

مدلسازی عمق شیارشدگی آسفالت با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی

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

سیدفرهاد سادات خلردی، دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۶ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۳۳-۱۵

چکیده

روسازی راه‌ها، سرمایه ملی هر کشوری محسوب می‌شوند که سالیانه بخش عمده‌ای از بودجه عمرانی سازمان‌های ذیربط صرف ترمیم، بهسازی، حفظ و نگهداری آن‌ها می‌شود. تأمین اعتبار کافی برای این منظور چالشی است که مدیران و تصمیم‌گیران همواره با آن مواجه و دست به گریبان بوده‌اند. از طرفی، سال‌هاست که شیارشدگی به عنوان یکی از شایع‌ترین انواع خرابی‌های ایجادشده در این نوع روسازی‌ها، مطرح می‌باشد. این خرابی به مرور زمان و به علت تجمع تغییر شکل‌های ماندگار کوچک که در هر بارگذاری به وجود می‌آید، ایجاد می‌شود. افزایش میزان تغییر شکل‌های ماندگار که خود منجر به افزایش عمق شیار می‌گردد، می‌تواند مشکلات جدی در روسازی راه‌ها ایجاد نماید. بدین ترتیب تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه و پیش از تولید انبوه، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. آنچه به عنوان مسئله، پیش روی تحقیق حاضر مطرح است، بررسی تجربیات و روش‌های مطالعاتی در دنیا است تا ضمن تعیین پارامترهای مستقیم و تأثیرگذار در این خصوص، مدلی مناسب جهت برآورد عمق شیار در نمونه‌های آسفالتی، ارائه گردد. مدل ارائه شده، عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم را با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی پیش‌بینی می‌نماید. اعتبار مدل حاصل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم رقابت استعماری ارزیابی و تایید شده است.

واژه‌های کلیدی: شیارشدگی، خزش دینامیکی، ویل تراک، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم رقابت استعماری

۱- مقدمه

روسازی‌های آسفالتی منجر به افزایش کرنش دائمی تجمعی و به تبع آن ایجاد شیارشدگی بصورت فرورفتگی به موازات محور طولی راه در مسیر عبور چرخ وسایل نقلیه می‌گردد که می‌تواند باعث بروز پدیده هیدروپلانیگ^۱ و کاهش مقاومت لغزشی، کاهش ظرفیت زهکشی روسازی و تسریع خرابی‌های ناشی از رطوبت، کاهش ضخامت روسازی در نواحی شیار افتاده و در نهایت بروز ترک‌های خستگی در روسازی‌های

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 بروز خرابی شیارشدگی^۱ 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 (دیوانداری و همکاران، ۱۳۹۴). افزایش حجم بارگذاری

فنلاند، سوئد و استرالیا مورد استفاده قرار گرفته است. در حالی که دستگاه آزمایش شیارشدگی فرانسوی^۱ بیشتر در کشورهای اتریش، فرانسه، مجارستان و رومانی بکار گرفته شده است (Sheng and Ling, Ziari and Divandari, 2013) (2011). در زمینه مدلسازی نیز در سالهای اخیر مدل‌های زیادی جهت توصیف رفتار تغییرشکل دائمی و پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی ارائه شده است. هرچند تعیین میزان کرنش تجمعی^{۱۱}، هدف تمامی این مدل‌ها می‌باشد، اما از آنجایی که پارامترهای متعددی در این بین تاثیرگذار هستند، تغییر در مقدار هر یک از این پارامترها و یا نادیده گرفتن آن‌ها، نتایج بدست آمده را فقط محدود به همان شرایط در نظر گرفته شده می‌نماید. در ایران نیز تا کنون محققان زیادی به مدلسازی و پیش‌بینی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با روش‌های گوناگون پرداخته‌اند. دیواندری و همکاران در سال ۹۴ به ارائه مدل شیارشدگی برای مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال پرداختند. در این تحقیق 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 ویل تراک ارائه شد. مدل ارائه شده همزمان با ارائه طرح اختلاط آسفالت در آزمایشگاه، بدون صرف زمان و هزینه اضافی، مقاومت شیارشدگی آسفالت را پیش‌بینی می‌نماید (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی دیگر به بررسی مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی آسفالت با استفاده از پارامترهای خروجی متراکم کننده ژیراتوری^{۱۲} پرداخته شد. در این تحقیق که بازه نسبتاً وسیعی از انواع مصالح سنگی، قیر، دانه‌بندی و فیلر را شامل می‌شود، مدل مناسبی برای نمایش تغییرات تنش برشی ژیراتوری پیشنهاد شده است. سپس با استفاده از پارامترهای این مدل و شیب تراکم ژیراتوری، یک مدل ریاضی جهت تخمین عمق شیار ناشی از ویل تراک ارائه گردیده است. صحت این مدل نیز توسط شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک ارزیابی شده است (زیاری و همکاران،

انعطاف‌پذیر شود (Ziari and Divandari, 2013). این عوامل باعث شده است شیارشدگی یکی از مهمترین و پرهزینه‌ترین خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر باشد به نحوی که سالیانه بخش عمده‌ای از هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها صرف ترمیم آن می‌شود (عربانی و همکاران، ۱۳۹۶). به همین دلیل، محققان و پژوهشگران زیادی در سال‌های اخیر به دنبال ارائه روش‌هایی به منظور مدلسازی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم بوده‌اند به نحوی که بتوان با پیش‌بینی بروز این نوع خرابی، از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مرحله آزمایشگاهی و پیش از تولید کارخانه‌ای، جلوگیری نمود. در این پژوهش از نتایج آزمایش خزش دینامیکی^۳ و خروجی‌های متراکم‌کننده ژیراتوری به منظور ارائه یک مدل ریاضی برای تعیین عمق شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. این مدلسازی توسط نرم‌افزار SPSS انجام و مدل بدست آمده توسط الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی^۴ و الگوریتم رقابت استعماری^۵ اعتبارسنجی شده است.

۲- پیشینه پژوهش

بطور کلی روش‌های بررسی و پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی به دو روش کلی آزمایشگاهی و مدلسازی ریاضی تقسیم می‌شوند. پروژه NCHRP 9-19 آزمایش‌های مدول دینامیکی، زمان روانی^۶ و تغییرشکل ماندگار تحت بارهای تکرار شونده^۷ را به عنوان پیشنهاد‌های اصلی بررسی پتانسیل شیارشدگی، معرفی می‌کند. به علاوه تست اثر جای چرخ هامبورگ^۸ نیز برای بررسی پتانسیل شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد (احدی و متولی‌زاده، ۱۳۹۴). علاوه بر این‌ها پژوهشگران مختلف از آزمایش‌های متعدد دیگری از جمله آزمایش برش مستقیم، برش تکرار شونده در ارتفاع ثابت^۹، آزمایش خزش دینامیکی و شیارشدگی به منظور ارزیابی تغییرشکل‌های دائمی در روسازی‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. آزمایش خزش دینامیکی به طور گسترده‌ای در کشورهای

نهایی مطرح شد. فرض اصلی بر این بود که چون شیارشدگی ناشی از ضعف مقاومت برشی آسفالت است و میزان انرژی لازم برای تراکم نمونه می‌تواند نمادی از مقاومت آسفالت باشد، پس می‌توان انتظار داشت که مقدار انرژی تراکم با عمق شیار مرتبط باشد (Leonardi, 2015). هرچند برخی از مدل‌های ارائه شده همبستگی خوبی را بین این شاخص‌ها و عمق شیار نشان دادند، اما آزمایش‌های تکمیلی نشان داد که شاخص‌های بدست آمده از نمونه‌های مشابه متفاوت هستند. تحقیقات بعدی مشخص کرد که مقدار این شاخص‌ها به شدت تحت تاثیر چیدمان سنگدانه‌ها در قالب می‌باشد (Feyissa, 2017). به همین دلیل مدل‌های شیارشدگی ارائه شده توسط این پارامترها برای نمونه‌های مشابه، نتایج متفاوتی ارائه می‌کردند. پس از این که قابلیت تعیین تنش برشی نمونه هنگام تراکم توسط شرکت‌های سازنده متراکم کننده دورانی به این دستگاه اضافه گردید، پژوهشگران با تعریف پارامترهای جدید، مدل‌های جدیدی اضافه نمودند. به عنوان مثال پارامترهایی نظیر حداکثر مقاومت برشی، تعداد دوران متناظر با حداکثر برش و همچنین شیب برش با استفاده از منحنی برشی متراکم کننده دورانی تعریف شدند (Anderson et al., 2002). در این تحقیق نیز سعی شده است تا با استفاده از خروجی‌های حاصل از متراکم کننده دورانی و نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی، مدلی مناسب برای پیش‌بینی عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شود.

۳- بیان مسئله

از آنجایی که هیچگونه آزمایشی در روش طرح اختلاط مارشال به منظور ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تعریف نشده است و در عین حال این روش، پرکاربردترین روش طرح اختلاط روسازی‌های آسفالتی در ایران است، مدل‌سازی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی به منظور ارائه روشی که بتوان در مرحله طرح اختلاط، از مقاومت کافی نمونه‌ها در مقابل این خرابی اطمینان حاصل نمود، ضروری به

در سال ۸۹ نیز عامری و همکاران با استفاده از پارامترهای طرح اختلاط مارشال و بررسی تاثیر این پارامترها بر عدد روانی^{۱۳} به ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. در این تحقیق با ساخت بیش از ۲۵۰ نمونه آسفالتی به روش مارشال و با انجام آزمایش‌های استحکام مارشال و خزش دینامیکی، ضمن ارائه مدلی جهت پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، نسبت به بررسی تاثیر پارامترهای حاصل از روش مارشال بر عدد روانی اقدام گردید. در این تحقیق ضمن ارزیابی پارامترهای مارشال در کنترل شیارشدگی، مدلی برای پیش‌بینی عدد روانی ارائه شد. این مدل با داشتن حدود مطلوب پارامترهای آماری، دارای دقت خوبی در پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی بود (عامری، مقدس‌نژاد و میرزاحسینی، ۱۳۸۹). طبق روش طرح اختلاط سوپرپیو، نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه باید با دستگاه متراکم کننده ژیراتوری ساخته شوند. تحقیقات نشان داده است که نمونه‌های ساخته شده با این متراکم کننده شباهت زیادی به آسفالت متراکم شده در کارگاه دارند. نوع عملکرد این متراکم کننده باعث تراکم همزمان نمونه‌ها تحت تاثیر تنش فشاری قائم و تنش برشی ناشی از عکس‌العمل بدنه قالب می‌گردد. خروجی‌های متنوع این دستگاه هنگام تراکم نمونه‌ها، توجه محققین را به سوی استفاده از این متراکم کننده در بررسی وضعیت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی معطوف نمود. برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ استفاده از شیب تراکم حاصل از متراکم کننده دورانی در پیش‌بینی بروز شیارشدگی مطرح شد. در ادامه نشان داده شد که شیب تراکم شاخصی از اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها می‌باشد (Anderson et al., 2002, Zhu et al., 2016). هرچند سایر تحقیقات نیز تاثیر شیب تراکم را بر مقاومت برشی آسفالت اثبات نمودند، اما در نهایت مشخص شد که این پارامتر به تنهایی نمی‌تواند در پیش‌بینی وضعیت مقاومت برشی آسفالت استفاده شود (Williams et al., 2016). در تحقیقات بعدی پیشنهاد استفاده از شاخص‌های انرژی از جمله انرژی تراکم، انرژی چگالش و شاخص چگالش

۵- فرضیات تحقیق

نتایج تحقیقات متعدد نشان داده است که از بین عوامل بروز شیارشدگی در آسفالت، عامل تغییر شکل دائمی در لایه آسفالتی نقش اصلی را به عهده دارد (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۷) (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲). در این پژوهش نیز از تاثیر تراکم ناکافی لایه‌های زیرین و سایش سطح روسازی صرفنظر گردیده و عامل کمبود مقاومت برشی لایه آسفالتی و به تبع آن، تغییرشکل‌های ماندگار روسازی به عنوان عامل اصلی شیارشدگی فرض شده‌اند. همچنین به منظور تراکم نمونه‌ها با متراکم کننده ژیراتوری، بار ترافیکی به میزان یک میلیون محور معادل هم ارز و میانگین بیشترین دمای هوا در هفت روز متوالی سال، ۴۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

۶- روش تحقیق

در این پژوهش پس از تهیه مصالح سنگی، فیلر و قیر مورد نیاز، آزمایش‌های کیفی هر یک انجام و با انتخاب دانه‌بندی مناسب، قیر بهینه ترکیب‌های مختلف آسفالت به روش مارشال تعیین شد. نمونه‌های مورد نظر با قیر بهینه بدست آمده در مرحله قبل، با استفاده از متراکم کننده ژیراتوری ساخته شدند. در نهایت آزمایش‌های شیارشدگی و خزش دینامیکی برای همه ترکیب‌ها، انجام شد. در ادامه هر مرحله به طور کامل شرح داده می‌شود.

۶-۱- مواد، مصالح و آزمایش‌های کیفی آنها

در این تحقیق سعی شد مواد و مصالح مورد استفاده حتی‌الامکان طوری انتخاب شوند که بازه وسیعی از مواد و مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت آسفالت در کشور را شامل شوند.

۶-۱-۱- مصالح سنگی

جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی از دو نوع مصالح سنگی استفاده شد.

نظر می‌رسد. خزش دینامیکی، یکی از مهمترین آزمایش‌ها در جهت تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد (خاوندی و منصور، ۱۳۹۳). اثبات شده است که مهمترین خروجی این آزمایش یعنی عدد روانی، با مقاومت روسازی در مقابل شیارشدگی رابطه مستقیم دارد (Irfan et al., 2017). بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از نتایج آزمایش خزش دینامیکی و ویل تراک ضمن تعیین پارامترهای مستقیم و تاثیرگذار، مدلی مناسب جهت برآورد عمق شیار ایجاد شده در مخلوط‌های آسفالتی گرم ارائه گردد.

۴- ضرورت تحقیق

تغییرشکل دائمی^{۱۴} آسفالت، اهمیت زیادی در عملکرد روسازی دارد. شیارشدگی علاوه بر کاهش قابلیت بهره‌برداری و در پی آن عمر مفید روسازی‌ها، بر ایمنی وسایل نقلیه و استفاده‌کنندگان از راه نیز تاثیر منفی می‌گذارد. امروزه برای اندازه‌گیری و ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه‌ها، اغلب از آزمایش‌های خزش دینامیکی و اثر جای چرخ با استفاده از تجهیزات پیشرفته و گران قیمت آزمایشگاهی نظیر دستگاه UTM و ویل تراک استفاده می‌شود. عواملی نظیر قیمت بالای این دستگاه‌ها، لزوم نیروهای آموزش دیده و متخصص و همچنین زمان‌بر بودن کار با این دستگاه‌ها موجب شده است، استفاده همزمان این دو دستگاه در بسیاری از آزمایشگاه‌ها مقدور نباشد. از طرفی برای انجام آزمایش ویل تراک، لازم است نمونه‌های دالی شکل ساخته شوند که مطمئناً تراکم و مشخصات وزنی-حجمی متفاوتی در قیاس با نمونه‌های استوانه‌ای ژیراتوری دارند که این مساله نتایج آزمایش را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو لزوم ارائه روشی ساده که ضمن دارا بودن دقت لازم، بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه اندک، وضعیت نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با ژیراتوری را از نظر شیارشدگی در آزمایشگاه مشخص سازد، احساس می‌شود.

۶-۱-۳- قیر و آزمایش‌های کیفی

قیر مورد نیاز از نوع قیر خالص ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ شرکت نفت پاسارگاد انتخاب شد. لازم به ذکر است آزمایش‌های کیفی قیر نیز مطابق آنچه در نشریه ۲۳۴ توصیه شده است، انجام و نتایج با حدود مجاز نشریه کنترل شد. نتایج این آزمایش‌ها برای هر دو نوع قیر مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است.

۶-۲- دانه‌بندی مورد استفاده

دانه‌بندی مصالح سنگی نیز مطابق با دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ و ۵ نشریه ۲۳۴ برای مخلوط‌های آسفالتی گرم انتخاب شده است. شکل (۱) نمودار دانه‌بندی انتخاب شده و حدود مجاز نشریه ۲۳۴ را نشان می‌دهد. در ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد نیاز این پژوهش، حد وسط دانه بندی‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت.

مصالح آهکی از معدن اسب چران رودهن و مصالح سیلیسی از معدن ریوند سبزواری تهیه شده‌اند. با انجام آزمایش‌های مربوط به مصالح سنگی طبق آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، اطمینان حاصل شد این مصالح حدود مجاز آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران را از نظر حداقل میزان شکستگی، حداکثر سایش، حداکثر جذب آب و حداکثر سنگدانه‌های پهن و دراز برآورده می‌سازند. مقادیر استاندارد و نتایج هر یک از آزمایش‌های فوق در جدول (۱) ارائه گردیده است.

۶-۱-۲- فیلر مورد استفاده

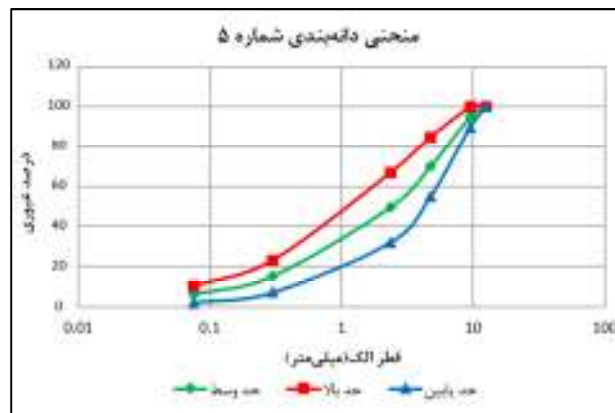
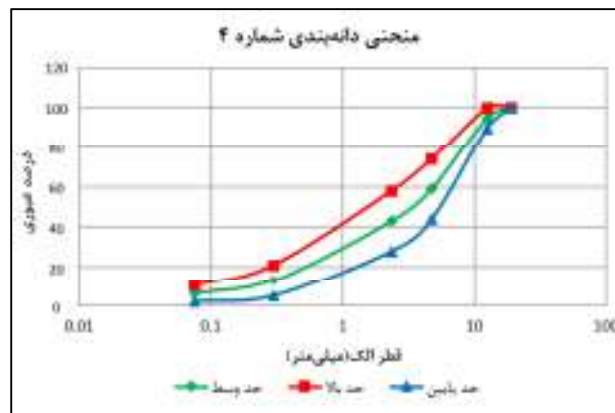
دو نوع فیلر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. فیلر پودر سنگ از معدن ساوه و فیلر پودر آهک (گرد سنگ کربنات کلسیم)، از معدن قم تهیه گردید. دو نوع فیلر مذکور، پس از عبور از الک نمره ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های کیفی مصالح سنگی

نتایج آزمایش نمونه‌ها		استاندارد			خصوصیات فیزیکی
		حداکثر	حداقل	مشخصه	
سنگ آهکی	سنگ سیلیسی				وزن مخصوص مصالح ریزدانه (gr/cm^3)
۲/۶۱	۲/۷۸	-	-	ASTM C127	
۰/۷	۰/۳	۲/۵	-	ASTM C127	جذب آب (%)
۲/۶۳	۲/۷۴	-	-	ASTM C128	وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه (gr/cm^3)
۲۳/۵	۱۵	۳۰	-	ASTM C131	سایش لس آنجلس (%)
۹۴	۹۱	-	۸۰	ASTM D5821	شکستگی در دو سمت (%)
۹۷	۹۵	-	۵۰	ASTM D5821	شکستگی در یک سمت (%)
۷۴	۶۸	-	۴۵	ASTM D2419	ارزش ماسه‌ای (%)

جدول ۲. نتایج آزمایش های قیر مورد استفاده در پژوهش

مشخصات استاندارد قیر ۱۰۰- ۸۵	نتایج قیر ۱۰۰- ۸۵	مشخصات استاندارد قیر ۷۰- ۶۰	نتایج قیر ۷۰- ۶۰	استاندارد آزمایش		آزمایش های قیر
				AASHTO	ASTM	
-	۱/۰۱۱	-	۱/۰۱۷	T228	D70	وزن مخصوص قیر (gr/cm ³)
۸۵-۱۰۰	۸۵	۶۰-۷۰	۶۰	T49	D5	درجه نفوذ قیر (10 ⁻¹ mm)
۴۵-۵۲	۴۷/۶	۴۹-۵۶	۵۳	T53	D36	نقطه نرمی قیر (°C)
حداقل ۱۰۰	+۱۰۰	حداقل ۱۰۰	+۱۰۰	T51	D113	میزان کشش پذیری قیر (cm)
حداقل ۲۳۲	۳۰۴	حداقل ۲۳۲	۳۰۰	T48	D92	درجه اشتعال قیر (°C)
حداقل ۹۹	۹۹/۷۶	حداقل ۹۹	۹۹/۶	T44	D2042	حلالیت قیر (%)
حداکثر ۱	۰/۰۷	حداکثر ۰/۸	۰/۰۳	T179	D1754	افت وزنی قیر (%)

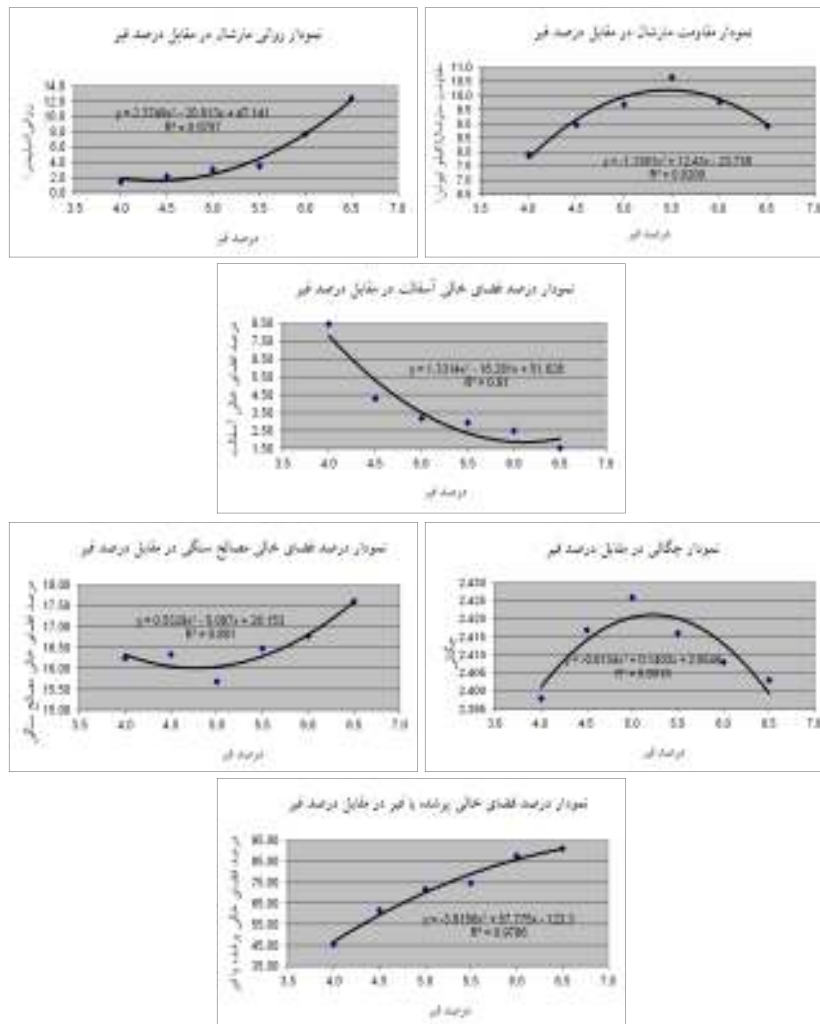


شکل ۱. حد پایین، حد وسط و حد بالای دانمبندی های پیوسته شماره ۴ و ۵ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، ۱۳۹۰)

۳-۶- تعیین درصد قیر بهینه

در این پژوهش جهت تعیین درصد قیر بهینه (OBC)، از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شده است. در این روش برای هر یک از ترکیبات مصالح سنگی، فیلر و قیر با دانه بندی انتخاب شده، ابتدا سه نمونه در درصدهای قیر ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد به روش استاندارد مارشال (ASTM D-1559) ساخته شد. سپس درصد قیر بهینه به کمک منحنی های مارشال (شکل

(۲)) بدست آمد. با توجه به تنوع مصالح سنگی، قیر و فیلر و انتخاب دو نوع دانه بندی، در مجموع ۲۸۸ نمونه آسفالتی جهت تعیین قیر بهینه به روش مارشال ساخته شد و در نهایت میزان قیر بهینه برای شانزده نوع ترکیب آسفالتی مختلف مطابق جدول (۳) تعیین گردید.



شکل ۲. منحنی های مارشال (مقاومت، روانی، درصد فضای خالی آسفالت، چگالی، VMA و VFA در مقابل درصد قیر) برای یک ترکیب مورد نظر

نام هر نمونه متشکل از چهار بخش می باشد. بخش اول، نوع سنگدانه (حرف L برای سنگدانه آهکی و حرف S برای

۳-۶-۱- نامگذاری ترکیب های مختلف

شماره چهار و پنج) و بخش چهارم نوع قیر (عدد ۶ برای قیر ۷۰-۶۰ و عدد ۸ برای قیر ۱۰۰-۸۵) را نشان می‌دهند.

سنگدانه سیلیسی)، بخش دوم، نوع فیلر (حرف P برای فیلر پودر سنگ و حرف F برای پودر آهک)، بخش سوم نوع دانه بندی (اعداد ۴ و ۵ به ترتیب جهت نمایش دانه بندی‌های

جدول ۳. نتایج طرح اختلاط مارشال و مقدار قیر بهینه برای شانزده ترکیب آسفالتی مختلف

LF58	LP58	LF56	LP56	LF48	LP48	LF46	LP46	SF58	SP58	SF56	SP56	SF48	SP48	SF46	SP46	ترکیب
6.00	5.80	6.24	5.92	5.90	5.70	6.16	5.81	5.25	5.02	5.45	5.24	5.15	4.96	5.40	5.05	(OBC)

اندازه‌گیری می‌شود. نتایج این آزمایش در جدول (۴) ارائه شده است.

۶-۴- ساخت نمونه‌های اصلی

برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری استفاده شده است. با فرض یک میلیون محور معادل هم‌ارز و میانگین بیشترین دمای هوای برابر ۴۰ درجه سانتی‌گراد در هفت روز متوالی سال، به کمک جداول توصیه شده توسط پژوهشکده حمل و نقل، تعداد دوران اولیه، دوران طرح و دوران حداکثر به ترتیب برابر با ۸، ۹۵ و ۱۵۰ تعیین گردید (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۶). برای هرکدام از ترکیبات موجود به ازای سه درصد قیر مختلف شامل درصد قیر بهینه و درصد قیر بهینه $\pm 0.5\%$ برای هرکدام از شرایط یکسان به منظور اطمینان از صحت نتایج سه نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. بنابراین در مجموع ۱۴۴ نمونه آسفالتی با استفاده از متراکم کننده ژیراتوری برای هرکدام از آزمایش‌های شیارشدگی و خزش دینامیکی ساخته شد.

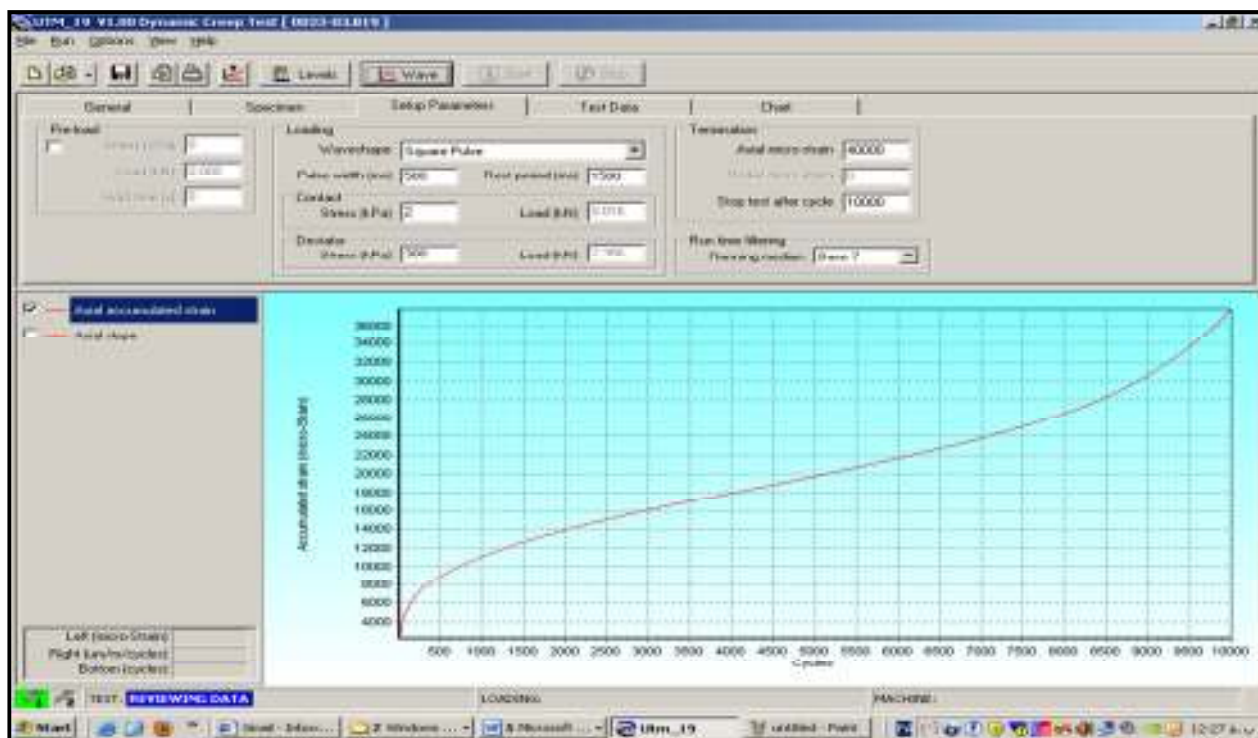
۷-۲- آزمایش خزش دینامیکی

هدف اصلی این آزمایش مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌باشد. مهمترین خروجی این آزمایش نمودار تغییرات کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد که از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود. تعداد سیکل بارگذاری معادل با شروع ناحیه سوم، عدد روانی نامیده می‌شود. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که عدد روانی حاصل از آزمایش خزش دینامیکی با مقاومت برشی آسفالت رابطه مستقیمی دارد. بنابراین می‌تواند پیش‌بینی کننده مناسبی برای شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی باشد. در این تحقیق آزمایش خزش دینامیکی با دستگاه UTM-5 و مطابق با استاندارد استرالیا انجام شده است. بر این اساس بارگذاری بصورت موج مربعی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، که شامل ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه دوره استراحت می‌باشد، اعمال گردید. مقدار تنش تماسی برابر ۲ کیلوپاسکال و تنش انحرافی معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال تنظیم گردید. شرط پایان آزمایش نیز رسیدن به کرنش تجمعی محوری ۴۰۰۰۰ میکرو و تعداد سیکل بارگذاری ۱۰۰۰۰ سیکل، هرکدام زودتر اتفاق بیفتند، مطابق شکل (۳) تعیین شد. نتایج این آزمایش در جدول (۴) نشان داده شده است.

۷-۷- آزمایش‌ها و نتایج

۷-۱- آزمایش اثر جای چرخ بارگذاری (ویل تراک)

در این تحقیق، از دستگاه ویل تراک جهت شبیه‌سازی تاثیر چرخ وسایل نقلیه بر نمونه متراکم شده آسفالتی استفاده شده است. به منظور انجام این آزمایش که تحت عنوان شیارشدگی شناخته می‌شود، نمونه‌های متراکم شده آسفالتی تحت فشار ۶۹۰ کیلو پاسکال با سرعت بارگذاری ۶۰ دور در دقیقه و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بارگذاری شده و عمق شیار بوجود آمده پس از ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری برحسب میلی‌متر



شکل ۳. تنظیمات اعمال بار و شرایط پایان آزمایش در آزمایش خزش دینامیکی به همراه نمودار خروجی

G_s : تنش برشی ژیراتوری در تعداد دوران مشخص برحسب کیلوپاسکال،

A_1 : شیب منحنی لگاریتمی تنش برشی،

A_2 : عرض از مبدا منحنی برحسب کیلوپاسکال می‌باشد.

برای تمامی نمونه‌ها این مدل‌سازی انجام و برای هر نمونه، شیب منحنی لگاریتمی تنش برشی و عرض از مبدا این منحنی به صورت مجزا تعیین گردید. این پارامترها برای تمامی نمونه‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴) هم ملاحظه می‌شود، هر منحنی تنش برشی، یک مقدار حداکثری دارد. این مقدار برش نیز که با (S_m) نمایش داده می‌شود، برای هر نمونه تعیین و ثبت گردید.

۳-۷- پارامترهای حاصل از مدل‌سازی تنش برشی

ژیراتوری

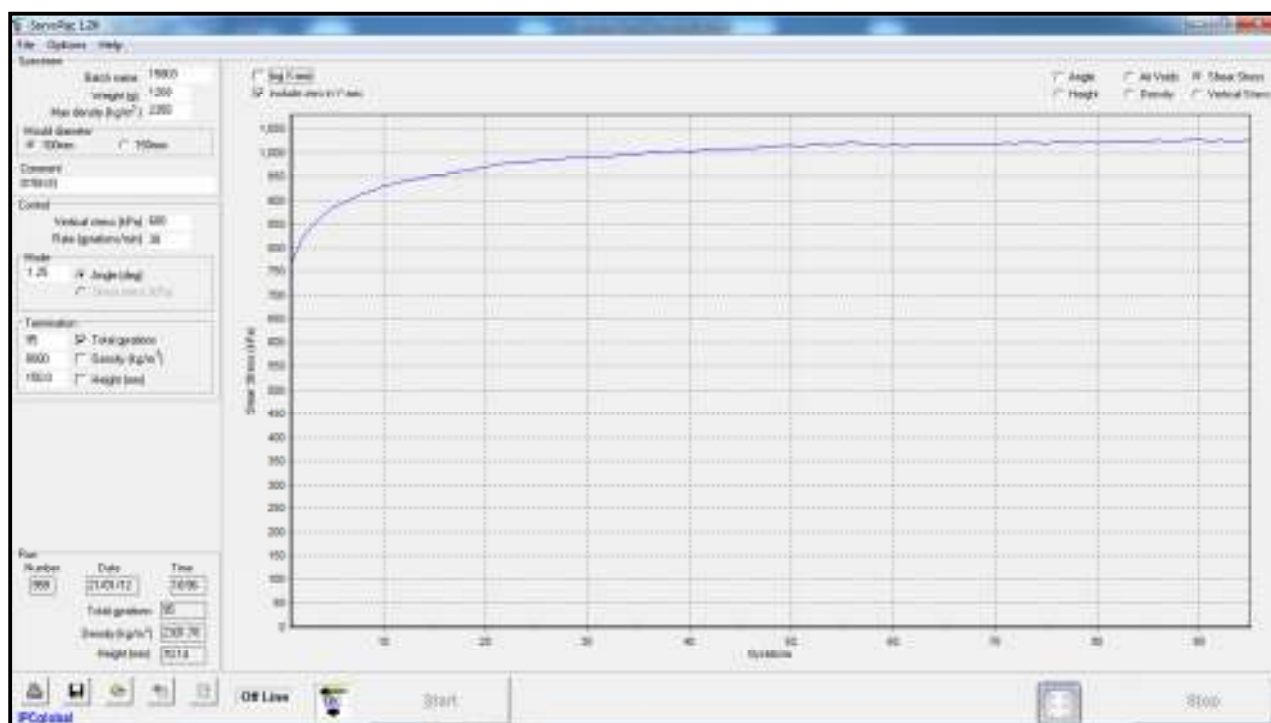
یکی از خروجی‌های متراکم کننده ژیراتوری، منحنی تنش برشی در مقابل تعداد دوران می‌باشد (شکل ۴). به منظور بدست آوردن پارامترهای بیشتر، ابتدا یک مدل‌سازی از تنش برشی به عنوان پارامتر وابسته در مقابل تعداد دوران به عنوان پارامتر مستقل انجام شد. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که مدل لگاریتمی به شکل رابطه (۱) بهترین نتیجه را به همراه دارد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۲).

$$G_s = A_1 \ln(N) + A_2 \quad (1)$$

که در این رابطه:

جدول ۴. نتایج حاصل از مترامک کننده ژیراتوری و آزمایش های شیارشدگی و خزش دینامیکی

LP48									LP46									ترکیب	
(OBC)+0.5			(OBC)			(OBC)-0.5			(OBC)+0.5			(OBC)			(OBC)-0.5			میزان	
۲۷۳	۴۸۵	۲۷۳	۴۱۱	۵۲۹	۲۲۲	۹۹۵	۱۱۲	۴۵۹	۳۲۵	۱۳۵	۱۲۴	۱۸۴	۱۸۴	۱۳۵	۱۶۵	۱۸۱	۱۳۶	۳۸۷	A1
۱۷۹	۱۷۸	۱۷۹	۱۹۶	۱۱۶۹	۱۵۱	۱۲۳	۱۵۱	۱۲۴	۱۸۲	۱۳۳	۱۳۳	۱۹۸	۱۳۵	۱۷۷	۱۷۵	۱۳۸	۱۳۲	۱۳۲	A2
۴۸۷۵	۴۷۵۰	۲۵۵۰	۵۵۰۰	۳۳۰۰	۳۸۵۰	۱۵۵۰	۱۲۵۰	۱۴۷۵	۶۵۰۰	۶۹۳۸	۷۳۷۵	۵۰۰۰	۵۲۵۰	۵۱۲۵	۱۳۰۰	۲۰۰۰	۱۲۲۵	۱۲۲۵	Fn
۸۴۵	۱۰۱۹	۱۰۴۳	۱۰۴۱	۱۰۳۷	۱۰۴۴	۱۰۵۲	۱۰۱۶	۱۰۹۹	۱۰۶۸	۱۰۷۴	۱۰۳۸	۱۰۲۶	۱۰۶۵	۱۰۸۳	۱۰۱۹	۱۰۶۵	۱۰۶۵	۱۰۶۵	Sm
۶۵۳	۳۱۹۷	۳۱۴۶	۴۱۰۷	۲۱۵۶	۳۱۸۸	۳۱۵۵	۲۱۹۱	۲۱۶۹	۷۱۰۵	۳۱۴۹	۵۱۷۸	۳۱۸۵	۴۱۳۴	۲۱۸۲	۲۱۸۴	۴۱۳۳	۳۱۸۹	۳۱۸۹	Wt
LF48									LF46									ترکیب	
۱۱۴۴	۱۱۰	۱۱۵۸	۱۱۶۶	۱۱۶۹	۱۲۱۷	۱۰۷۳	۱۱۲۶	۱۱۳۹	۱۱۰۴	۱۱۹۶	۱۱۱۵	۱۱۲۱	۱۱۰۴	۱۲۵۳	۱۲۴۹	۱۱۷۱	۱۱۶۵	۱۱۶۵	A1
۱۶۱	۱۷۳	۱۲۴	۱۶۹/۱	۱۶۵	۱۸۴	۱۵۵	۱۲۸	۱۷۹	۱۹۴	۱۲۷	۱۹۱	۱۸۴	۱۹۱	۱۶۳	۱۶۸	۱۶۸	۱۶۴	۱۶۴	A2
۸۴۰	۲۴۴۸	۲۴۴۰	۸۱۲	۲۱۴۴	۱۶۸۰	۱۸۲۴	۱۳۷۲	۱۱۷۶	۱۸۱۶	۷۱۴	۹۰۶	۵۳۸	۲۳۵	۴۵۰	۲۳۸	۵۳۸	۴۴۴	۴۴۴	Fn
۹۹۸	۹۹۲	۱۰۱۰	۱۰۰۷	۹۸۰	۱۰۰۸	۱۰۲۹	۱۰۱۶	۱۰۴۱	۹۹۲	۹۹۵	۹۹۳	۹۸۷	۱۰۰۱	۹۹۵	۹۸۹	۱۰۰۷	۹۹۰	۹۹۰	Sm
۳۷۴	۵۹۶	۱۰۶۱	۴۱۴	۶۴۰	۶۳۳	۱۱۴۰	۱۰۷۹	۶۶۰	۳۸۵۰	۶۰۶	۷۱۸۷	۸۰۷	۴۱۵۸	۴۱۵۹	۸۳۴	۵۰۸	۵۰۹	۵۰۹	Wt
LP58									LP56									ترکیب	
۱۸۷۷	۱۳۷۴	۱۹۴۴	۱۹۳۸	۱۵۲۲	۱۸۴۵	۱۶۹۳	۱۷۵۳	۱۵۴۳	۱۲۷۵	۱۷۱۶۸	۱۷۴۴	۱۶۱۴	۱۳۳۳	۱۰۱	۱۹۷	۱۸۳	۱۵۲۴	۱۵۲۴	A1
۱۲۴	۱۴۸	۱۵۷	۱۴۷	۱۰۴	۱۲۵	۱۳۷	۱۶۷	۱۵۴	۱۵۵	۵۶۴/۹	۱۴۶	۱۵۵	۱۰۳	۶۹۸/۳	۱۳۷	۱۴۶	۱۸	۱۸	A2
۵۱۲۵	۴۸۷۵	۴۱۲۵	۳۱۲۵	۴۱۲۵	۵۶۲۵	۴۷۵۰	۲۳۷۵	۲۵۵۰	۳۸۷۵	۳۵۳۳	۳۲۵۰	۵۷۵۰	۴۶۲۵	۴۱۲۵	۳۵۰۰	۲۹۰۰	۳۲۰۰	۳۲۰۰	Fn
۹۰۰	۸۶۶	۸۲۷	۸۱۸	۸۳۷	۸۳۶	۸۶۰	۸۶۳	۸۲۷	۸۳۱	۸۶۳	۸۶۹	۸۱۳	۹۳۰	۹۰۸	۸۷۶	۸۷۳	۸۴۵	۸۴۵	Sm
۱۳۳۷	۶۷۲	۹۱۴	۴۱۲	۳۱۵۸	۲۱۹۵	۲۸۷۲	۱۴۵۰	۲۱۵۳	۶۹۴	۰۹۲	۳۱۰۹	۵۱۷۰	۰۹۲	۱۱۹۳	۳۱۴۵	۱۱۳۸	۱۱۳۸	۱۱۳۸	Wt
LF58									LF56									ترکیب	
۱۰۷۵	۳۴۷۱	۱۰۵۱	۱۳۵۳	۱۱۸	۴۶۶۲	۱۳۴	۱۰۰۴	۱۰۷۶	۱۰۸۷	۱۶۵۱	۱۲۳۳	۴۵۲۱	۱۰۶۳	۱۶۱	۱۶۱	۱۹۰۷	۱۷۴۸	۱۷۴۸	A1
۱۴۲	۸۳۵/۸	۱۵۸	۱۵۶	۱۷۹	۱۹۸	۱۶۲	۱۶۳	۱۲۹	۱۴۷	۸۳۰/۶	۱۱	۱۵	۱۰۱	۱۲۲	۷۸۰/۶	۷۸۵/۵	۱۲۶	۱۲۶	A2
۳۳۴۴	۲۳۴۴	۲۷۷۶	۳۳۹۲	۲۳۱۲	۱۶۴۰	۲۷۴۴	۱۸۸۸	۲۶۴۰	۳۳۶۶	۲۵۴۴	۴۰۲۴	۳۹۲۸	۲۴۸۰	۱۴۱۶	۱۴۲۴	۲۰۲۴	۱۵۲۴	۱۵۲۴	Fn
۹۹۵	۹۹۹	۹۹۵	۱۰۲۵	۱۰۲۶	۱۰۰۷	۱۰۳۸	۱۰۵۲	۱۰۴۹	۱۰۲۰	۱۰۲۵	۱۰۱۶	۱۰۱۶	۱۰۱۰	۱۰۲۹	۱۰۳۱	۱۰۳۷	۱۰۴۶	۱۰۴۶	Sm
۶۳۶	۷۱۹۴	۱۰۱۱۲	۴۱۷۷	۶۳۰	۵۱۸۳	۷۱۴۸	۵۱۸۶	۶۱۴۴	۷۱۸۸	۸۱۸۷	۶۱۳۳	۵۱۸۸	۴۱۷۵	۵۱۸۵	۴۱۷۰	۵۱۸۵	۵۱۸۸	۵۱۸۸	Wt
SP48									SP46									ترکیب	
۱۱۶	۶۴۴	۱۵۹۴	۴۹۶۷	۱۱۷	۱۵۹۲	۱۷۵۷	۱۰۹۸	۱۵۷۲	۱۳۴۴	۱۹۳۳	۱۹۹۹	۶۰۹	۱۳۵۸	۶۰۵۳	۱۵۲۲	۱۵۹۳	۶۰۶	۶۰۶	A1
۱۸۱	۱۳۸	۹۶۷/۲	۱۲۶	۱۲۳	۱۸	۱۸	۱۶۶	۱۰۷	۳۱	۱۲۷	۸۴۳/۵	۱۵۵	۱۸۹	۱۹۴	۱۶	۱۴	۱۲	۱۲	A2
۷۳۲	۹۴۸	۹۰۰	۳۴۴	۳۶۱۶	۴۸۶	۶۸۸	۳۵۶	۳۲۴	۸۶۰	۷۵۶	۶۸۴	۷۸۸	۱۸۷۲	۶۶۴	۲۷۰۴	۶۲۰	۳۲۰	۳۲۰	Fn
۱۰۷۳	۱۰۷۱	۱۱۴۱	۱۰۶۸	۱۰۴۳	۱۰۵۵	۱۰۷۳	۱۰۵۳	۱۰۷۶	۱۰۷۷	۱۰۷۶	۱۰۸۶	۱۰۹۴	۱۰۸۸	۱۰۸۵	۱۰۶۷	۱۰۸۶	۱۰۷۴	۱۰۷۴	Sm
۵۱۴	۵۱۴	۱۱۵۷	۶۳۵	۴۱۳۴	۵۱۹۷	۳۱۹۷	۳۱۷۱	۷۱۱	۹۰۵۵	۶۱۴۷	۳۱۸۰	۶۰۶	۷۱۹۱	۵۱۵۹	۸۲۰	۷۱۳۵	۸۷۱	۸۷۱	Wt
SF48									SF46									ترکیب	
۱۱۲	۱۹۸۳	۱۰۷۹	۱۹۶۷	۱۹۹۱	۱۰۰۷	۱۵۰۶	۱۱۷	۱۱۳۳	۱۳۸	۱۲۷۱	۱۵۰۹	۱۲۲	۴۶۸۷	۱۰۴	۱۰۸۸	۱۱۷	۱۰۷	۱۰۷	A1
۱۰۲	۸۴۶/۳	۱۴	۸۱۸/۲	۱۲۳	۱۲۲	۱۶	۱۵	۱۰۱	۱۸	۱۲۴	۱۰۴	۸۴۹/۲	۱۴	۱۶	۱۰۴	۱۲۵	۱۹۷	۱۹۷	A2
۷۳۲	۹۴۸	۹۰۰	۳۴۴	۳۶۱۶	۴۸۶	۶۸۸	۳۵۶	۳۲۴	۳۰۰	۱۳۱۲	۱۴۰۸	۱۳۹۲	۵۴۴	۸۸۸	۴۳۶	۳۲۶	۵۶۴	۵۶۴	Fn
۱۰۲۶	۱۰۳۱	۱۰۱۹	۱۰۳۷	۱۰۲۲	۱۰۴۰	۱۰۱۶	۱۰۳۱	۱۰۲۰	۱۰۲۹	۱۰۳۸	۱۰۲۵	۱۰۴۰	۱۰۴۱	۱۰۴۹	۱۰۲۵	۱۰۳۱	۱۰۳۴	۱۰۳۴	Sm
۲۰۸	۷۱۴۵	۴۱۵۱	۲۱۵۱	۵۱۱۲	۵۱۵۴	۲۱۷۱	۴۱۵۰	۵۱۲۴	۲۱۴۰	۳۱۶۸	۳۱۱۵	۰۱۴۵	۲۱۲۹	۲۱۹۶	۳۱۹۶	۶۱۶۲	۸۱۷۵	۸۱۷۵	Wt
SP58									SP56									ترکیب	
۱۳۸	۱۲۳	۱۶۸	۵۰۸۸	۱۹۲۳	۱۴۱۷	۱۸۱۳	۵۳/۹۶	۱۸۲	۱۰۸۴	۳۲/۴۹	۱۰۶۹	۵۸۵	۶۴۴	۴۷/۱۵	۱۹۵	۴۹/۹۹	۳۸۴	۳۸۴	A1
۱۴۳	۱۶	۱۰۴	۷۵	۳۱	۳۱	۸۳	۱۷	۱۷۹	۳۸	۱۴۵	۱۵۶	۱۵۸	۷۱	۱۴۳	۱۷	۸۵۱/۳	۷۱	۷۱	A2
۴۴۰۰	۶۱۱۲	۲۳۳۲	۱۶۱۶	۱۶۰۸	۱۰۲۰	۵۱۲	۳۹۶	۶۷۲	۳۴۸۸	۱۸۲۴	۲۴۴۰	۹۰۰	۸۸۸	۷۴۴	۷۶۴	۶۶۸	۴۴۴	۴۴۴	Fn
۱۰۸۵	۱۰۷۴	۱۰۸۰	۱۰۸۸	۱۰۸۹	۱۰۹۴	۱۰۷۹	۱۰۷۶	۱۰۸۰	۱۰۷۰	۱۰۷۳	۱۰۴۶	۱۰۵۵	۱۰۶۱	۱۰۸۳	۱۰۵۲	۱۰۸۹	۱۰۷۰	۱۰۷۰	Sm
۷۱۵۸	۵۱۴۷	۷۱۲۵	۶۱۶۲	۳۱۹۲	۳۱۹۹	۳۱۶۲	۵۱۷۳	۶۱۳۱	۷۱۲۶	۸۱۳۸	۶۱۹۹	۳۱۴۳	۵۱۱۱	۶۰۹	۴۱۴۷	۵۱۴۰	۷۱۱۷	۷۱۱۷	Wt
SF58									SF56									ترکیب	
۱۴۸۴	۱۵۰۶	۱۵۳۶	۱۴۱۳	۱۰۰۳	۱۴۱۲	۱۷۲۵	۱۴۸	۱۷۳۳	۱۸۱۱	۱۵۳۶	۱۹۶۱	۱۸۳۶	۱۷۹۷	۱۰۸۸	۱۴۸۱	۵۲/۸۹	۱۷۳۶	۱۷۳۶	A1
۱۶۸	۱۶۶	۱۴۱	۱۴۷	۱۰۸	۱۷۳	۷۹۳/۲	۱۵۷	۱۶۲	۲۷	۸۳۰/۸	۱۵۲	۱۴۱	۱۵۳	۱۵۴	۱۹۲	۱۵۸	۱۵۵	۱۵۵	A2
۱۱۴۴	۱۶۶۴	۲۱۲۸	۷۴۰	۷۲۴	۷۲۸	۳۷۸	۳۸۰	۳۱۴	۱۰۷۶	۸۲۴	۷۲۸	۵۶۰	۶۰۰	۴۴۰	۳۵۰	۳۲۴	۲۹۶	۲۹۶	Fn
۱۰۳۲	۱۰۳۸	۱۰۳۴	۱۰۴۰	۱۰۵۲	۱۰۶۸	۱۰۳۵	۱۰۳۲	۱۰۱۷	۱۰۲۶	۱۰۳۷	۱۰۲۰	۱۰۵۸	۱۰۴۶	۱۰۵۲	۱۰۶۱	۱۰۵۲	۱۰۶۸	۱۰۶۸	Sm
۳۰۳	۴۱۲۲	۳۱۶۸	۲۱۴۲	۴۱۳۶	۳۱۰۵	۵۱۷۰	۶۰۱	۵۱۳۵	۲۱۶۶	۴۱۱۵	۳۱۵۰	۳۱۱۴	۳۱۸۳	۳۱۳۸	۱۱۸۸	۴۱۱۷	۳۱۴۳	۳۱۴۳	Wt



شکل ۴. خروجی تنش برشی در مقابل تعداد دوران، یکی از شش خروجی متراکم کننده دورانی

۸- ارائه مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق مدلسازی با استفاده از نرم افزار SPSS.20 انجام شده است. در رگرسیون خطی دو فرضیه H_0 و H_1 بصورت زیر تعریف می شوند.

$$H_0 : R = 0$$

$$H_1 : R \neq 0$$

هدف رد فرضیه صفر می باشد که اعتبار آن با ضریبی تحت عنوان Sig F change سنجیده می شود. هرچه مقدار این ضریب کمتر باشد، سطح معناداری مدل ارائه شده بیشتر خواهد بود. از آنجایی که در این مدلسازی سطح اطمینان ۰/۹۵ در نظر

گرفته شده است، مقدار این ضریب باید کمتر از ۰/۰۵ باشد. به منظور مدلسازی عمق شیار، ابتدا پارامترهای عدد روانی (F_n)، شیب منحنی تنش برشی ژیراتوری (A_1)، عرض از مبدا منحنی تنش برشی ژیراتوری (A_2) و ماکزیمم برش (S_m) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. با توجه به این متغیرها، تلاش برای پیدا کردن مدل آماری مناسب با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون در نرم افزار SPSS انجام شد. در جدول ۵ نتایج حاصل از آنالیز آماری داده های مورد استفاده در مدلسازی ارائه شده است.

جدول ۵. خلاصه آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی

پارامتر	تعداد	محدوده	حد پایین	حد بالا	میانگین	انحراف معیار	واریانس
F_n	144	7140.00	235.00	7375.00	1995.3681	1681.14	2826246.709
A_1	144	77.83	-8.37	69.46	47.0785	9.90220	98.053
A_2	144	361.30	564.90	926.20	806.0533	61.01784	3723.177
Sm	144	330.00	776.00	1106.00	1011.0833	68.28176	4662.399
Wt	144	12.82	0.45	13.27	5.1762	2.32299	5.396

با توجه به نتایج حاصل از رگرسیون خطی که در جدول (۶) ارائه شده است، مدل نهایی به شکل رابطه (۲) تعیین گردید. علاوه بر این، ضرایب همبستگی^{۱۵} مدل و نتایج تحلیل واریانس^{۱۶} به منظور ارزیابی معناداری مدل در جدول‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

$$Wt = -0.000138F_n - 0.047A_1 + 0.004A_2 + 0.006Sm - 2.577 \quad (2)$$

که در این رابطه: Wt : عمق شیار حاصل از دستگاه ویل تراک بر حسب میلی‌متر، F_n : عدد روانی، A_1 : ضریب زاویه منحنی تنش برشی بر حسب کیلوپاسکال و Sm : ماکزیمم برش در منحنی تنش برشی ژیراتوری بر حسب کیلوپاسکال می‌باشد. A_2 : عرض از مبدا منحنی تنش برشی ژیراتوری

جدول ۶. ضرایب پارامترهای مستقل مدل (خروجی نرم‌افزار SPSS.20)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
(Constant)	-2.577	0.399		-6.453	0					
F_n	-0.0001	0.00001	-0.297	-8.643	0	-0.402	-0.591	-0.255	0.738	1.355
A_1	-0.047	0.007	-0.597	-6.912	0	-0.183	-0.506	-0.204	0.117	8.555
A_2	0.004	0.001	0.349	3.039	0.003	0.883	0.25	0.09	0.066	15.142
Sm	0.006	0.002	0.549	4.028	0	0.623	0.323	0.119	0.047	21.241

جدول ۷. ضرایب همبستگی مدل (خروجی نرم‌افزار SPSS.20)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0.937	0.879	0.875	0.275273	1.271

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس مدل (خروجی نرم‌افزار SPSS.20)

مدل	سطح معناداری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات
1		251.618	19.066	4	76.266
			0.076	139	10.533
				143	86.798

۹- اعتبارسنجی مدل

۹-۱- استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

توانمندی‌های هوش مصنوعی باعث شده است که نرم‌افزارهای مربوط به این فناوری طرفداران زیادی پیدا کند. نرم‌افزار MATLAB به عنوان ابزار سنجش مدل‌های بدست آمده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و کدهای برنامه شبکه عصبی در محیط این نرم‌افزار نوشته شد. در اولین گام، ابتدا با استفاده از رابطه (۳) داده‌ها نرمال سازی شدند.

$$X_n = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \quad 0 \leq X_n \leq 1 \quad (3)$$

برای آموزش از حدود ۷۰ درصد داده‌ها استفاده شد و بقیه داده‌ها برای مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی مدل از دو پارامتر ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا^{۱۷} مطابق با رابطه (۴) استفاده شد.

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

در واقع شبکه عصبی ارتباط بین پارامترهایی که توسط روابط رگرسیونی بدست آمده را مورد آزمون قرار می‌دهد. هرچه ضریب نکویی برازش (R^2) بیشتر و مجذور میانگین مربعات خطا کمتر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی‌تر بین پارامتر وابسته و پارامترهای مستقل روابط رگرسیونی است. با توجه به مدل بدست آمده، عمق شیار ناشی از اثر جای چرخ بارگذاری (Wt) به عنوان متغیر مستقل مدل بوده و عدد روانی (F_n)، ضریب زاویه منحنی تنش برشی (A_1) و عرض از مبدا منحنی تنش برشی (A_2) و ماکزیمم برش (S_m) به عنوان متغیرهای وابسته مدل می‌باشند. بدین ترتیب طبق ساختار اصلی روش شبکه عصبی مصنوعی، این مدل در لایه ورودی دارای سه نرون و در لایه خروجی دارای یک نرون می‌باشد. در لایه پنهان تعداد نرون‌های بیشتر باعث بالا رفتن دقت می‌شود. اما به همان نسبت زمان پردازش نیز بالاتر می‌رود. به همین دلیل تعداد نرون‌های پایین‌تر در این لایه، از نقاط قوت یک شبکه عصبی است. در شبکه عصبی مورد نظر، تعداد ۵، ۱۰ و ۱۵ نرون در لایه پنهان در نظر گرفته شده است (شکل ۵). در این پژوهش ۷۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش شبکه و ۳۰ درصد داده‌ها

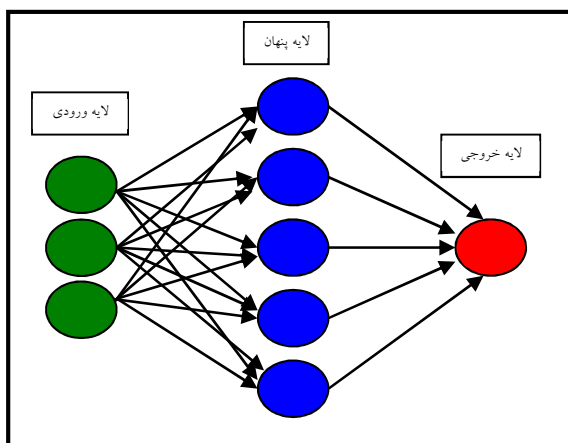
برای آزمایش شبکه استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از مرحله آموزش و مرحله صحت‌سنجی مطابق با جدول (۹) بدست آمد. بهترین ساختار در جدول ارائه شده دارای ضریب ۰/۹۲ در مرحله آموزش و ۰/۹۰۳۵ در مرحله آزمایش می‌باشد. به عبارت دیگر این ضریب تعیین بالا، همستگی خوب بین مقادیر واقعی متغیر وابسته حاصل از آزمایش با مقادیر این متغیر ناشی از شبکه آموزش دیده را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر عمق شیار حاصل از مدل نهایی با مقادیر معادل بدست آمده از شبکه عصبی در مرحله آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است.

۹-۲- استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، روشی در حوزه محاسبات تکمیلی است که به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم با مدلسازی ریاضی فرآیند تکامل اجتماعی - سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی به صورت بهینه سازی ارائه می‌دهد. از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون الگوریتم‌های ژنتیک، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم کلونی مورچگان T، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و ... قرار می‌گیرد. همانند همه الگوریتم‌های قرار گرفته در این دسته، الگوریتم رقابت استعماری نیز مجموعه اولیه‌ای از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. این جواب‌های اولیه در الگوریتم رقابت استعماری با عنوان کشور شناخته می‌شوند. این الگوریتم با روش‌های خاصی این جواب‌های اولیه را به تدریج بهبود داده و در نهایت جواب مناسب مسئله بهینه‌سازی را در اختیار می‌گذارد. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان سازی، رقابت استعماری و انقلابی تشکیل می‌دهد. این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدلسازی ریاضی بخش‌هایی از این فرآیند، عملگرهایی را در قالب منظم بصورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌توانند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کنند. در واقع این الگوریتم جواب‌های مسئله بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرایندی تکرار شونده این جواب‌ها را رفته رفته بهبود داده و در نهایت به جواب بهینه

مسئله برساند (شکل ۷). کد نویسی این الگوریتم نیز در محیط نرم افزار MATLAB انجام گردید.

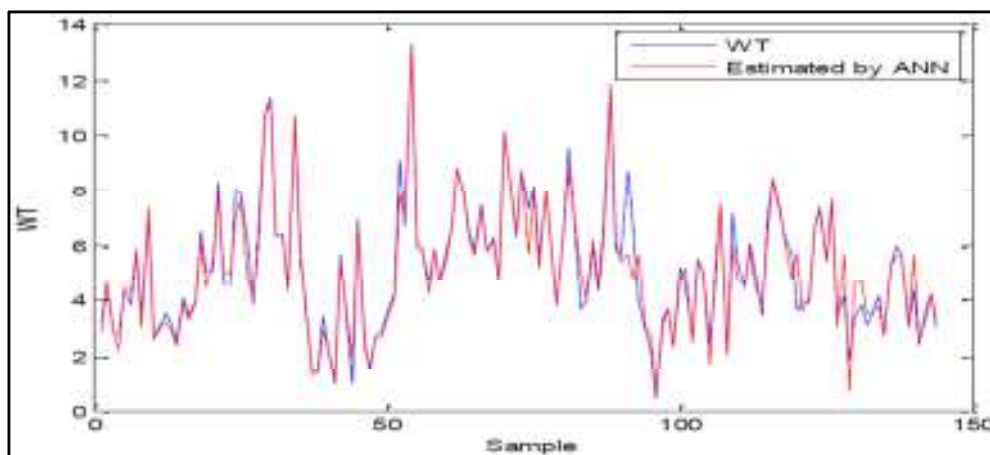
اعتبارسنجی مدل با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری انجام شد که نتیجه آن در شکل (۸) نشان داده شده است. تطابق بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل در این نرم افزار، نشانگر اعتبار قابل قبول مدل ارائه شده است.



شکل ۵. لایه بندی شبکه عصبی مصنوعی

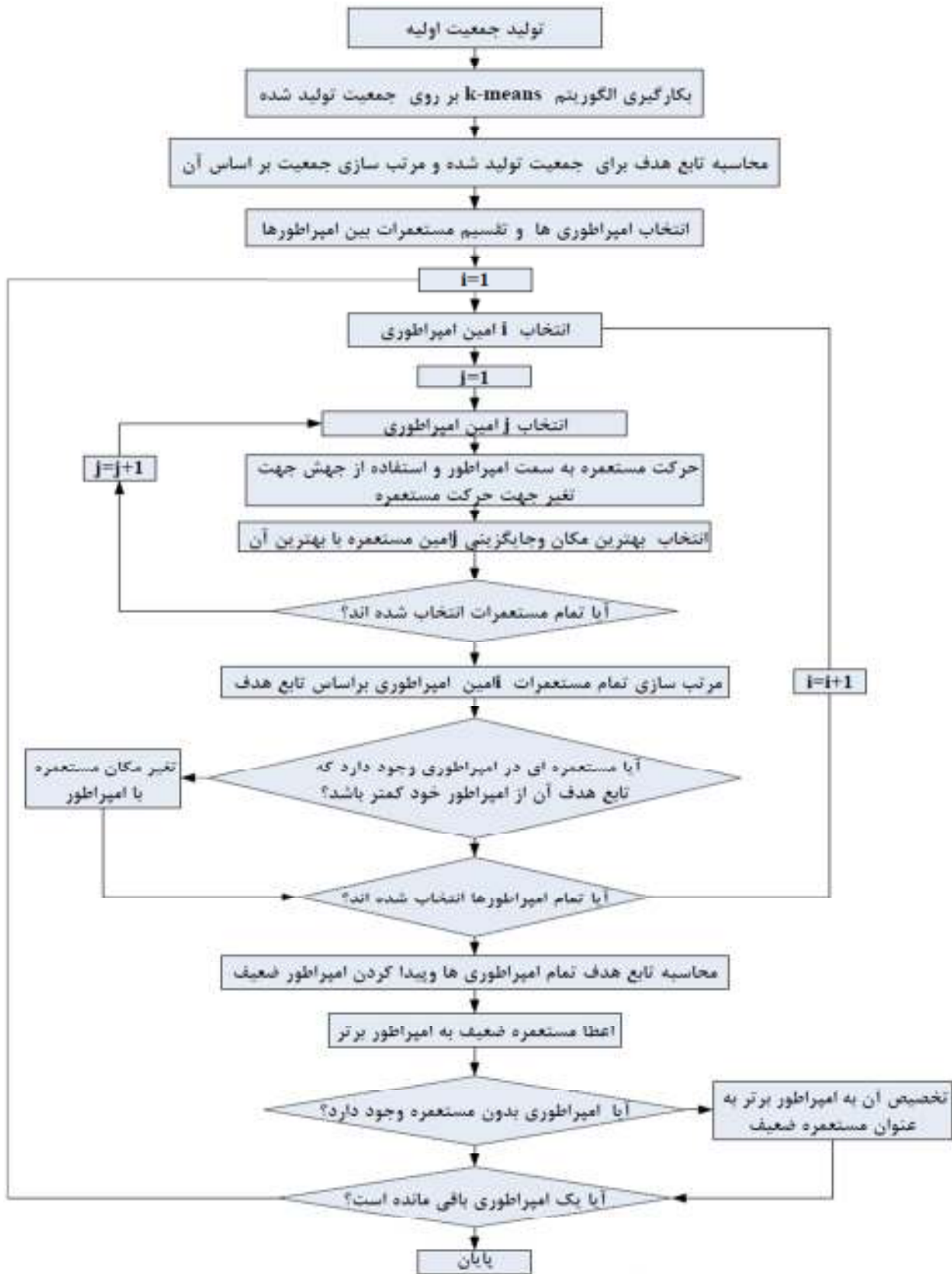
جدول ۹. نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در مرحله آموزش و آزمایش

مرحله آزمایش	مرحله آموزش		شاخص شبکه	ساختار شبکه عصبی مصنوعی تعداد نرون‌ها در هر لایه		
	RMSE	R ²		لایه ورودی	لایه پنهان	لایه خروجی
۰/۵۹۸۸	۰/۰۱۲۵	۰/۶۹۶۳	۳-۵-۱	۱	۵	۳
۰/۷۹۲۵	۰/۰۱۶۸	۰/۸۷۷۶	۳-۱۰-۱	۱	۱۰	۳
۰/۹۰۳۵	۰/۰۰۹۱	۰/۹۲۰۱	۳-۱۵-۱	۱	۱۵	۳

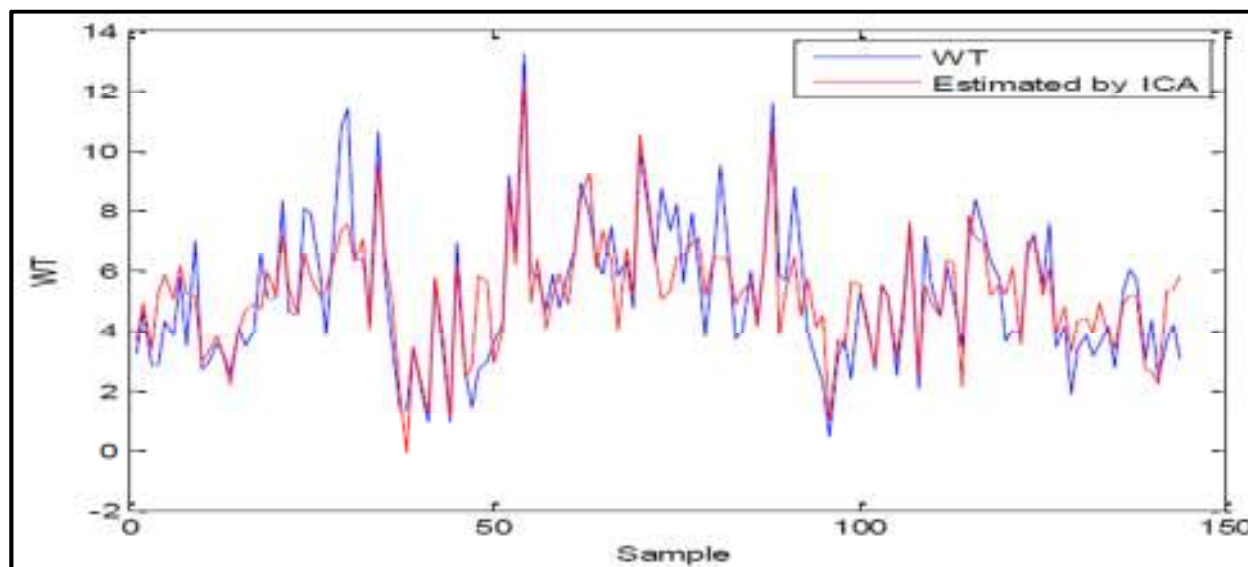


شکل ۶. اعتبارسنجی مدل ارائه شده با استفاده از شبکه عصبی

(محور عمودی عمق شیار (واقعی و تخمینی) و محور افقی تعداد نمونه‌ها می‌باشند)



شکل ۷. فلوجارت عملکرد الگوریتم رقابت استعماری (Niknam et al., 2011)



شکل ۸. اعتبارسنجی مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

نهایت با استفاده از نرم افزار SPSS.20 مدلی برای پیش‌بینی شیارشدگی بر اساس آزمایش‌های ذکر شده، تعیین گردید. به جهت اعتبارسنجی مدل بدست آمده، این مدل با روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم رقابت استعماری مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت هر دو روش، اعتبار مدل را تایید نمودند. مهمترین نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده و مدل‌سازی، به شرح ذیل می‌باشند.

الف- در بررسی مقادیر قیر بهینه بدست آمده، مشخص گردید که:

- به طور کلی میزان قیر بهینه بدست آمده برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی بیشتر از مصالح سیلیسی است (به طور متوسط حدود ۰/۸ درصد). البته این موضوع به دلیل تخلخل بیشتر مصالح آهکی دور از ذهن نبود.
- در همه ترکیب‌های مشابه، میزان قیر بهینه در ترکیب‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ به مراتب بیشتر از میزان قیر همان ترکیب‌ها با قیر ۸۵-۱۰۰ است (به طور متوسط حدود ۰/۲ درصد). علت این موضوع را می‌توان در قدرت پوشاندگی

۱۰- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش، ارائه یک مدل ریاضی بود که به واسطه آن امکان تخمین پتانسیل تغییر شکل دائمی یا شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه و پیش از تولید کارگاهی، با کمترین هزینه و زمان ممکن مهیا شود. نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مترامکن کننده ژیراتوری، با هدف تعیین پتانسیل شیارشدگی، تحت آزمایش‌های خزش دینامیکی و چرخ بارگذاری قرار گرفتند. جهت ساخت نمونه‌ها بازه وسیعی از مصالح سنگی (سیلیسی و آهکی)، حد وسط دانه‌بندی‌های شماره ۴ و ۵، قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ و فیلر پودر سنگ و آهک مورد استفاده قرار گرفت و شانزده ترکیب آسفالتی مختلف بوجود آمد. با ساخت ۲۸۸ نمونه آسفالتی، میزان قیر بهینه این شانزده ترکیب به روش طرح اختلاط مارشال تعیین گردید. با در نظر گرفتن سه میزان قیر (درصد قیر بهینه، ۰/۵ درصد بالاتر از آن و ۰/۵ درصد پایین‌تر از آن) و ساخت سه نمونه برای هر گروه از ترکیب مصالح، ۲۸۸ نمونه دیگر جهت انجام آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیارشدگی (هر یک ۱۴۴ نمونه) با استفاده از مترامکن کننده ژیراتوری ساخته شدند. در

بالاتر قیر ۱۰۰-۸۵ دانست.

می‌کند. در این تحقیقات ثابت شده بود که نمونه‌های آسفالتی با زاویه اصطکاک داخلی بالاتر دارای شیب بیشتری بوده و عمق شیار بوجود آمده در آن‌ها کمتر است.

• با بررسی عرض از مبدا منحنی تنش برشی نمونه‌های مختلف مشخص می‌گردد که افزایش میزان قیر نمونه، به طور متوسط باعث بالا رفتن مقدار A_2 می‌گردد. از طرفی، افزایش ضخامت فیلم قیر دور مصالح سنگی، پتانسیل شیارشدگی آسفالت را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت با بالا رفتن میزان قیر نمونه، عرض از مبدا منحنی تنش برشی و عمق شیار نمونه، افزایش پیدا کنند. این مطلب توسط مدل ارائه شده تایید می‌گردد. به عبارت دیگر باید انتظار داشت نمونه‌های که در ابتدای تراکم، تنش برشی بالاتری را تجربه می‌کنند، بیشتر در معرض بروز تغییرشکل‌های ماندگار قرار گیرند.

• ضریب مثبت حداکثر تنش برشی در مدل نشانگر این است که مخلوط‌های آسفالتی با تنش برشی ماکزیموم بالاتر، بیشتر مستعد شیارشدگی هستند.

با توجه به نتایج بدست آمده، با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان در هنگام ساخت نمونه‌ها با دستگاه متراکم کننده ژیراتوری و با انجام آزمایش خزش دینامیکی، پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی کرد. بدین ترتیب مخلوط‌هایی که مقاومت کمی در برابر تغییرشکل‌های دائمی داشته باشند، شناسایی شده و به تولید کارگاهی نخواهند رسید.

۱۱- سپاسگزاری

نویسندگان از پرسنل محترم آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی و مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) که شرایط انجام آزمایش‌ها را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

۱۲- پی‌نوشت‌ها

1. Rutting
2. Hydroplaning
3. Dynamic Creep Test
4. Artificial Neural Network (ANN)

• به طور متوسط میزان قیر بهینه نمونه‌های ساخته شده با فیلر آهک به میزان ۰/۲۶ درصد بیشتر از ترکیب‌های مشابه ساخته شده با فیلر پودر سنگ می‌باشد. بافت سطحی آهک با خلل و فرج بیشتر نسبت به فیلر پودر سنگ را می‌توان دلیل این اختلاف دانست.

• در تمامی ترکیب‌های مشابه، میزان قیر بهینه در ترکیب‌های ساخته شده با دانه‌بندی پنج به طور متوسط ۰/۱ درصد بیشتر از قیر بهینه همان ترکیب با دانه‌بندی چهار است. دانه‌بندی پنج به مراتب ریزدانه‌تر از دانه‌بندی چهار است و سطح در مجاورت قیر آن نیز بیشتر است. بدیهی است که میزان قیر بهینه نمونه‌های مشابه ساخته شده با دانه‌بندی پنج، بیشتر از دانه‌بندی چهار است.

ب- نتایج حاصل از انجام آزمایش شیارشدگی نشان داد که:

• برای نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی شماره چهار و پنج و فیلر پودر سنگ، عمق شیار ایجاد شده در نمونه‌های سیلیسی بیشتر از نمونه‌های آهکی بود.

• به طور متوسط شیارشدگی نمونه‌های حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ از نمونه‌های ساخته شده با قیر ۷۰-۶۰ بیشتر بود.

• برای مصالح سنگی سیلیسی در شرایط مشابه، عمق شیار حاصل از دستگاه ویل تراک برای نمونه‌های ساخته شده با فیلر پودر سنگ بیشتر از نمونه‌هایی بود که فیلر آهک در ساخت آنها استفاده شده بود. نمونه‌های ساخته شده از مصالح آهکی با فیلر پودر آهک، به مراتب عمق شیار بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده از مصالح سیلیسی را داشتند.

ب- با بررسی مدل بدست آمده مشخص گردید که:

• رابطه عکس عدد روانی با عمق شیار در رابطه (۲)، نتایج تحقیقات قبلی را تایید میکند. همانطور که پیشتر اشاره شد، مشخص گردیده که عدد روانی بیشتر، نشان دهنده نمونه با مقاومت شیارشدگی بالاتر است.

• در مدل ارائه شده برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی آسفالت، ضریب شیب منحنی تنش برشی منفی شده است. به عبارت دیگر نمونه‌های با شیب بیشتر، کمتر مستعد شیارشدگی هستند. این موضوع نیز نتایج پژوهش‌های پیشین را تایید

- دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی، م. و رستمی، م. (۱۳۹۴)، "ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره دوم.
- دیواندری، ح.، مدرس، ا.، رستمی، م. و حسینی، م. (۱۳۹۴)، "ارائه مدل تخمین عدد روانی با استفاده از پارامترهای مارشال و نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره دوازدهم، شماره دوم، تابستان.

5. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)
6. Flow Time (F_i)
7. Repeated Load Permanent Deformation (RLPD)
8. Hamburg Wheel Tracking Device (HWTDD)
9. Repeated Shear at Constant Height
10. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) Pavement Rutting Tester
11. Cumulative Strain
12. Superpave Gyrotory Compactor (SGC)
13. Flow Number (F_n)
14. Permanent Deformation
15. Correlation Coefficient
16. Analysis of Variance
17. Root Mean Square Error (RMSE)

۱۳-مراجع

- احدی، م. ر.، متولی‌زاده، س. م. و متولی‌زاده، س. ح. (۱۳۹۴)، "نگرشی بر روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی"، هفتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، ۲۴ تا ۲۶ آذر.
- پژوهشکده حمل و نقل، (۱۳۸۶)، "روش‌های جدید طرح مخلوط‌های آسفالتی براساس عملکرد و پیشنهاد روش مناسب برای کشور"، وزارت راه و شهرسازی، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل.
- 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 شهرسازی، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل.
- خاوندی، ع. و منصور، س. (۱۳۹۳)، "بررسی اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر شیارافتادگی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی"، مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره اول، پاییز.
- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، شفابخش، غ. و حسامی، س. (۱۳۹۲)، "ارائه مدل پیش‌بینی شیارشدگی آسفالت با استفاده از پارامترهای خروجی متراکم‌کننده ژیراتوری"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دهم، شماره اول، بهار، ص. ۲۹-۴۳.
- عامری، م.، مقدس‌نژاد، ف. و میرزاحسینی، م. (۱۳۸۹)، "ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای حاصل از طرح اختلاط مارشال و بررسی تاثیر این پارامترها بر عدد روانی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، اردیبهشت.
- عربانی، م.، بخشی، ب. و شیرینی، ب. (۱۳۹۶)، "ارزیابی نتایج آزمایشگاهی عمق شیارشدگی در مخلوط آسفالت الاستیکی با نتایج مدلسازی المان محدود"، مهندسی حمل و نقل، سال هشتم، شماره سوم، بهار، ص. ۴۳۵-۴۵۰.
- 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.

- Sheng, H. F. and Ling, L. (2011), "Investigation and Countermeasures Analysis of Rutting in Highway Asphalt Concrete Pavements", *Advance Materials Research, Advance in Civil Engineering*, Vol. 255, pp. 3263-3267.
- Williams, R. C., Buss, A., Mercado, G., Lee, D. and Bozorgzad, A. (2016), "Validation of Gyrotory Mix Design in Iowa", IHRB Project TR-667, Institute for Transportation Iowa State University, Federal Highway Administration, Iowa Highway Research Board, and the Iowa Department of Transportation, pp.1-83.
- Zhu, T., Ma, T., Huang, X. and Wang, S. (2016) "Evaluating the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures Using a Simplified Triaxial Repeated Load Test", *Construction and Building Materials*, Volume 116, 30 July 2016, pp. 72-78.
- Ziari, H. and Divandari, H. (2013) "Presenting Asphalt Mixtures Flow Number Prediction Model Using Gyrotory Curves", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 125-133.
- Ameri, M., Sheikhmotevali, A. H. and Fasihpour, A. (2014) "Evaluation and Comparison of Flow Number Calculation Methods", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 15, No. 1, pp. 182-206.
- Anderson, R. M., Turner, A. P., Peterson, L. R. and Mallick, B. R. (2002) "Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior", NCHRP Report 748, Transportation Research Board, Washington D.C, pp. 1-16.
- Irfan, M., A., Y., Iqbal, S., Ahmed, S. and Hafeez, I. (2017) "Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures Using Static, Dynamic and Repeated Creep Load Tests," *Arabian Journal for Science and Engineering*, November 2017, pp. 1-13.
- Feyissa, B. (2017) "Analytical Modeling of Rutting for Asphalt Concrete Pavement", *Conference of Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Edited by Loizos, Taylor & Francis Group, London, pp. 1383-1389.
- Leonardi, G. (2015) "Finite Element Analysis for Airfield Asphalt Pavements Rutting Prediction", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences , Technical Sciences*, Vol. 63, No. 2, pp. 397-403.
- Niknam, T., TaherianFard, E., Pourjafarian, N. and Rousta, A. R. (2011), "Human Socio-political Evolution and Imperialistic Competitive Algorithm Application in Optimize the Huge-Combinatorial problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24 (2011), pp.306-317.

