

مدل‌سازی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی

مقاله پژوهشی

علی‌رضا غنی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
نسرین حیدرآبادی‌زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، آزمایشگاه پیشرفته قیر و آسفالت، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
آرش ضیایی، مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ir

دریافت: ۹۹/۱۱/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

صفحه ۲۸-۱۵

چکیده

خرابی شیارشدگی یکی از خرابی‌های مهم در روسازی‌های آسفالتی است که در آب‌وهوای گرم به شدت تحت تأثیر مشخصات مخلوط آسفالتی قرار دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی (تغییر شکل دائمی) وجود دارد که یکی از این روش‌ها، تعیین عدد جریان مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی است. تعیین عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی نیازمند تجهیزات دینامیکی پیشرفته و همچنین صرف هزینه و زمان قابل توجه است. در این مقاله از روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) به منظور ارائه مدلی جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مشخصات طرح اختلاط مارشال، استفاده شده است. با بهره‌گیری از مدل توسعه داده شده می‌توان عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی را با داشتن پارامترهای طرح اختلاط مارشال شامل درصد مصالح درشت‌دانه، درصد مصالح ریزدانه، درصد فیلر، درصد قیر، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی مصالح سنگی، استقامت مارشال و نرمی پیش‌بینی نمود. مدل توسعه داده شده دارای ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۷۱۴ برای داده‌های آموزش و ۰/۹۶۶۱ برای داده‌های آزمون است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل توسعه داده شده است. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که دقت مدل توسعه در مقایسه با مدل‌های توسعه داده شده توسط سایر محققین بیشتر است. به علاوه تحلیل حساسیت نشان دهنده انطباق مناسب مدل توسعه داده شده با رفتار فیزیکی مخلوط‌های آسفالتی است.

واژه‌های کلیدی: عدد جریان، پتانسیل شیارشدگی، پارامترهای طرح اختلاط، روش EPR

۱- مقدمه

کنترل فرمان توسط رانندگان می‌شود و از طرفی زهکشی آب‌های سطحی در سطح روسازی را با مشکل جدی روبرو می‌کند که خود باعث بروز افزایش پتانسیل آب‌پیمایی و کاهش ایمنی می‌گردد (Sousa, Craus, Monismith, 1991; Alavi et al, 2011; Gandomi et al, 2010). از دیگر تأثیرات منفی شیارشدگی، کاهش ضخامت آسفالت است که خود منجر به افزایش ترک‌خوردگی آسفالت می‌شود (Bahuguna, 2004). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شیارشدگی مهم‌ترین نوع خرابی

تغییر شکل دائمی یا شیارشدگی یکی از خرابی‌های متداول در روسازی‌های آسفالتی است. نتیجه شیارشدگی، تغییر شکل (فرورفتگی) در مسیر چرخ‌ها است. علت اصلی شیارشدگی، بارگذاری تکراری وسایل نقلیه و تغییر شکل پلاستیک مصالح روسازی تحت اثر این بارگذاری است (Kaloush, 2001). شیارشدگی باعث ناهمواری طولی و خصوصاً عرضی سطح روسازی شده و عمر مفید روسازی را کاهش می‌دهد. ناهمواری عرضی سطح روسازی به دلیل شیارشدگی، باعث کاهش قابلیت

سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) اشاره نمود. این ابزار مدل‌سازی در سال‌های اخیر در زمینه‌های مختلف مهندسی روسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Saltan, Terzi, 2005; Sollazzo Fwa, Bosurgi, 2017; Terzi, 2007; Wu, Hu, Zhou, 2014; Özgan, Korkmaz, Emiroğlu, 2012; Marques, Correia, 2012, Ziari et al. 2018, Mansourian, Ghanizadeh, Golchine 2019).

میرزا حسینی و همکاران از روش برنامه‌نویسی چندجمله‌ای (MEP) و شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP) برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمودند (Mirzahosseini et al, 2011). گندمی و همکاران نیز مدلی را برای پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) توسعه دادند (Gandomi, 2010). همچنین، علوی و همکاران روش GP/SA (ترکیب برنامه‌نویسی ژنتیک و روش شبیه‌سازی تبرید) را برای پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار دادند (Alavi, 2011). یان و همکاران به منظور پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده نمودند. این تحقیق نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل توسعه داده‌شده با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای و روش برنامه‌نویسی بیان ژن بود (Yan, Ge, Zhang, 2014).

روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) یک روش رگرسیون ترکیبی مبتنی بر داده است که توسط گیوستولیزی و ساویک توسعه داده‌شده است (Giustolisi, Savic, 2006). برتری عمده روش EPR در مقایسه با سایر روش‌های هوش محاسباتی مانند شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی این است که این روش منجر به تولید یک معادله مشخص و ساده به منظور انجام محاسبات و پیش‌بینی پارامتر مجهول می‌شود. این در حالی است که محاسبات مورد نیاز برای سایر روش‌ها نسبتاً پیچیده می‌باشند و معمولاً به صورت دستی قابل انجام نمی‌باشند. روش EPR در سال‌های اخیر برای مدل‌سازی مورد توجه محققین قرار گرفته است (Bruno et al, 2018; Ghorbani, Hasanzadehshooiili, 2018). این وجود این روش در مهندسی روسازی چندان مورد استفاده قرار نگرفته است. در این تحقیق با استفاده از روش EPR رابطه‌ای توسعه داده‌شده است که با استفاده از آن می‌توان عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از پارامترهای طرح اختلاط مارشال شامل دانه‌بندی، درصد قیر، فضای خالی مخلوط آسفالتی،

روسازی‌ها است و ترک‌خوردگی خستگی و ترک‌های حرارتی به ترتیب در درجه دوم و سوم اهمیت قرار دارند (FHWA, 1998). در نتیجه تعیین مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت اثر بار ترافیکی جهت انتخاب و بهره‌گیری از مخلوط‌های با مقاومت شیارشدگی قابل قبول بسیار حائز اهمیت است (Sousa, Craus, Monismith, 1991; Alavi et al., 2011; Zhou, Scullion, Sun, 2004).

مشخصات سنگدانه‌ها و قیر مصرفی و همچنین خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. بسیاری از مدل‌های موجود جهت پیش‌بینی تغییر شکل دائمی، مدل‌های تجربی یا نیمه تجربی هستند که برای شرایط محیطی و مصالح مشخصی توسعه داده‌شده‌اند و قابل تعمیم به سایر شرایط و مصالح نمی‌باشند (Alavi, 2011). آزمایش خزش دینامیکی یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی است (Kaloush et al, 2002). کالوش و همکاران عدد جریان را به صورت تعداد تکرارهای بارگذاری مورد نیاز در آزمایش خزش دینامیک جهت رسیدن به مرحله سوم نمودار خزش تعریف نمودند (Witczak, 2002). تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهند که تعداد تکرارهای بارگذاری جهت رسیدن به مرحله سوم منحنی خزش (عدد جریان)، یک شاخص مناسب برای تعیین مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است (Alavi, 2011; Kim, 2008). عدد جریان نشان‌دهنده مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی تحت اثر تغییر شکل برشی ناشی از بارگذاری دینامیکی است (Williams, 2007). همچنین تحقیقات پیشین نشان‌دهنده رابطه منطقی بین کرنش دائمی و عدد جریان با شیارشدگی بوده است و در کنار کرنش دائمی، محققان پارامتر عدد جریان را به عنوان بهترین شاخص پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد پذیرش قرار داده‌اند (Zhou, Scullion, Sun, 2004).

پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و پیچیده است. همچنین انجام این آزمایش می‌تواند بسیار وقت‌گیر باشد؛ بنابراین توسعه مدلی جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بر پایه پارامترهای طرح اختلاط مارشال مخلوط‌های آسفالتی بسیار مفید و کاربردی خواهد بود. روش‌های محاسبات نرم در دو دهه اخیر به عنوان ابزاری توانمند جهت مدل‌سازی ظهور کرده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شبکه عصبی مصنوعی (ANN)،

پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی فراهم می‌کند. در اولین ویژگی EPR، قبل از ساخت مدل EPR، مدل‌ساز ورودی‌های مربوطه را انتخاب و آن‌ها را مطابق با معانی فیزیکی‌شان تنظیم و چهارچوب‌بندی می‌کند. در طی ساخت مدل EPR، ساختارهای مدل با استفاده از تنظیمات تعریف‌شده توسط کاربر مانند ساختار چندجمله‌ای، انواع تابع تعریف‌شده توسط کاربر (لگاریتم طبیعی، تابع نمایی، تانژانت یا سکانت هایپربولیک) و پارامترهای استراتژی جستجو تعیین می‌شوند.

در EPR، از روش حداقل مربعات برای تعیین پارامترهای تنظیمی استفاده می‌شود. این روش پارامترهای تنظیمی را با استفاده از حداقل کردن مجموع مربعات خطا ارزیابی می‌کند. با این حال، داشتن مجموعه داده‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی، یک جمعیت اولیه از جواب‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک تولید می‌شود و هر پارامتر به‌عنوان کروموزوم فردی شناخته می‌شود. سپس پارامترهای تنظیمی بر اساس حداقل کردن مجموع مربع خطاها ارزیابی می‌شوند. شکل کلی مدل EPR به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i (X_1)^{ES(i,1)} \dots (X_k)^{ES(i,k)} f\left((X_1)^{ES(i,k+1)} \dots f(X_k)^{ES(i,2k)}\right) \quad (2)$$

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i f\left((X_1)^{ES(i,1)} \dots (X_k)^{ES(i,k)}\right) \quad (3)$$

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i (X_1)^{ES(i,1)} \dots (X_k)^{ES(i,k)} f\left((X_1)^{ES(i,k+1)} \dots (X_k)^{ES(i,2k)}\right) \quad (4)$$

$$\hat{y} = f\left(a_0 + \sum_{i=1}^m a_i (X_1)^{ES(i,1)} \dots (X_k)^{ES(i,k)}\right) \quad (5)$$

که \hat{y} مقدار پیش‌بینی شده، k تعداد متغیرهای پیش‌بینی مستقل (ورودی‌ها)، ES ماتریس مربوط به ضرایب توان و f تابع تعریف‌شده توسط کاربر است. همچنین توابع داخلی این مدل می‌توانند به‌صورت خطی یا غیرخطی در نظر گرفته شوند (Balf et al, 2018). پس از کالیبراسیون مدل EPR، یک مدل بهینه از مجموعه مدل‌های بازگشتی انتخاب می‌شود. مدل بهینه بر اساس قضاوت مدل‌ساز و همچنین شاخص‌های عملکرد آماری مانند ضریب تعیین (R^2) انتخاب می‌گردد. شکل ۱ روند مدل‌سازی توسط EPR را نشان می‌دهد.

فضای خالی مصالح سنگی، استقامت مارشال و روانی مارشال پیش‌بینی نمود. داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق جهت مدل‌سازی برگرفته از کار گندمی (Gandomi et al 2010) می‌باشند. پس از توسعه مدل بر اساس روش EPR، نتایج با سایر مدل‌ها مقایسه شده است و با استفاده از تحلیل پارامتریک تأثیر هر یک از پارامترهای طرح اختلاط مارشال بر روی عدد جریان ارزیابی شده است.

۲- رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی

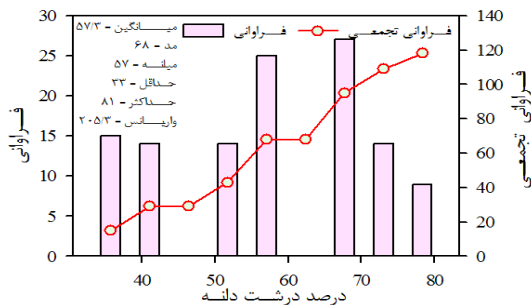
EPR یک روش رگرسیون ترکیبی مبتنی بر محاسبات تکاملی است که توسط گیوستولیزی و ساویک توسعه داده شده است (Giustolisi and Savic, 2006). EPR با موفقیت در حل مسائل مختلف مهندسی عمران خصوصاً حوزه مهندسی هیدرولیک مورد استفاده قرار گرفته است (Savic et al, 2006; Berardi et al, 2008; Giustolisi et al, 2008). این روش با بهترین شیوه، مدل‌های رگرسیون سیمبولیک (نمادین) را با برنامه‌نویسی ژنتیک ترکیب (Koza, 1992) و امکان مدل‌سازی را به‌صورت سیمبولیک فراهم می‌کند (Watson, Parmee, 1996). مدل‌سازی با استفاده از روش EPR در دو مرحله زیر انجام می‌شود. در مرحله اول، انتخاب نمادها برای عبارت چندجمله‌ای با استفاده از یک استراتژی جستجوی تکاملی بر اساس الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود (Goldberg, 1989) و در مرحله دوم، ضرایب رگرسیون مدل با استفاده از روش کمترین مربعات تعیین می‌شود. شکل کلی مدل EPR مطابق رابطه زیر است (Giustolisi, Savic, 2006):

$$y = \sum_{j=1}^m F(X, f(X), a_j) + a_o \quad (1)$$

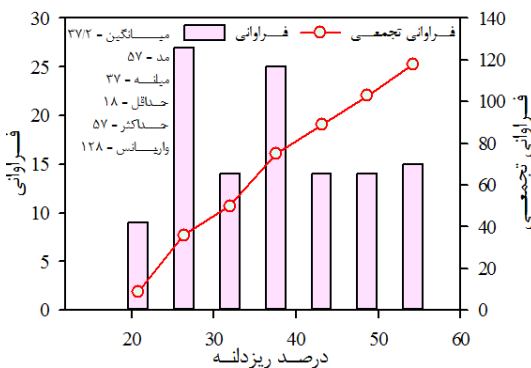
که y بردار خروجی تخمین زده شده، m تعداد جملات عبارت هدف، F تابع توسعه داده شده، X ماتریس متغیرهای ورودی، f تابع تعریف‌شده توسط کاربر و a_j یک عدد ثابت است.

EPR با توجه به دو ویژگی برای مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی مناسب است (Savic et al, 2006). این دو ویژگی عبارت‌اند از: (۱) معرفی دانش پیشین درباره روند فیزیکی در سه زمان مختلف مدل‌سازی شامل قبل، در طول و بعد از کالیبراسیون مدل EPR و (۲) تولید روابط نمادین، امکان داده‌کاوی را برای کشف تأثیر

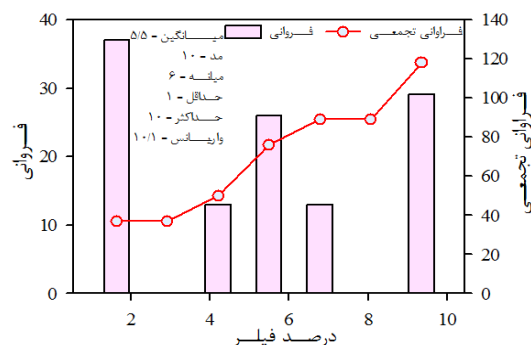
ریزدانه ($S\%$)، درصد فیلر ($F\%$)، درصد فضای خالی ($Va\%$)، فضای خالی مصالح سنگی ($VMA\%$)، درصد قیر ($BP\%$)، استقامت مارشال (M_{KN})، روانی مارشال (F_{mm}) و عدد جریان (F_n) ایجاد شد. این پایگاه داده متشکل از ۱۱۸ رکورد (نمونه مخلوط آسفالتی) بود که پارامترهای فوق برای آن‌ها تعیین شده بود (Gandomi et al, 2010). شکل‌های ۲ الی ۱۰ هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات آماری پارامترهای ورودی و خروجی در پایگاه داده را نشان می‌دهند.



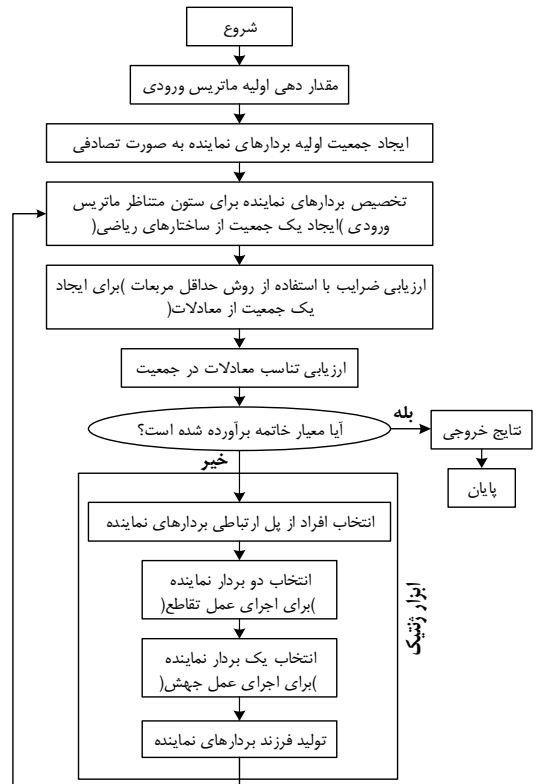
شکل ۲. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات آماری درصد درشت دانه



شکل ۳. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات آماری درصد ریزدانه



شکل ۴. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات آماری درصد فیلر



شکل ۱. فلوجارت روند EPR (Abdul, Shahin, Nikraz, 2012)

۳- داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

در این تحقیق از داده آزمایشگاهی گندمی و همکاران استفاده شده است (Gandomi et al, 2010). داده‌های موردنظر بر اساس آزمایش‌های خزش دینامیکی انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی مختلف به دست آمده‌اند. مخلوط‌های آسفالتی دارای ۹ تیپ دانه‌بندی مختلف بوده‌اند. دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی منطبق بر محدوده دانه‌بندی شماره ۳، ۴ و ۵ نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه انتخاب شده بود. قیر مورد استفاده از نوع قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ بود و نمونه‌های آسفالتی با توجه به نوع دانه‌بندی با درصدهای قیر زیر ساخته شده بودند (Gandomi et al, 2010):

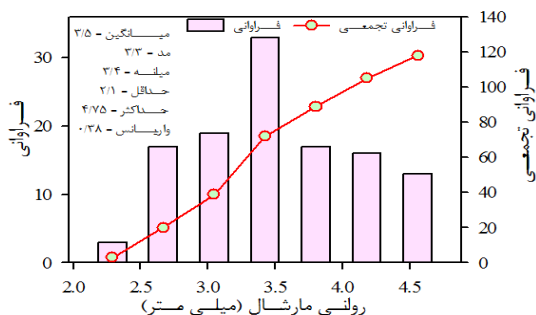
۱- دانه‌بندی شماره ۳: ۴٪، ۵٪، ۵٪، ۵٪، ۵٪ و ۶٪

۲- دانه‌بندی شماره ۴: ۵٪، ۵٪، ۵٪، ۵٪، ۶٪ و ۶/۵٪

۳- دانه‌بندی شماره ۵: ۵٪، ۵٪، ۶٪، ۶/۵٪ و ۷٪

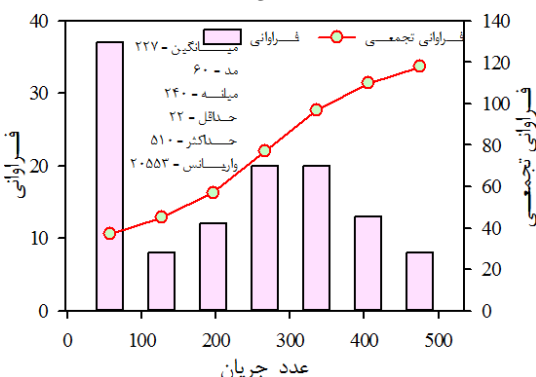
نمونه‌های مخلوط آسفالتی با اعمال ۷۵ ضربه چکش ۴/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری به هر طرف نمونه متراکم شدند و سپس تحت آزمایش خزش دینامیکی قرار گرفتند (Gandomi et al, 2010).

با توجه به آزمایش‌های انجام شده توسط گندمی و همکاران، پایگاه داده‌ای شامل درصد مصالح درشت دانه ($C\%$)، درصد مصالح



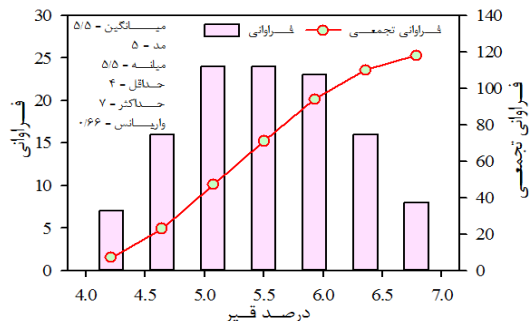
شکل ۹. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري روانی مارشال



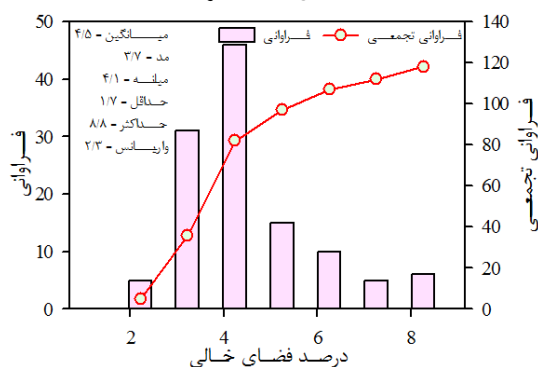
شکل ۱۰. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري عدد جریان



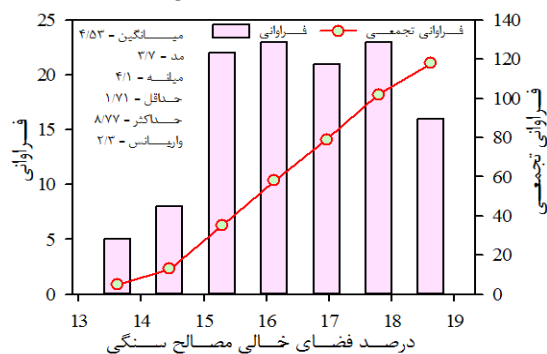
شکل ۵. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري درصد قیر



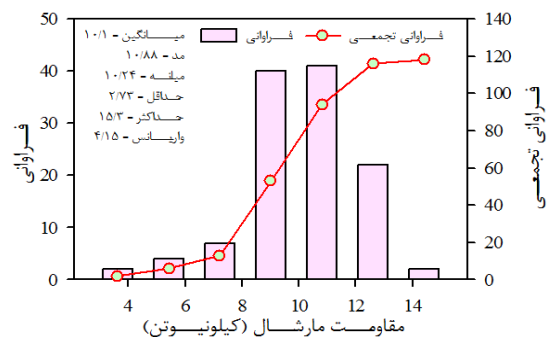
شکل ۶. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري درصد فضای خالی



شکل ۷. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري فضای خالی سنگدانه‌ها



شکل ۸. هیستوگرام فراوانی، فراوانی تجمعی و مشخصات

آماري مقاومت مارشال

۴- پیش‌بینی عدد جریان با استفاده روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی

برای پیش‌بینی عدد جریان با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی از برنامه EPR MOGA-XL vr.1 استفاده شد (Laucelli, 2012). به‌منظور توسعه و اعتبار سنجی مدل EPR، ۷۰٪ داده‌ها (۸۳ داده) به‌عنوان داده آموزش و ۳۰٪ داده‌ها (۳۵ داده) به‌عنوان داده آزمون در نظر گرفته شدند. جدول ۱ جزئیات پارامترهای تنظیمی برای مدل بهینه EPR را نشان می‌دهد. قبل از مدل‌سازی، ورودی‌ها و خروجی‌ها بر اساس رابطه زیر نرمالیزه شدند:

$$Q_n = \frac{(Q - Min)}{(Max - Min)} \quad (6)$$

که در این رابطه:

Q: مقدار واقعی پارامتر

Q_n: مقدار نرمال شده پارامتر

Max: حداکثر مقدار پارامتر

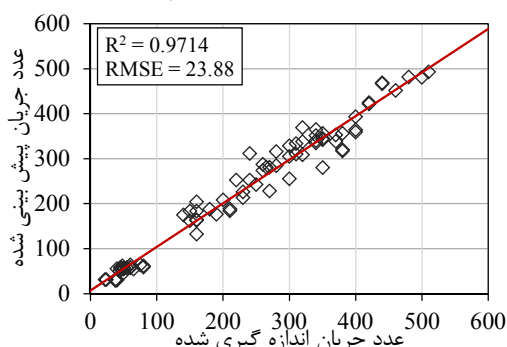
Min: حداقل مقدار پارامتر

رگرسیون (R^2) و همچنین خطای ریشه مربعات خطا (RMSE) نیز در روی هر یک از این شکل‌ها آورده شده است. این مقادیر با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

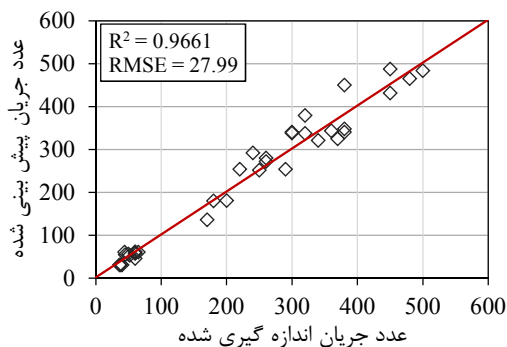
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\left(N \sum_{i=1}^N (d_i y_i) - \sum_{i=1}^N d_i \sum_{i=1}^N y_i \right)}{\left(N \sum_{i=1}^N d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N d_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)} \quad (9)$$

که در این روابط N تعداد داده‌ها، d_i مقدار واقعی و y_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل EPR برای داده نام است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج عدد جریان پیش‌بینی شده با روش EPR و مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزش



شکل ۱۲. مقایسه نتایج عدد جریان پیش‌بینی شده با روش EPR و مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب رگرسیون (R^2) در کلیه شرایط بیش از ۰/۹۶۹۳ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل توسعه داده‌شده و انطباق مناسب عدد جریان پیش‌بینی شده با استفاده از مدل و عدد جریان اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است.

جدول ۱. جزئیات پارامترهای تنظیمی برای مدل EPR

توصیف پارامترها	تنظیم پارامترها
تابع تنظیمی	Secant Hyperbolic
نوع مدل	Statical Regression
نوع ارائه	$Y = \text{sum}(a_i * X1 * X2 * f(X1 * X2)) + a_0$
محدوده نماینده	[0, 0.5, 1, 1.5, 2, -0.5, -1, -1.5, -2]
تعداد عبارات	5
مقدار بایاس	0

حداقل و حداکثر مقدار پارامترهای ورودی و خروجی در شکل‌های (۲) الی (۱۰) داده شده است. به منظور توسعه مدل پیش‌بینی عدد جریان، پارامترها و مدل‌های مختلفی بر اساس پارامترهای تنظیمی روش EPR توسعه داده شد و سپس بهترین مدل بر پایه حداقل خطای مدلسازی انتخاب گردید. بهترین معادله به دست آمده بر اساس روش EPR برای پیش‌بینی عدد جریان به صورت زیر تعیین شد:

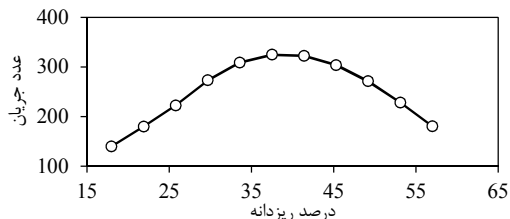
$$F_n = 0.018997 \times \text{Sech}\left(\frac{Va}{f^{0.5}}\right) + 0.64421 \times F^{1.5} \times \text{Sech}\left(\frac{F^{0.5} \cdot f^2}{S^{1.5}}\right) + 7.0381 \times S^2 \cdot F^2 \cdot Va \cdot VAM^{0.5} \cdot f^2 \times \text{Sech}\left(\frac{BP^{0.5}}{F^2 \cdot M^2}\right) + 0.32069 \times \left(\frac{C \cdot F \cdot M^{0.5}}{S^{0.5}}\right) \times \text{Sech}\left(\frac{F \cdot VAM \cdot f^{1.5}}{Va^{1.5}}\right) + 4.0171 \times C^{1.5} \times S^{1.5} \times BP^{0.5} \times \text{Sech}\left(\frac{Va^{0.5} \cdot VAM^2 \cdot M}{F^2 \cdot f}\right) \quad (7)$$

در این معادله (C) درصد مصالح درشت‌دانه، (S) درصد مصالح ریزدانه، (F%) درصد فیلر، (Va) درصد فضای خالی، (VMA%) فضای خالی مصالح سنگی، (BP%) درصد قیر، (M) استقامت مارشال، (f) روانی مارشال و (F_n) عدد جریان است.

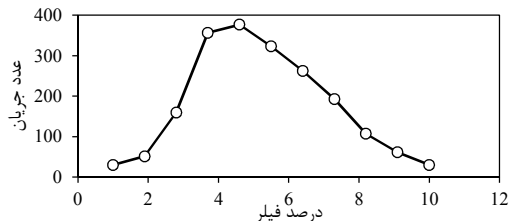
به منظور ارزیابی دقت مدل، نتایج عدد جریان به دست آمده از مدل EPR در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ترسیم شدند. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده برای سه مجموعه داده آموزش، آزمون و کل داده‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) نشان داده شده است. مقدار ضریب



شکل ۱۴. تأثیر درصد درشت دانه بر روی عدد جریان



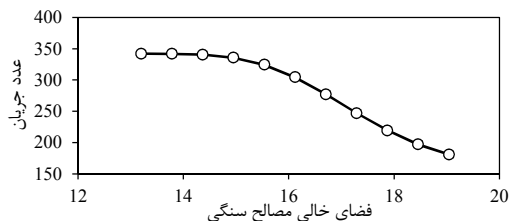
شکل ۱۵. تأثیر درصد درشت دانه بر روی عدد جریان



شکل ۱۶. تأثیر درصد فیلر بر روی عدد جریان.

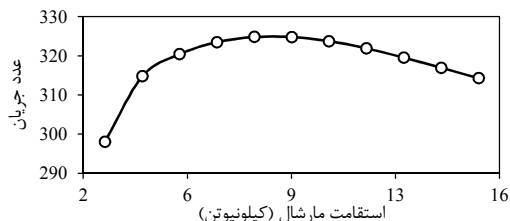


شکل ۱۷. تأثیر درصد فضای خالی بر روی عدد جریان

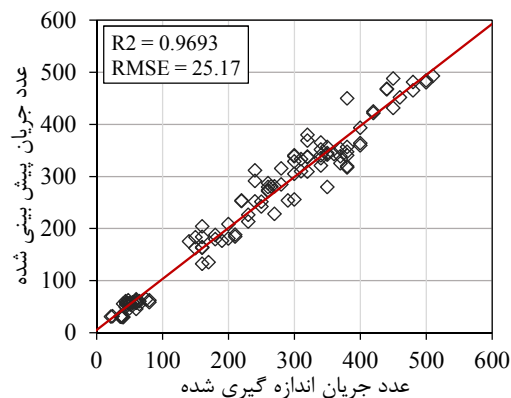


شکل ۱۸. تأثیر درصد فضای خالی مصالح سنگی بر روی عدد

جریان



شکل ۱۹. تأثیر استقامت مارشال بر روی عدد جریان



شکل ۱۳. عملکرد روش EPR بر اساس کل داده‌ها

خلاصه نتایج آماری حاصل از برازش مدل EPR جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط آسفالتی در جدول (۲) داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میانگین و انحراف معیار داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از مدل EPR و مقادیر اندازه‌گیری شده انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

جدول ۲. نتایج آماری حاصل از مدل EPR جهت پیش‌بینی عدد

مجموعه داده‌ها		آموزش		جریان	
پیش	میانگین	۲۲۶/۴	۲۳۱/۲	کل داده‌ها	آزمون
بینی شده	انحراف معیار	۱۳۹/۶	۱۵۳/۷	۲۲۷/۸	۱۴۳/۳
اندازه	میانگین	۲۲۶/۲	۲۲۸/۸	۲۲۷	۲۲۸/۸
گیری شده	انحراف معیار	۱۴۱/۹	۱۵۰/۸	۱۴۳/۹	۱۵۰/۸
	R^2	۰/۹۷۲	۰/۹۶۶۱	۰/۹۶۹۳	۰/۹۶۹۳

۵- تحلیل پارامتریک

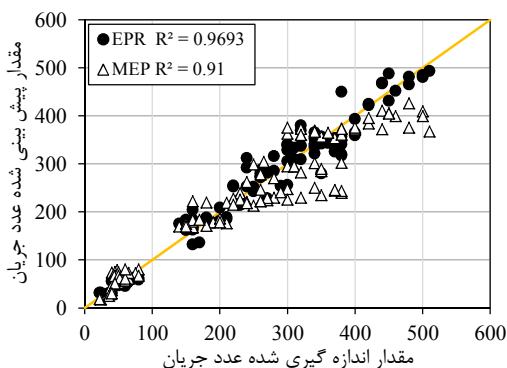
به منظور ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترها بر روی عدد جریان و اعتبارسنجی مدل EPR، تحلیل پارامتریک انجام شد. شکل‌های (۱۴) الی (۲۰) به ترتیب تأثیر درصد مصالح درشت‌دانه، درصد مصالح ریزدانه، درصد فیلر، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی، استقامت مارشال و روانی مارشال را بر روی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهند. به منظور ترسیم این نمودارها، پارامتر موردنظر بین کمترین درصد موجود در نمونه‌ها و بیشترین مقدار آن به یازده کلاس تقسیم شد و سایر پارامترها برابر با مقادیر میانگین در نظر گرفته شدند.

۶-۱- مقایسه با مدل برنامه‌نویسی چندجمله‌ای (MEP)

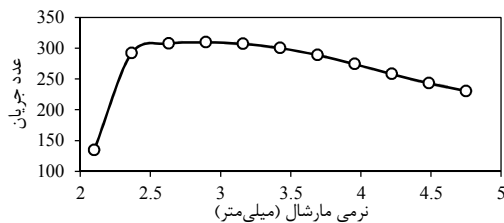
شکل کلی مدل برنامه‌نویسی چندجمله‌ای (MEP) توسعه داده شده توسط میرزاحسینی و همکاران به صورت زیر است (Mirzahassemi et al, 2011):

$$\log(F_n) = \frac{-4 \times F_{\%} - B_{\%}^2}{VMA_{\%} \times \text{Exp}(F_{\%})} + \frac{F_{\%} + 2 \times VMA_{\%} + 1 / M_{kN} / F_{mm}}{VMA_{\%}} \quad (10)$$

در شکل (۲۱) انطباق نتایج حاصل از هر یک از مدل‌های EPR و MEP با نتایج عدد جریان اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب رگرسیون (R^2) مدل MEP در مقایسه با مدل EPR کمتر است که این موضوع نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل EPR در قیاس با مدل MEP جهت پیش‌بینی عدد جریان است. مقدار ضریب رگرسیون در مدل MEP برای کل داده‌ها برابر با ۰/۹۱ به دست آمده است، در حالی که ضریب رگرسیون برای کل داده‌ها در مدل EPR مقداری برابر با ۰/۹۶۹۳ داشته است که به نسبت باعث برتری مدل EPR در مقابل مدل MEP شده است. همچنین مقایسه این دو مدل نشان می‌دهد که در مدل EPR از ورودی‌های بیشتری (درصد درشت‌دانه، درصد ریزدانه، درصد فیلر، روانی مارشال، استقامت مارشال، درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی و درصد قیر) استفاده شده است؛ در حالی که برای مدل MEP تنها از پارامترهای درصد فیلر، روانی مارشال، استقامت مارشال و درصد فضای خالی مصالح سنگی استفاده شده است؛ بنابراین می‌توان دید که در مدل MEP از تأثیر درصد درشت‌دانه و ریزدانه بر روی عدد جریان مخلوط آسفالتی صرف‌نظر شده است.



شکل ۲۱. مقایسه مدل EPR و MEP جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۲۰. تأثیر نرمی مارشال بر روی عدد جریان

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر تا مقدار مشخصی عدد جریان افزایش و پس‌از آن کاهش می‌یابد. بنابراین برای داشتن آسفالتی با حداکثر مقاومت شیارشدگی باید نسبت مصالح درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر به ترتیب حدود ۵۷، ۳۷/۵ و ۴/۶ درصد باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که درصد بهینه فضای خالی مخلوط آسفالتی برای داشتن بیشترین عدد جریان در حدود ۴ درصد است که در اکثر استانداردهای مطرح جهت طرح اختلاط به آن اشاره شده است. ارزیابی تأثیر فضای خالی مصالح سنگی بر روی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که با افزایش VMA تا حدود ۱۵ درصد مقاومت شیار شدگی ثابت باقی می‌ماند و پس‌از آن عدد جریان کاهش می‌یابد. مطالعات متعددی نیز نشان می‌دهند که مخلوط آسفالتی مقاوم در برابر شیارشدگی باید VMA پایین داشته باشد (Sousa, Craus, Monismith, 1991; Lavin, 2014; Pardhan, 1995; Cooper, Brown, Pooley, 1985). شکل ۱۹ و ۲۰ نیز نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت مارشال و نرمی مارشال تا مقدار مشخصی مقاومت شیارشدگی افزایش می‌یابد و سپس کم می‌شود. این موضوع به دلیل اتصال بهتر سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی تا یک مقدار مشخص قیر است و افزایش درصد قیر سبب کاهش استحکام مخلوط می‌شود.

۶-۲ مقایسه مدل توسعه داده‌شده با سایر مدل‌ها

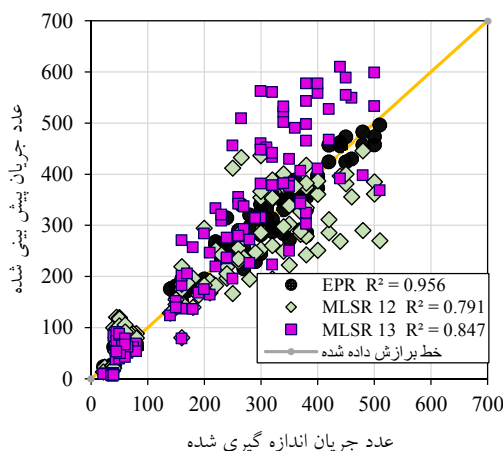
به منظور ارزیابی توانایی روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی، نتایج حاصل از این روش برای پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی با نتایج سایر مدل‌های توسعه داده‌شده در این زمینه مقایسه گردید. برای این منظور از نتایج مدل برنامه‌نویسی چندجمله‌ای (MEP) توسعه داده‌شده توسط میرزاحسینی و همکاران (Gandomi et al, 2010)، روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)، رگرسیون چندگانه حداقل مربعات^۲ توسعه داده‌شده توسط گندمی و همکاران (Gandomi et al, 2010) و روش ماشین بردار پشتیبان توسعه داده‌شده توسط یان و همکاران (Yan, Ge, Zhang, 2014) استفاده شده است.

دلیل سادگی به طور گسترده‌ای استفاده شد. این مدل توسط گندمی و همکاران برای پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی به کار گرفته شده است (Gandomi et al, 2010). در این تحقیق از دو معادله توسعه داده شده توسط گندمی و همکاران استفاده شده است. این معادلات به ترتیب با معادلات (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند.

$$\log(F_n) = -0.4893 \times C_{\%}/S_{\%} - 0.0019 \times V_{a\%} - 0.1490 \times VMA_{\%} - 0.0639 \times M_{(KN)}/F_{mm} + 5.7881 \quad (12)$$

$$\log(F_n) = -0.4886 \times C_{\%}/S_{\%} - 0.1492 \times VMA_{\%} - 0.0642 \times M_{(KN)}/F_{mm} + 5.7818 \quad (13)$$

در معادله ۱۲، نسبت درشت‌دانه به ریزدانه، تخلخل، درصد فضای خالی مصالح سنگی و نسبت استقامت مارشال به روانی مارشال به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است؛ درحالی‌که در معادله شماره ۱۳، سه پارامتر نسبت درشت‌دانه به ریزدانه، درصد فضای خالی مصالح سنگی و نسبت استقامت مارشال به روانی مارشال به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۳. مقایسه مدل EPR و MLSR جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی.

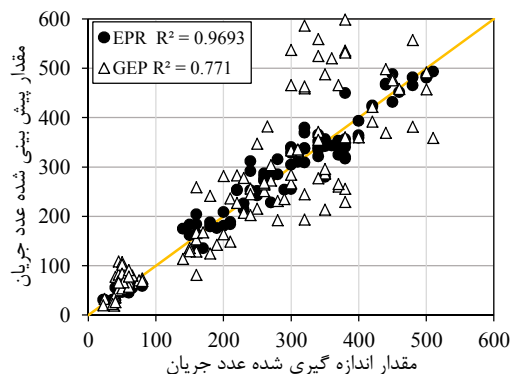
قابلیت روش EPR و دو معادله رگرسیون خطی پیشنهاد شده به منظور پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی در شکل (۲۳) مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دقت معادله (۱۳) با ضریب رگرسیون ۰/۸۴۷ بیشتر از معادله (۱۲) با ضریب رگرسیون ۰/۷۱۹ است. همچنین دیده می‌شود که دقت این دو مدل رگرسیون خطی در مقایسه با روش EPR با ضریب رگرسیون

۶-۲- مقایسه با مدل برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)

این مدل توسط گندمی و همکاران توسعه داده شده است (Gandomi et al, 2010). این محققین ابتدا شش مدل مختلف بر اساس روش برنامه‌نویسی بیان ژن توسعه دادند و سپس بهترین مدل را از بین این شش مدل انتخاب و پیشنهاد نمودند. این مدل به صورت زیر است:

$$\log(F_n) = 0.78 + \text{Log} \left(2 - \frac{5}{VMA_{\%}} \right) + \frac{16}{VMA_{\%}} + \frac{VMA_{\%}}{VMA_{\%} - M_{KN} (M_{KN} \div F_{mm})} - \frac{VMA_{\%} \times C_{\%}}{5 \times S_{\%} \times (9 - (M_{KN} \div F_{mm}))} \quad (11)$$

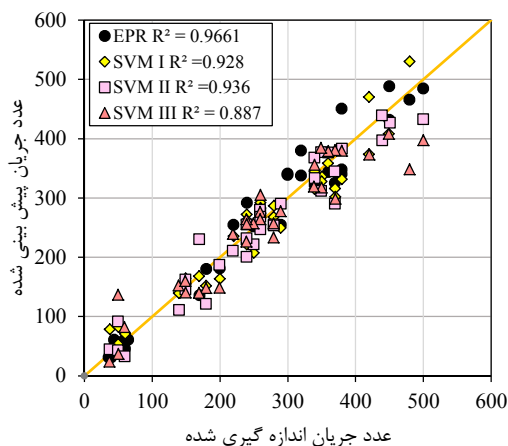
پارامترهای ورودی این مدل شامل درصد درشت‌دانه، درصد ریزدانه، نرمی مارشال، استقامت مارشال و درصد فضای خالی مصالح سنگی می‌باشند. به عبارت دیگر، در این مدل تأثیر پارامتر درصد فیلر در نظر گرفته نشده است. قابلیت روش EPR و GEP به منظور پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی در شکل (۲۲) مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دقت مدل GEP در مقایسه با مدل EPR بسیار پایین‌تر است؛ به طوری‌که ضریب رگرسیون حاصل از مدل GEP برابر با ۰/۷۷۱ و ضریب رگرسیون مدل EPR برابر با ۰/۹۶۹۳ به دست آمده است.



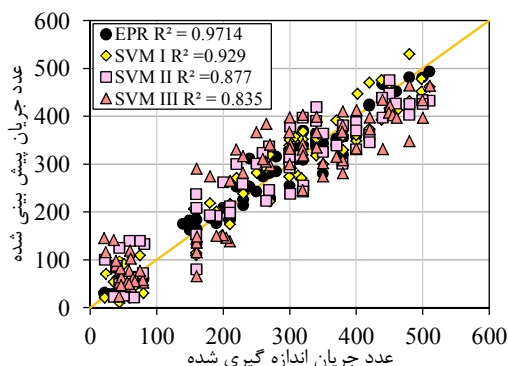
شکل ۲۲. مقایسه مدل EPR و GEP جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی.

۶-۳- مقایسه با مدل رگرسیون چندگانه حداقل مربعات (MLSR)

مدل رگرسیون خطی چندگانه حداقل مربعات در درجه اول به



شکل ۲۴. مقایسه مدل EPR و SVM جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بر اساس داده‌های آزمون



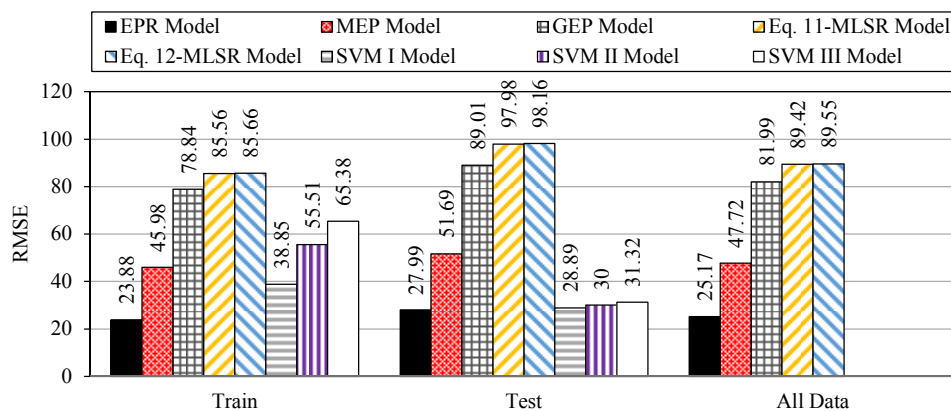
شکل ۲۵. مقایسه مدل EPR و SVM جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بر اساس داده‌های آموزش

شکل (۲۶) خطای ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE) را برای روش‌های مختلف بر اساس داده‌های آموزش و آزمون نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مدل پیشنهادشده در این مقاله (روش EPR) در مقایسه با مدل‌های دیگر خطای بسیار کمتری دارد و بنابراین این مدل با قابلیت اطمینان بیشتری توانایی پیش‌بینی عدد جریان و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس اطلاعات حاصل از طرح اختلاط مارشال داراست.

۰/۹۶۹۳ بسیار کمتر است.

۶-۴- مقایسه با مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

مقایسه بعدی با مدل توسعه داده‌شده توسط یان و همکاران بر پایه روش ماشین بردار پشتیبان^۳ انجام شده است (Yan, Ge, Zhang, 2014). در تحقیق انجام‌شده توسط یان و همکاران (۲۰۱۴)، بر اساس توابع کرنل مختلف مدل‌های مختلفی توسعه داده شد و سپس سه مدل SVM I، SVM II، و SVM III بر پایه مدل تابع کرنل RBF به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب شدند (Yan, Ge, Zhang, 2014). برای مدل SVM I چهار پارامتر نسبت درشت‌دانه به ریزدانه، فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی و نسبت ثابت مارشال به جریان مارشال به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. در مدل SVM II، سه پارامتر نسبت درشت‌دانه به ریزدانه، فضای خالی مصالح سنگی و نسبت ثابت مارشال به جریان مارشال به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. همچنین در آخرین مدل SVM III، دو پارامتر نسبت درشت‌دانه به ریزدانه و فضای خالی بین سنگدانه‌ها به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است (Yan, Ge, Zhang, 2014). شکل کلی معادله مورد استفاده در روش SVM پیچیده است و از یکسری توابع کرنل تشکیل شده است که در تحقیق انجام‌شده توسط یان و همکاران به آن‌ها اشاره نشده بود. به همین دلیل با توجه به نمودارهای موجود در مقاله، داده‌های مربوط به پیش‌بینی هر یک از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان استخراج شد. برای مقایسه این دو روش از اطلاعات اصلی مقاله استفاده شد. قابلیت روش EPR و سه مدل مبتنی بر روش SVM به ترتیب برای داده‌های آزمون و آموزش در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای داده‌های آموزش و آزمون، مدل اول به ترتیب ضریب رگرسیون یکسان ۰/۹۲ را به دست می‌دهد. همچنین ضریب رگرسیون برای داده‌های آموزش و آزمون مدل دوم به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۹۳ و برای مدل سوم به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸۸ است. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید، ضریب رگرسیون مربوط به روش EPR برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۷۱۴ و ۰/۹۶۶۱ است که نشان‌دهنده دقت بالاتر روش توسعه داده‌شده در این مقاله در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر روش SVM است.



شکل ۲۶. مقدار ریشه متوسط مربعات خطا برای مدل‌های مورد بررسی

۹-مراجع

- Abdul Ghani, N., Shahin, M., & Nikraz, H. (2012), "Use of evolutionary polynomial regression (EPR) for prediction of total sediment load of Malaysian rivers". *International Journal of Engineering*, 6(5), pp.262-277.
- Alavi, A.H., Ameri, M., Gandomi, A.H., & Mirzahosseini, M.R. (2011), "Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method", *Construction Building Materials*, 25(3), pp.1338-1355.
- Bahuguna, S., (2004), "Permanent deformation and rate effects in asphalt concrete: Constitutive modeling and numerical implementation", Ph.D. thesis, Montana State University.
- Balf, M. R., Noori, R., Berndtsson, R., Ghaemi, A., & Ghiasi, B., (2018), "Evolutionary polynomial regression approach to predict longitudinal dispersion coefficient in rivers". *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 67(5), pp.447-457.
- Berardi L., Giustolisi O., Kapelan Z. & Savic, D.A., (2008), "Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR." *Journal of Hydro Informatics*, 10(2), pp.113-126.
- Bruno, D. E., Barca, E., Goncalves, R. M., de Araujo Queiroz, H. A., Berardi, L., & Passarella, G., (2018), "Linear and evolutionary polynomial regression models to forecast coastal dynamics: Comparison and reliability assessment". *Geomorphology*, 300, pp.128-140.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ساده با استفاده از روش EPR جهت پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نتایج طرح اختلاط مارشال توسعه داده شده است. برای این منظور از یک پایگاه داده متشکل از ۱۱۸ رکورد حاصل از آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی مختلف استفاده شد. ورودی‌های مدل توسعه داده شده شامل درصد مصالح درشت‌دانه، درصد مصالح ریزدانه، درصد فیلر، درصد فضای خالی، درصد قیر، درصد فضای خالی مصالح سنگی، استقامت مارشال و نرمی مارشال و خروجی مدل عدد جریان مخلوط آسفالتی است. ضریب رگرسیون برای مدل EPR توسعه داده شده بیش از ۰/۹۶ به دست آمد. تحلیل پارامتریک مدل توسعه داده شده بیانگر انطباق نتایج مدل با رفتار فیزیکی واقعی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین نتایج این تحقیق نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل توسعه داده شده در این مقاله در مقایسه با مدل‌های توسعه داده شده پیشین است. بنابراین از مدل ساده توسعه داده شده در این تحقیق می‌توان به‌منظور پیش‌بینی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی بدون نیاز به انجام آزمایش پیچیده خزش دینامیکی استفاده نمود.

۸- پی‌نوشت‌ها

- 1-Evolutionary Polynomial Regression (EPR)
- 2-MLSR
- 3-Support Vector Machine (SVM)

Excel based paradigm to enhance transfer of research achievements on data-driven modeling”.

-Lavin, P., (2014), “Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects”, CRC Press.

-Mansourian, A., Ghanizadeh, A. R., & Golchin, B., (2019), Modeling of Resilient Modulus of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement using Feed-Forward and Generalized Regression Neural Networks. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), pp.74-92.

-Marques, A., & Correia, P. L., (2012), “Automatic road pavement crack detection using SVM”. Lisbon, Portugal: Dissertation for the Master of Science Degree in Electrical and Computer Engineering at Instituto Superior Técnico.

-Mirzahosseini, M.R., Aghaeifar, A., Alavi, A. H., Gandomi, A.H., & Seyednour, R., (2011), “Permanent deformation analysis of asphalt mixtures using soft computing techniques”, *Expert Systems with Applications*, 38(5), pp.6081-6100.

Özgan, E., Korkmaz, I., & Emiroğlu, M., (2012), “Adaptive neuro-fuzzy inference approach for prediction the stiffness modulus on asphalt concrete”, *Advances in Engineering Software*, 45(1), pp.100-104.

Pardhan, M., (1995), “Permanent deformation characteristics of asphalt-aggregate mixture using varied material and modeling procedure with Marshall method”, Ph.D. thesis, Montana State University, Bozeman, MT.

Saltan, M., & Terzi, S. (2005), “Comparative analysis of using artificial neural networks (ANN) and gene expression programming (GEP) in back calculation of pavement layer thickness”, 12, pp.42-50.

Savic D.A., Giustolisi O., Berardi L., Shepherd W., Djordjevic S. & Saul A., (2006), “Modelling sewer failure by evolutionary computing.” *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 159(2), pp.111-118.

Selection”, MIT Press, Massachusetts.

-Cooper, K. E., Brown, S., & Pooley, G., (1985), “The design of aggregate gradings for asphalt basecourses”. Paper presented at the Association of Asphalt Paving Technologists Proc.

-FHWA, (1998), DTFH 61-94-R-00045: “Interim task C report of preliminary recommendations for the simple performance test”.

-Gandomi, A.H., Alavi, A.H., Mirzahosseini, M.R., & Nejad, F.M., (2010), “Nonlinear genetic-based models for prediction of flow number of asphalt mixtures”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), pp.248-263.

-Ghorbani, A., & Hasanzadehshooili, H., (2018), “Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing”. *Soils and foundations*, 58(1), pp.34-49.

-Giustolisi O., Doglioni A., Savic D.A. & Pierro F., (2008), “An evolutionary multi objective strategy for the effective management of groundwater resources.” *Water Resources Research Journal*, 44(W01403), pp.1-14.

Giustolisi, O., & Savic D.A. (2006), “A symbolic data driven technique based on Evolutionary Polynomial Regression.” *Journal of Hydroinformatics*, 8(3), pp.207-222.

-Goldberg D.E. (1989), “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning”, Massachusetts: Addison Wesley.

-Kaloush, K.E., (2001), “Sample performance test for permanent deformation of asphalt mixture”. Ph.D. thesis, Arizona State University, Tempe, AZ.

-Kaloush, K.E., Witczak, M., Roque, R., Brown, S., D'Angelo, J., Marasteanu, M., & Masad, E. (2002), “Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures”. Paper presented at the Asphalt Paving Technology 2002.

-Kim, Y. R., (2008), “Modeling of asphalt concrete”.

-Koza J.R., (1992), “Genetic programming: on the programming of computers by means of natural.

-Lauccelli, D., Berardi, L., Doglioni, A., & Giustolisi, O. (2012), “EPR-MOGA-XL: an

- Wu, Z., Hu, S., & Zhou, F., (2014), "Prediction of stress intensity factors in pavement cracking with neural networks based on semi-analytical FEA", *Expert Systems with Applications*, 41(4), pp.1021-1030.
- Yan, K.z., Ge, D.D., & Zhang, Z., (2014), "Support vector machine models for prediction of flow number of asphalt mixtures", *International Journal of Pavement Research Technology*, 7(1), pp.31-39.
- Yin, Z.-Y., Jin, Y.-F., Huang, H.-W., & Shen, S., L., (2016), "Evolutionary polynomial regression based modelling of clay compressibility using an enhanced hybrid real-coded genetic algorithm". *Engineering geology*, 210, pp.158-167.
- Zhou, F., Scullion, T., & Sun, L., (2004), "Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 130(4), pp.486-494.
- Ziari, H., Amini, A., Goli, A., & Mirzaiyan, D. (2018), "Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks", *Construction and Building Materials*, 160, pp.415-426.
- Sollazzo, G., Fwa, T., & Bosurgi, G., (2017), "An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements". *Construction and Building Materials*, 134, pp.684-693.
- Sousa, J.B., Craus, J., & Monismith, C.L., (1991), "Summary report on permanent defomation in asphalt concrete", (No. SHRP-A-318).
- Terzi, S. (2007). "Modeling the pavement serviceability ratio of flexible highway pavements by artificial neural networks". *Construction and Building Materials*, 21(3), 590-593.
- Watson A., Parmee I. (1996). "System identification using genetic programming", *Proceedings of ACEDC'96*, University of Plymouth, United Kingdom.
- Williams, R.C., Robinette, C.J., Bausano, J., & Breakah, T., (2007), "Testing of wisconsin asphalt mixtures for the forthcoming aashto mechanistic-empirical pavement design procedure": Final Report. Wisconsin Highway Research Program.
- Witczak, M. W., (2002), "Simple performance test for superpave mix design", *Transportation Research Board*, 465.

Modeling of Flow Number of Asphalt Mixtures Using Evolutionary polynomial Regression (EPR) Method

Ali Reza Ghanizadeh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Nasrin Heidarabadizadeh, M.Sc., Grad., Advanced Laboratory on Bitumen and Asphalt Mixes, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Arash Ziaie, Instructor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Received: July 2021-Accepted: August 2021

ABSTRACT

Rutting is among the most important distresses in flexible pavements, which is mainly influenced by asphalt mixes properties at high temperatures. There are different methods for measuring the rutting resistance of asphalt mixes. Flow number of asphalt mix, which is measured experimentally by dynamic creep test is one of the most commonly used rutting index, which requires advanced devices, notable cost and time. This paper aims to develop a simple model for predicting the flow number of asphalt mixes using Evolutionary polynomial Regression (EPR). The developed model can be used for predicting flow number based on Marshall mix design parameters including percentage of fine and coarse aggregates, bitumen content, filler content, air void content, void in mineral aggregate, Marshall stability, and flow. The coefficient of determination (R^2) of model in case of training and testing set is 0.9714, and 0.969, respectively, which confirms the high accuracy of model. Comparison of the developed model with the existing models shows the superior performance of the developed model. In addition, the parametric analysis indicates the proper conformity of the developed model with the physical behavior of the asphalt mixtures.

Keywords: Flow Number, Rutting Potential, Marshall Mixing Design Parameters, Evolutionary Polynomial Regression (EPR) Method