۹۰) "مدلی برای تخمین مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیر

- Asphalt Mixtures Flow Number Prediction Model Using Gyrotory Curves ", International Journal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering, Vol. 11, No. 2, 125-133.
- Zaniwski, J.P., 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, May, 2004.
 - Zhou, F. Scullion, T. and Sun, L. (2004) "Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes", J. Transp. Eng., ASCE Vol. 130, No. 4, pp. 486–494.
 - Sunarjono, S. (2007) "Tensile Strength and Stiffness Modulus of Foamed Asphalt Appliedgrinding Representative of Indonesian Road Recycled Pavement Materials", Dinamika TEKNIK SIPIL, Volume 7, No.1, pp. 1 – 10.
 - Witczak, M.W. (2005) "Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database", NCHRP Report 547, Transportation Research Board, Washington, D.C.
 - Ziari, H., and Divandari, H. (2013) " Presenting Deformation in Asphalt Mixes Using Accelerated Pavement Testing", Ph.D. 3358802, Kansas State University.

Developing a Forecasting Model of Flow Number Using Marshall Parameters and Indirect Tensile Strength Test Results

H. Devandari, Assistant Professor, Islamic Azad University, Nowshahr Branch, Nowshahr, Iran.

A. Modarres, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Noshirvani Technical University of Babol, Babol, Iran.

M. Rostami Ankas, M.Sc. Grad., Islamic Azad University, Science and research, Ayatollah Amoli Branch, Amol, Iran.

S. M. Hosseini AliAbad, M.Sc. Grad., Islamic Azad University, Science and research, Ayatollah Amoli Branch, Amol, Iran.

E-mail: divandari@iauns.ac.ir

ABSTRACT

The rapid growth of traffic, especially heavy vehicles passing by repeated loading, poor quality asphalt mix and not reaching different the required density of asphalt pavement can cause asphalt damage. One of the most important types of flexible pavement failures ,is permanent deformation, which are known by the name rutting. Rutting is done by aggregation of Permanent deformation and irreversible through the pavement layers under traffic loading repeated. Through the all different layers involved in rutting, permanent deformation in the surface layer of pavement is allocated to the main contribution of rutting, thus Provide an appropriate mix design, attention to the potential risk of permanent deformation asphalt mixtures that weakness indication shear resistance in the asphalt is essential to be considered. On the other hand the specified flow number is beginning marker for Shear deformation in asphalt mixtures is known as a marker for evaluation of asphalt mixtures rutting. In this study, we have tried to build the asphalt samples with Marshall method, that including range of the aggregates, asphalt, aggregate, filer and bitumen percentage with the development of a relationship between obtained flow number from the dynamic creep test, tensile strength from indirect tensile test and the parameters of the Marshall mix design while providency administrative costs, predicted the mixture rutting status, without spending extra time. The accuracy of this model was confirmed by the artificial neural network, makes it possible to prevented produce concrete with low shear resistance in the laboratory and before factory manufacture. Thus, considerable savings in future time and costs there would be in mix design.

Keywords: Rutting, Flow Number, Dynamic Creep, Indirect Tensile Strength, Artificial Neural

