

علمی - تخصصی

توسعه مدلی جامع به منظور ارزیابی میزان مصرف فوم و نرخ پیشروی در ماشین حفار EPB

وحید امیرکیایی^{۱*}، سهراب داودی^۲

۱- کارشناسی ارشد (مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان)

۲- دانشجوی دکتری (مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه علوم و تحقیقات)

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

در این مطالعه به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد ماشین حفار از پارامترهای نرخ پیشروی و میزان مصرف فوم به منظور بهسازی زمین استفاده شده است. جهت بررسی عملکرد ماشین حفار EPB در این پژوهش، از ۴ مجموعه پایگاه داده، شامل اطلاعات حفاری پروژه خط یک مترو قم، پروژه خط یک مترو شیراز (تونل شرقی و غربی)، پروژه خط دو مترو اصفهان و پروژه خط یک مترو اصفهان که با استفاده از ماشین حفار EPB حفاری شده‌اند، استفاده شد. بر اساس این مجموعه پایگاه داده مدلهایی با تکیه بر تکنیک‌های آماری شامل آنالیز رگرسیون (رگرسیون ساده، چند متغیره خطی (MLR) و غیرخطی (MNLR)) و الگوریتم حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) به منظور پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی توسعه داده شدند. سپس به منظور بررسی دقیق‌تر و ارزیابی بهتر مدل‌های تجربی و هوشمند ارائه شده جهت پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، مقادیر آماری جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و واریانس خطا (VAF) برای هر مدل توسعه یافته با استفاده از مجموعه داده‌های آزمون محاسبه شدند. مقایسه مقادیر محاسبه شده R^2 ، VAF و NRMSE برای مدل‌های توسعه یافته جهت پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی نشان دادند که مدل ارائه شده بر اساس الگوریتم LS-SVM نسبت به سایر مدل‌ها، دقت فراوانی در پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی ماشین حفار EPB دارد که مقادیر شاخص‌های R^2 ، VAF و NRMSE برای مدل توسعه یافته جهت پیش‌بینی میزان مصرف فوم برابر با ۰/۹۴۵، ۰/۹۴۳۵۶ و ۰/۲۳۷ و برای مدل توسعه یافته جهت پیش‌بینی نرخ پیشروی برابر با ۰/۷۴۱، ۰/۷۴۰۷۱ و ۰/۱۴۹ می‌باشند. شایان ذکر است با توجه به دقت بالای پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_t) و نرخ پیشروی (AR)، مدل‌های توسعه یافته بر اساس الگوریتم LS-SVM می‌توانند به عنوان مدل‌های کاربردی در صنعت حفاری مکانیزه نقش قابل توجهی ایفا کنند.

کلیدواژه‌ها: حفاری مکانیزه، ماشین حفار EPB، آنالیز رگرسیون، نرخ پیشروی، میزان مصرف فوم.

۱. مقدمه

آتشباری یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفاری است که به‌طور گسترده استفاده می‌شود. اما در اوایل دهه ۱۹۵۰ شاخه علمی جدیدی به نام حفاری مکانیکی متولد شد که موجب رقابت شدید روش‌های حفاری مکانیکی و چال زنی- آتشباری شد. امروزه حفاری مکانیکی سهم مهمی در صنعت حفاری به‌عنوان یکی از جایگزین‌های روش کلاسیک چال زنی- آتشباری دارد. حفاری مکانیزه امکان حفاری در مناطق سنگی و خاکی را دارد. لذا با افزایش شهرسازی تقاضا برای حفر تونل در زمین‌های نرم

جوامع مدرن امروزی نیازمند حفاری پوسته زمین خصوصاً برای اهداف معدنکاری و عمرانی می‌باشند. همگام با توسعه فناوری‌های مختلف نیاز به حفاری نیز افزایش یافته است. این نیاز خصوصاً بعد از جنگ جهانی دوم به شدت افزایش یافت و بسیاری از پیشرفت‌ها در صنعت حفاری به‌ویژه در روش‌های حفاری مکانیکی^۲ (مکانیزه) در این دوره انجام گرفته است. چال زنی-

² Mechanical excavation

میزان تزریق فوم در طی فرآیند حفاری می‌باشد که میزان تزریق آن در خاک می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر روی سایر پارامترهای ماشین حفار ایجاد کند و همچنین افزایش بهره‌وری را به همراه داشته‌باشد. تاکنون پژوهشگران بسیاری در ارزیابی عملکرد ماشین حفار TBM به‌وسیله پیش‌بینی نرخ نفوذ تحقیقات مختلفی انجام داده‌اند. برخی از این مطالعات به شرح زیر می‌باشند:

در یک مطالعه در سال ۲۰۰۱ در یک مطالعه میدانی به بررسی تأثیر میزان نرخ تزریق فوم بر تخلخل و پارامتر ذاتی خاک (زاویه اصطکاک خاک) پرداخت. نتایج مطالعات وی نشان دادند که با افزایش فوم تخلخل خاک افزایش یافته و میزان زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد [۴].

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۷ یک حامل ماریپیچی به همراه مخزن تحت فشار به‌منظور شبیه‌سازی شرایط حفاری با ماشین EPB طراحی کردند. با توجه به اینکه تنظیم فشار سینه کار مناسب در طی فرآیند حفاری با استفاده از ماشین EPB به‌منظور جلوگیری از نشست سطح زمین از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است، یکی از مهم‌ترین پارامترهای اساسی برای این امر، انتقال مواد حفاری شده از محفظه فشار به بیرون با استفاده از حامل ماریپیچی می‌باشد. لذا انتقال راحت مواد حفاری شده با استفاده از حامل ماریپیچی نیازمند این است که مواد حفاری شده در وضعیت استاندارد در زمان حفاری عمل‌آوری (بهسازی) شده باشند. سپس آن‌ها در این مطالعه با انجام آزمایش‌های مختلف جهت بهسازی خاک (ماسه) با استفاده از جداول استاندارد FNARC (رسیدن به مقدار بهینه $FIR=40$ ، $FER=17$ و $C_f=2$) توانستند تا حد زیادی میزان گشتاور و سرعت چرخش حامل ماریپیچی را در انتقال مواد حفاری شده کاهش دهند [۵].

در یک مطالعه به بررسی ارتباط بین نرخ تزریق عامل عمل-آوری خاک با نرخ نفوذ در ۲۰۰ سیکل حفاری (۳۰۰ متر) مترو خط ۷ تهران پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با در نظر گرفتن دو حالت، دور کله حفار ثابت و نسبت انبساط فوم ثابت و همچنین متغیر بودن این دو پارامتر، به بررسی تأثیر نرخ تزریق فوم بر تغییرات نرخ نفوذ ماشین حفار پرداختند [۶].

در تحقیقی دیگر، به بررسی فرآیند بهسازی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پرداخته شد. در این پژوهش به‌منظور رسیدن به یک شرایط بهینه و مناسب برای بهسازی خاک از روش آزمایش حامل ماریپیچی و آزمایش اسلامپ برای سه سازند مختلف توده سنگی استفاده گردید [۷].

در پژوهشی دیگر، در سال ۲۰۱۸ در یک تونل مترو در ترکیه

افزایش یافته است، زیرا اغلب مناطق شهری بر روی زمین‌های نرم واقع شده و اکثر سامانه‌های زیرساختی باید در اعماق کم جایگاه زمین‌های نرم در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند، ساخته شوند. علاوه بر خاک‌ها، سنگ‌های خیلی ضعیف و هوازده نیز به‌عنوان زمین نرم در نظر گرفته می‌شوند. در این شرایط مهم‌ترین مشکل تونل سازی ناپایداری فضای حفاری شده می‌باشد. از جمله مشکلات می‌توان به ریزش سقف، سینه‌کار و نشست سطح زمین اشاره کرد. برای این منظور طی سه، چهار دهه اخیر ماشین‌های حفر تونل^۱ (TBM) سپری با سینه‌کارهای تحت فشار به‌منظور افزایش ایمنی و پایداری تونل توسعه یافته‌اند [۱،۲]. در TBM‌های تعادل فشار زمین (EPB)، فشارهای زمین و آب در خاک‌های چسبنده غیر پایدار (غیر خود نگهدار) به‌وسیله فشار سینه‌کار که توسط مواد حفاری شده تأمین می‌شود به تعادل می‌رسد. مواد حفاری شده درون اتاقک حفاری را کاملاً پر می‌کنند و با فشاری که از طریق سیلندرهای پیشران به آن‌ها وارد می‌شود فشار سینه‌کار را ایجاد می‌کنند. معمولاً به‌منظور بهبود شرایط کاری مواد حفاری شده به‌وسیله عامل‌های کف‌ساز^۲ و پلیمرها بهبود داده می‌شوند (مواد حفاری شده یا خاک پردازش شده^۳). مواد حفاری شده به‌وسیله یک حامل ماریپیچی چرخشی^۴ از اتاقک به نوار پشتی TBM انتقال می‌یابد [۳]. سرعت چرخش حامل ماریپیچی و درجه تخلیه حامل ماریپیچی را می‌توان به‌منظور کنترل فشار سینه‌کار تنظیم کرد. در این روش، انتقال بیش‌ازحد مواد حفاری شده منجر به ناپایداری سینه‌کار و نشست سطح زمین می‌شود و عدم انتقال مواد موجب فشارهای بیش‌ازحد شده که منجر به تراکم و تورم زمین می‌شود. امروزه برای حفاری تونل‌ها با توجه به شرایط ژئوتکنیکی، عمق، طول، نوع کاربری، میزان پیشروی، میزان سرمایه موردنظر و مدت‌زمان انجام پروژه، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. امروزه روش حفاری مکانیزه تمام مقطع با توجه به افزایش طول تونل‌ها و مواجهه با شرایط سخت ژئوتکنیکی، روش منتخب اجرا در بیشتر پروژه‌های تونلی داخل و خارج از کشور می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مسائل در تونل‌هایی که با استفاده از ماشین حفار EPB حفر می‌شوند، مطالعات مربوط به زمان‌بندی و مدیریت (از نظر مصرف انرژی و تجهیزات حفاری) پروژه‌های تونل است که به تعیین دقیق و صحیح عملکرد دستگاه و بهره‌وری آن بستگی دارد. به‌طور کلی عملکرد ماشین حفار EPB با شاخص‌های مختلفی سنجیده می‌شوند که مهم‌ترین شاخصی که زمان اجرای پروژه متأثر از آن است، نرخ پیشروی (میزان نفوذ) دستگاه حفاری می‌باشد. همچنین یکی دیگر از پارامترهایی که می‌تواند در میزان مصرف انرژی دستگاه و میزان نفوذ و پیشروی دستگاه در طی حفاری تأثیرگذار باشد،

³ Processed muck/soil

⁴ Rotating screw conveyor

¹ Tunnel boring machine

² Foaming agents

پیشروی ماشین حفار EPB در تونل نورسگین به طول ۵/۶ کیلومتر پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به منظور پیش‌بینی میزان نرخ پیشروی از الگوریتم SVM استفاده کردند [۱۴].

همان‌گونه که در مطالعات فوق ذکر شد، همه مطالعات به بررسی و تأثیر نرخ تزریق فوم پرداخته‌اند و در هیچ مطالعه‌ای هنوز مدلی که بتواند با استفاده از پارامترهای عملیاتی ماشین حفار EPB و ویژگی‌های خاک میزان مصرف فوم در هر مرحله حفاری را پیش‌بینی کند، ارائه نشده است. نقطه مشترک اکثر مطالعاتی که در مورد ارزیابی عملکرد ماشین حفار EPB با استفاده از تخمین نرخ پیشروی، بیان شدند این است که ماشین‌های حفار مورد استفاده جهت حفاری، در یک منطقه کاملاً سنگی یا توده سنگی بوده‌اند و میزان نرخ نفوذ یا به عبارتی میزان پیشروی در سنگ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است (پیش‌بینی شده است) و این بدان معناست که در مورد ارزیابی کارایی ماشین حفار EPB که در یک منطقه کاملاً خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطالعات اندکی صورت گرفته است. در نهایت با توجه به مطالبی که در مورد اهمیت دو پارامتر نرخ پیشروی و نرخ مصرف فوم ارائه شدند، می‌توان بیان کرد که توسعه مدل‌هایی به منظور پیش‌بینی این دو پارامتر، می‌توانند نقش مهمی را در مدیریت هزینه‌های حفاری ایفا کنند. بنابراین هدف اصلی در این مطالعه توسعه مدل‌هایی به منظور پیش‌بینی میزان مصرف فوم و نرخ پیشروی ماشین حفار EPB با تکیه بر روش‌های آنالیز رگرسیون (چند متغیره خطی و غیرخطی) و روش هوشمند حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) می‌باشد. لازم به ذکر است که این پژوهش بر روی چهار پروژه حفاری خط یک مترو اصفهان، خط دو مترو اصفهان، خط مترو قم و خط یک متروی شیراز که به صورت مکانیزه با استفاده از ماشین حفار EPB حفر شده‌اند، انجام گرفته است. لذا پایگاه داده مورد استفاده به منظور توسعه مدل، شامل ۱۱۰۴۸ مورد رینگ حفاری می‌باشد. از مهم‌ترین مزیت این مدلی که توسعه داده خواهد شد، این است که می‌توان قبل از انجام فرآیند حفاری و با وارد کردن پارامترهای ورودی مدل (پارامترهای دستگاه و خاک)، یک ارزیابی کلی از میزان نرخ پیشروی و نرخ مصرف فوم ماشین حفار به دست آورد. در نهایت این مدل‌ها می‌توانند به صورت یک مدل کاربردی در صنعت حفاری مکانیزه جهت پیش‌بینی نرخ پیشروی و میزان مصرف فوم ماشین‌های حفار EPB، نقش کاربردی زیادی را ایفا کنند. در ادامه پایگاه داده مورد مطالعه، توسعه مدل‌ها و ارزیابی کارایی مدل‌ها شرح داده می‌شوند.

به بررسی نحوه تأثیر نرخ تزریق فوم بر روی پارامترهای نرخ نفوذ، نیروی پیشران، گشتاور و میزان توان مصرفی ماشین حفار EPB پرداختند که بررسی نتایج نشان دادند که با افزایش نرخ تزریق فوم میزان توان مصرفی کاهش و سایر پارامترهای فوق افزایش می‌یابند [۸].

همچنین در تحقیق دیگر، به بررسی تأثیر میزان تزریق فوم بر روی پارامترهای نرخ نفوذ و انرژی ویژه ماشین EPB در یک تونل انتقال آب در ترکیه پرداختند. بررسی‌ها در این مطالعه نشان دادند که با افزایش نرخ تزریق فوم میزان نرخ نفوذ کاهش و انرژی ویژه افزایش پیدا می‌کند [۹].

در سال ۲۰۰۱ با استفاده از سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی میزان نرخ نفوذ ماشین حفار TBM را در سنگ سخت پیش‌بینی کردند. آن‌ها به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ، پارامترهای ماشین حفار، هندسه مسیر و ویژگی‌های توده سنگ را در نظر گرفتند و در نهایت توانستند مدل‌هایی با دقت قابل قبول جهت تخمین نرخ نفوذ ارائه دهند [۱۰]. همچنین در تحقیق مشابه دیگر، برنادوز و پالی آمپاکوز در سال ۲۰۰۴ با تکیه بر الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی^۱ (ANN) توانستند نرخ پیشروی ماشین TBM را با استفاده از پارامترهای توده سنگ و هندسه تونل پیش‌بینی کنند [۱۱].

محققان در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد ماشین حفار EPB با استفاده از تخمین نرخ پیشروی در پروژه خط ۹ مترو شهر گوانژو پرداختند. آن‌ها در این مطالعه ۲۰۰ داده حفاری از بخشی از تونل مذکور را جمع‌آوری کردند و با استفاده از الگوریتم‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی^۲ (ANFIS)، الگوریتم ژنتیک^۳ (GA) و ادغام دو الگوریتم استنتاج عصبی - فازی با الگوریتم ژنتیک - ANFIS-GA (ترکیب دو الگوریتم) مدل‌هایی به منظور تخمین نرخ پیشروی ماشین حفار EPB توسعه دادند [۱۲].

همچنین در تحقیق دیگر، به بررسی و ارزیابی کارایی ماشین حفار EPB با استفاده از پارامتر نرخ پیشروی^۴ (AR) پرداختند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از پارامترهای ماشین (گشتاور کله حفار، نرخ سرعت چرخش کله حفار، نیروی پیشران، فشار خاک، فشار دوغاب، نرخ چرخش حامل مارپیچی و عمق حفاری) و با تکیه بر روش هوشمند سیستم استنتاج عصبی-فازی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO-ANFIS)، توانستند مدلی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB توسعه دهند [۱۳]. همچنین در تحقیقی دیگر، مختاری و مونی در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی نرخ

³ Genetic algorithm

⁴ Advance Rate (AR)

¹ Artificial Neural Network

² Adaptive neuro fuzzy inference system

۲. ساختار پایگاه داده

ارائه مدل‌های مفید و کارا نیازمند داده‌های واقعی هستند. به‌طور کلی به‌منظور توسعه مدل‌های هوشمند و تجربی، وجود یک پایگاه داده واقعی و جامع لازم و ضروری است، که هر چه این پایگاه داده با دقت بیشتری جمع‌آوری شده باشد، افزایش قابلیت اطمینان روابط توسعه داده‌شده را در پی خواهد داشت. در این پژوهش از چهار پایگاه داده شامل اطلاعات حفاری پروژه حفاری خط یک مترو اصفهان، پروژه حفاری خط دو مترو اصفهان، پروژه حفاری خط یک مترو قم و پروژه حفاری خط یک مترو شیراز به‌منظور توسعه مدل‌های تجربی و هوشمند در این مطالعه استفاده شده است.

مسیر خط یک متروی قم در میان نهشته‌های دشت آبرفتی جانمایی شده است.

خط یک قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و تعداد ۱۴ ایستگاه از مسجد جمکران شروع شده و با طی مسیر میدان انتظار، میدان بقیه ا...، بلوار خلیج فارس، میدان ولیعصر، خیابان شهید دل آذر، میدان پلیس، میدان میرزای قمی، تقاطع خیابان عمار یاسر، عبور از زیر رودخانه، میدان مطهری، میدان سعیدی، میدان معصومیه، خیابان امامزاده ابراهیم و میدان کشاورز، به قلعه کامکار ختم می‌شود. بخشی از این تونل به طول ۱۰۵۰۰ متر به قطر ۹ متر به‌وسیله ماشین حفاری EPB S525 حفاری شده است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بخشی از تونل که به صورت مکانیزه به طول ۴۲۰۰ متر حفاری شده است، می‌باشد. لذا بخشی از پایگاه داده گردآوری شده شامل ۲۷۴۲ مورد (به عبارتی ۲۷۵۱ رینگ حفاری) داده‌های حفاری از پروژه حفاری مترو قم که به‌صورت مکانیزه انجام گرفته است، می‌باشد.

خط دو مترو شیراز دارای طولی حدود ۱۴/۳ کیلومتر و شامل ۱۳ ایستگاه (۱۰ ایستگاه اصلی و ۳ ایستگاه توسعه شمالی) است طول متوسط هر ایستگاه بین ۹۰ تا ۱۳۰ متر است. ایستگاه‌های این خط در عمق متوسط ۱۹ متر از سطح زمین قرار دارند. برای اتصال میان ایستگاه‌ها از دو تونل موازی (تونل شرقی و غربی) به قطر داخلی ۶ متر (قطر تمام‌شده) و فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها حدوداً ۱۸ متر استفاده می‌شود. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، بخشی از دو تونل موازی (حدفاصل ایستگاه قهرمانان - ایستگاه استقلال) در طول مسیر پروژه که به‌وسیله ماشین حفار EPB MSN با قطر ۶/۸۸ متر حفاری شده‌اند، می‌باشد. بخشی از پایگاه داده گردآوری شده شامل دو مجموعه پایگاه داده (یک مجموعه پایگاه داده برای تونل غربی و یک مجموعه پایگاه داده برای تونل شرقی) می‌باشد که ۳۶۴۲ مورد داده حفاری برای تونل غربی (به عبارتی ۳۶۴۲ رینگ حفاری برای تونل غربی) و ۳۱۴۹ مورد داده حفاری برای تونل شرقی (به عبارتی ۳۱۴۹ رینگ حفاری برای

تونل شرقی) از پروژه حفاری خط دو مترو شیراز می‌باشد. در ادامه مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهند که مسیر حفاری مترو اصفهان در رسوبات دشت سیلابی واقع شده است.

این لایه در بخش‌هایی از مسیر خط ۱ قطار شهری اصفهان که در فاصله نزدیک‌تری با رودخانه زاینده‌رود واقع می‌شود دارای ضخامت بیشتری است. از مشخصه‌های این رسوبات نفوذپذیری و آبگذری بالای آن‌ها است، به‌طوری که لایه آبدار منطقه را تشکیل داده است. وجود عدسی‌هایی از ماسه ریزدانه یکنواخت (ماسه‌بادی) در میان رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای یکی از نکات قابل توجه این لایه است. پدیده قابل‌ملاحظه دیگر در رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای شهر اصفهان، میان لایه‌های دارای سیمان‌تاسیون موضعی در برخی بخش‌ها می‌باشد که اصطلاحاً سورد (جوش سنگ) نامیده می‌شود. این رسوبات از به هم چسبیدن دانه‌های شن و ماسه رودخانه‌ای گرد گوشه تشکیل شده و عمدتاً ماده چسباننده آن‌ها کربنات کلسیم است. ضخامت و حدود گسترش این لایه سیمانته شده در رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای شهر اصفهان نامنظم بوده و نمی‌توان عمق و محدوده مشخصی را برای آن ذکر نمود، بطوریکه در برخی قسمت‌ها به‌صورت یک لنز کوچک موضعی و در پاره‌ای مناطق به شکل یک لایه به‌هم‌پیوسته و دارای ابعاد قابل توجه دیده می‌شود.

لذا در این پژوهش منطقه مورد مطالعه در خط یک مترو اصفهان، بخشی از تونل شرقی (حدفاصل بین ایستگاه شهدا تا ایستگاه امام حسین) که به‌صورت مکانیزه به قطر ۶/۹۱ متر به‌وسیله ماشین حفاری EPB S228 حفاری شده است، می‌باشد. بنابراین پایگاه داده گردآوری شده شامل ۷۵۶ مورد (به عبارتی ۷۵۶ رینگ حفاری (حدود ۱/۱ کیلومتر)) داده‌های حفاری تونل شرقی از پروژه حفاری خط یک مترو اصفهان (ایستگاه شهدا - امام حسین) که به‌صورت مکانیزه حفاری آن صورت گرفته است، می‌باشد. همچنین بخش مورد مطالعه دیگر، قسمتی از کل مسیر پروژه خط دو مترو اصفهان می‌باشد که حدفاصل بین ایستگاه دارک تا ایستگاه زینبیه می‌باشد. در طول مسیر مورد مطالعه از تونل‌های موازی (تونل شرقی و غربی) با قطر حفاری ۶/۹۱ متر و طول ۱/۱ کیلومتر استفاده شده است که با استفاده از ماشین حفار EPB S227 و S228 عملیات حفاری انجام گرفته است. لذا با توجه به حفاری انجام شده در طول این مسیر، پایگاه داده گردآوری شده شامل ۷۵۹ مورد (به عبارتی ۷۵۹ رینگ حفاری) داده‌های حفاری تونل شرقی از پروژه حفاری خط دو مترو اصفهان (حدفاصل بین ایستگاه دارک - زینبیه) می‌باشد.

بر اساس پایگاه‌های داده جمع‌آوری شده، پارامترهای ورودی برای توسعه مدل‌ها، سرعت چرخش کله حفار (CR)، گشتاور کله

برای ارزیابی دقت مدل‌های توسعه داده شده به کار گرفته می‌شوند و مابقی داده‌ها یعنی ۱۰ درصد کل داده‌ها (۱۱۱۰ مورد) را در برمی‌گیرند. لازم به ذکر است که داده‌های آزمون فقط برای ارزیابی مدل‌ها به کار برده می‌شوند و هیچ نقشی در ساخت و توسعه مدل‌ها نداشته‌اند. لذا به منظور شناسایی دامنه تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی مدل، تحلیل آماری بر روی پایگاه داده انجام گرفت (شامل حداکثر، میانگین، حداقل و انحراف معیار) که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، میانگین فشار سینه‌کار (EPB_{avg})، سرعت چرخش حامل مارپیچی (SR)، نرخ نفوذ (PR)، نرخ تزریق فوم (FIR)، چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (ϕ) و قطر تونل (D) می‌باشند، درحالی‌که نرخ پیشروی^۱ دستگاه (AR) و میزان مصرف فوم (Q_t) پارامترهای خروجی مدل‌ها می‌باشند. پایگاه داده موردنظر به صورت تصادفی به دو مجموعه داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شده‌اند. مجموعه داده‌های آموزش برای توسعه مدل‌ها به کار گرفته می‌شوند و شامل ۹۰ درصد کل داده‌ها می‌باشند (یعنی ۹۹۳۸ مورد) و مجموعه داده‌های آزمون

جدول (۱). توصیف آماری بر روی پایگاه داده حفاری مورد مطالعه.

پارامتر	نماد	واحد	تعداد	حداکثر	میانگین	حداقل	انحراف معیار
سرعت چرخش کله حفار	CR	rev/min (RPM)	۱۱۰۴۸	۳/۶	۱/۵۴۲	۱	۰/۳۴۷
گشتاور کله حفار	CT	MN.m	۱۱۰۴۸	۷/۴	۲/۲۹۲	۰/۶۴۱	۰/۷۴۲
نیروی جک‌های پیشران	TF	kN	۱۱۰۴۸	۲۸۱۹۰	۱۰۴۴۹/۱۲۱	۱۰۴۵	۲۶۷۲/۹۶۶
سرعت چرخش حامل مارپیچی	SR	rev/min (RPM)	۱۱۰۴۸	۸۲	۸/۳۰۵	۰	۴/۱۵۸
گشتاور حامل مارپیچی	ST	kN.m	۱۱۰۴۸	۹۶	۲۷/۵۶۹	۲/۹	۱۱/۸۷۲
نرخ نفوذ	PR	mm/rev	۱۱۰۴۸	۵۵/۸۸۹	۲۵/۳۳۲	۳/۲۵۷	۷/۸۳۳
نرخ پیشروی	AR	mm/min	۱۱۰۴۸	۷۸	۳۷/۷۵۶	۲	۱۰/۱۰۶
میانگین فشار سینه‌کار	EPB_{avg}	Bar	۱۱۰۴۸	۲/۴۵۷	۰/۹۸۹	۰/۰۳	۰/۳۶۳
نرخ تزریق فوم	FIR	%	۱۱۰۴۸	۹۴۹/۳۶۹	۸۴/۲۲۵	۵	۹۰/۰۱۹
نرخ انبساط فوم	FER	-	۱۱۰۴۸	۳۳/۸۱۸	۷/۰۳۸	۱/۱۳۵	۲/۸۴۸
عامل کف‌ساز مصرفی	Q_t	Lit	۱۱۰۴۸	۵۱۵	۷۹/۰۳۸	۰/۶۹۴	۸۷/۰۸۸

مقدار مصرف شده عامل کف‌ساز (Q_t) با سرعت چرخش کله حفار

۳. توسعه مدل

۳-۱. آنالیز رگرسیون

(CR)، گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، میانگین فشار سینه‌کار (EPB_{avg})، سرعت چرخش حامل مارپیچی (SR)، گشتاور حامل مارپیچی (ST)، نرخ نفوذ (PR)، نرخ تزریق فوم (FIR)، نرخ انبساط فوم (FER)، غلظت فوم (C_F)، چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (ϕ) و قطر تونل (D) مورد بررسی

پیش از توسعه روابط چند متغیره خطی و غیر خطی، لازم است ارتباط بین هر یک از پارامترهای ورودی با پارامترهای خروجی (نرخ پیشروی و میزان مصرف فوم) مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از ۴ فرم متداول رگرسیون ساده یعنی خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی بهره گرفته شد و ارتباط بین نرخ پیشروی (AR) و

^۱ Penetration rate

قرار گرفت. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای نرخ پیشروی و میزان عامل کف‌ساز مصرفی به ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول (۲). ارتباط بین نرخ پیشروی ماشین حفار EPB با پارامترهای اپراتوری و ویژگی‌های خاک.

D (m)	ϕ (Deg)	C (g/cm^2)	PR (mm/rev)	FER	FIR (%)	ST (KN.m)	SR (RPM)	EPBAvg (Bar)	TF (kN)	CT (MN.m)	CR (RPM)	فرم رگرسیون
۰/۷۶۷	۰/۲۷۰	۰/۲۳۶	۰/۱۶۲	۰/۰۰۲	۰/۰۶۲	۰/۵۷۷	۰/۳۳۹	۰/۲۰۸	۰/۴۶۲	۰/۶۱۰	۰/۳۳۸	خطی
۰/۷۶۸	۰/۲۴۷	۰/۱۰۹	۰/۱۲۴	۰/۰۱۵	۰/۱۱۱	۰/۵۵۰	-	۰/۰۹۴	۰/۴۲۲	۰/۶۰۶	۰/۴۱۰	لگاریتمی
۰/۶۳۷	۰/۱۹۵	۰/۱۹۸	۰/۲۴۸	۰/۰۰۶	۰/۱۴۸	۰/۵۰۵	-	۰/۱۹۴	۰/۳۵۶	۰/۵۵۵	۰/۴۸۴	توانی
۰/۶۳۵	۰/۲۲۴	۰/۲۵۱	۰/۳۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۸۷	۰/۵۳۵	۰/۴۰۳	۰/۳۴۴	۰/۳۸۷	۰/۵۴۴	۰/۴۱۳	نمایی

جدول (۳). ارتباط بین مقدار مصرف عامل کف‌ساز (فوم) ماشین حفار EPB با پارامترهای اپراتوری و ویژگی‌های خاک.

D (m)	ϕ (Deg)	C (g/cm^2)	Q _t (Lit)	FER	FIR (%)	ST (KN.m)	SR (RPM)	EPBAvg (Bar)	TF (kN)	CT (MN.m)	CR (RPM)	فرم رگرسیون
۰/۰۴۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۷۷	۰/۱۲۳	۰/۰۵۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	خطی
۰/۰۴۰	۰/۰۱۰	۰/۰۳۱	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۵۷	-	۰/۱۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	لگاریتمی
۰/۰۴۳	۰/۰۰۱	۰/۰۴۲	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۴۳	-	۰/۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	توانی
۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۵۸	۰/۱۲۷	۰/۰۸۶	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	نمایی

که در این رابطه X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل و $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل و Y متغیر وابسته می‌باشند. سپس با وارد کردن داده‌های آموزش به نرم‌افزار SPSS Modeler و انجام تحلیل رگرسیونی چند متغیره می‌توان ضرایب رگرسیون را تعیین کرد.

• توسعه مدل برای تخمین میزان مصرف عامل کف‌ساز (فوم)

به‌منظور توسعه مدل تجربی جهت پیش‌بینی میزان مصرف فوم در این پژوهش با توجه به ضرایب تعیین (R^2) بین پارامترهای ماشین و خاک با میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_t)، پارامترهای سرعت چرخش کله حفار (CR)، گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، نرخ نفوذ (PR)، چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (ϕ) و قطر تونل (D) به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر مصرف فوم در نظر گرفته شدند. بنابراین در این تحلیل میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_t) به‌عنوان پارامتر وابسته و سرعت چرخش کله حفار (CR)، گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، نرخ نفوذ (PR)، چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (ϕ) و قطر تونل (D) به‌عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شدند و در نهایت رابطه چند متغیره خطی زیر برای پیش‌بینی مقدار مصرف عامل کف‌ساز (فوم) توسعه یافت:

۳-۱-۱. آنالیز رگرسیون چند متغیره

رگرسیون چند متغیره روشی برای بررسی اثر متغیرهای متعدد بر روی متغیر پاسخ می‌باشد. از این رو برای بررسی تأثیر هم‌زمان عوامل مختلف بر روی خواص مهندسی خاک و سنگ روشی مناسب به نظر می‌آید. هدف اصلی از این روش برآورد یک رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد. به‌طور کلی تحلیل رگرسیون چند متغیره به دودسته خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. رگرسیون چند متغیره خطی^۱ (MLR) ارتباط خطی بین پارامترهای ورودی و خروجی را بررسی و ارزیابی می‌کند، در حالی که رگرسیون چند متغیره غیرخطی^۲ (MNLR) یک روش برای به دست آوردن رابطه غیرخطی بین پارامترهای مستقل و وابسته می‌باشد. در ادامه با استفاده از این دو تکنیک، دو رابطه تجربی برای پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (فوم) (Q_t) و نرخ پیشروی (AR) توسعه می‌یابد.

۳-۱-۲. آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی

در رگرسیون چند متغیره خطی، ارتباط بین پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل) و پارامتر خروجی (متغیر وابسته) به شکل زیر است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (۱)$$

^۱ Multiple linear regression

^۲ Multiple non-linear regression

مصرف عامل کف‌ساز برخوردار است. همچنین باید ذکر شود که مقدار ضریب معنی‌دار (Sig) مدل توسعه‌یافته برابر با ۰/۰۰۰ است. از آنجایی که این مقدار کمتر از ۰/۰۱ است یعنی این رابطه با سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است و بر اساس داده‌های موجود قادر بیان تغییرات میزان مصرف عامل کف‌ساز یا به عبارتی میزان مصرف فوم می‌باشد.

$$Q_t = 59.512CR + 18.951CT + 0.001TF + 8.416C + 1.405\phi + 55.735D - 1.862PR - 467.244 \quad (2)$$

که در این رابطه Q_t برحسب (Lit)، CR برحسب (Rev/min)، CT برحسب (MN.m)، TF برحسب (kN)، C برحسب (g/cm^2)، ϕ برحسب (Deg)، D برحسب (m) و PR برحسب (mm/rev) می‌باشند. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین برای رابطه ارائه‌شده (رابطه ۲) برابر با ۰/۹۱۳ می‌باشد که نشان می‌دهد این رابطه از دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی میزان

جدول (۴). تحلیل واریانس مدل تجربی توسعه‌یافته (رابطه ۲) به‌منظور پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (نرخ مصرف فوم).

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R^2)	Sig	F
رگرسیون	۶۷۴۱۵۲۵۷/۵۱	۷	۰/۹۵۶	۰/۹۱۳	۰/۰۰	۱۴۹۲۹/۵۳۴
باقیمانده	۶۴۰۵۶۴۹/۲۲۳	۹۹۳۰				
کل	۷۳۸۲۰۹۶۰/۷۳	۹۹۳۷				

برحسب (bar)، C برحسب (g/cm^2)، ϕ برحسب (Deg)، D برحسب (m) و FIR برحسب (%). قابل‌ذکر است که تحلیل واریانس رابطه توسعه‌یافته به‌منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB در جدول ۵ ارائه‌شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین برای رابطه ۳ برابر با ۰/۴۵۱ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی نرخ پیشروی ندارد. همچنین همان‌گونه که در رابطه ۳ مشاهده می‌شود، نیروی پیشران و نرخ تزریق فوم با نرخ پیشروی رابطه عکس و فشار سینه‌کار، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک با نرخ پیشروی رابطه مستقیم دارند، این در حالی است که در واقعیت نیروی پیشران و نرخ تزریق فوم با نرخ پیشروی رابطه مستقیم و فشار سینه‌کار، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک خاک با نرخ پیشروی رابطه عکس دارند. ارتباط ناصحیح بین پارامترهای ورودی مدل به دلیل مشکل هم‌خطی چندگانه می‌باشد که این مشکل زمانی به وجود می‌آید که بین پارامترهای ورودی در یک مدل همبستگی زیادی باشد. بنابراین رابطه توسعه‌یافته با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی از نظر آماری و منطقی صحیح نمی‌باشد و به‌عبارتی دیگر آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی نمی‌تواند به‌درستی ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی را نشان دهد. همچنین این مشکل (هم‌خطی چندگانه) باعث می‌شود تا دقت پیش‌بینی به دلیل ارتباط نامناسب بین پارامترهای ورودی و خروجی کاهش ($R^2=0/452$) یابد. سایر تحلیل‌های آماری انجام بر روی رابطه توسعه‌یافته در جدول ۵ ارائه‌شده است.

• توسعه مدل برای تخمین نرخ پیشروی

به‌منظور توسعه مدل تجربی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی در این پژوهش، با توجه به ضرایب تعیین (R^2) بین پارامترهای ماشین و خاک با نرخ پیشروی (AR) ماشین حفار EPB، پارامترهای ورودی در نظر گرفته‌شده برای توسعه‌ها، شامل سرعت چرخش کله حفار (CR)، گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، میانگین فشار سینه‌کار (EPB_{avg})، سرعت چرخش حامل مارپیچی (SR)، چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (ϕ)، نرخ تزریق فوم (FIR) و قطر تونل (D) می‌باشند. بنابراین با استفاده از این پارامترها و تکیه بر آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی رابطه‌ای به‌منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB توسعه یافت که فرم نهایی رابطه توسعه‌یافته به‌صورت زیر می‌باشد:

$$AR = 8.485CR + 1.324CT - 0.002TF + 8.266EPB + 1.144SR + 2.266C + 0.108\phi + 6.895D - 0.009FIR - 30.558 \quad (3)$$

که در این رابطه AR برحسب (mm/min)، CR برحسب (Rev/min)، CT برحسب (MN.m)، TF برحسب (kN)، EPB

جدول (۵). تحلیل واریانس مدل تجربی توسعه یافته (رابطه ۳) به منظور پیش بینی نرخ پیشروی.

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R ²)	Sig	F
رگرسیون	۴۴۹۱۱۹/۴۳۸	۹	۰/۶۷۱	۰/۴۵۱	۰/۰۰۰	۹۰۴/۹۴۴
باقیمانده	۵۴۷۴۶۹/۰۹۰	۹۹۲۸				
کل	۹۹۶۵۸۸/۵۲۸	۹۹۳۷				

۳-۱-۳. تحلیل رگرسیون چند متغیره غیر خطی

- توسعه مدل برای تخمین میزان مصرف عامل کف-ساز (فوم)

بر اساس تحلیل های رگرسیون ساده (جدول ۵)، بهترین ارتباط مقدار مصرف شده عامل کف ساز (Q_t) با سرعت چرخش کله حفار (CR) به صورت توانی، با گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF) و زاویه اصطکاک خاک (φ) به صورت خطی، با نرخ نفوذ (PR) و چسبندگی خاک (C) به صورت نمایی و با قطر تونل (D) به صورت لگاریتمی می باشد. لذا مدل غیرخطی توسعه یافته برای پیش بینی Q_t به شکل زیر در نظر گرفته شد:

$$Q_t = a_1 CR^{a_2} + a_3 CT + a_4 TF + a_5 e^{a_6 PR} + a_7 e^{a_8 C} + a_9 \varphi + a_{10} \text{Log}(D) \quad (4)$$

که در این رابطه $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}$ ضرایب رگرسیون می باشند. سپس با وارد کردن داده های آموزش به نرم افزار SPSS Modeler و انجام تحلیل رگرسیون چند متغیره غیرخطی ضرایب رگرسیون تعیین و رابطه ای به شکل زیر ارائه شد:

$$Q_t = 3.128CR^{3.458} + 19.259CT + 0.001TF - 183979.610e^{1.128 \times 10^{-5} PR} + 183054.688e^{2.854 \times 10^{-5} C} + 1.462\varphi + 1094.991 \text{Log}(D) \quad (5)$$

که در این رابطه Q_t برحسب (Lit)، CR برحسب (Rev/min)، CT برحسب (MN.m)، TF برحسب (kN)، C برحسب (g/cm²)، φ برحسب (Deg)، D برحسب (m) و PR برحسب (mm/rev) می باشند. همچنین مقدار ضریب تعیین برای رابطه غیرخطی توسعه یافته برابر با ۰/۹۱۵ می باشد که دقت پیش بینی این رابطه نزدیک به دقت رابطه خطی (رابطه ۲) که در قسمت قبلی ارائه شد، می باشد. لذا مقایسه مقادیر ضریب تعیین دو رابطه خطی (رابطه ۲) و رابطه غیرخطی (رابطه ۵) نشان می دهند که این دو رابطه قادر به ارزیابی میزان مصرف فوم یا به عبارتی میزان مصرف عامل کف ساز با دقت قابل قبولی می باشند. همچنین به منظور بررسی و ارزیابی دقیق تر رابطه غیرخطی توسعه یافته از نظر منطق آماری، نتایج تحلیل آماری این رابطه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول (۶). تحلیل واریانس مدل تجربی توسعه یافته (رابطه ۵) به منظور پیش بینی میزان مصرف عامل کف ساز (فوم مصرفی).

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R ²)	میانگین مربعات
رگرسیون	۱۲۷۱۰۹۸۶۵/۷	۱۱	۰/۹۵۶	۰/۹۱۵	۱۱۵۵۵۴۴۲/۳۴
باقیمانده	۶۲۳۸۶۴۸/۵۸۲	۹۹۲۷			۶۲۸/۴۵۳
کل اصلاح نشده	۱۳۳۳۴۸۵۱۴/۳	۹۹۳۸			
کل اصلاح شده	۷۳۸۲۰۹۰۶/۷۳	۹۹۳۷			

- توسعه مدل برای تخمین نرخ پیشروی

به منظور توسعه مدل غیرخطی برای پیش بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB، ارتباط بین پارامترهای ماشین و پارامترهای خاک با نرخ پیشروی مورد بررسی قرار گرفتند. به همین منظور بر اساس تحلیل های رگرسیون ساده (جدول ۳)، بهترین ارتباط نرخ

پیشروی (AR) با سرعت چرخش کله حفار (CR) به صورت خطی، با گشتاور کله حفار (CT)، فشار سینه کار (EPB) و چسبندگی خاک (C) به صورت توانی، با نیروی پیشران (TF) و زاویه اصطکاک خاک (φ) به صورت لگاریتمی و با قطر تونل (D) و نرخ تزریق فوم (FIR) به صورت نمایی می باشد. سپس در نهایت فرم نهایی رابطه

$$AR = 10.016CR - 1955.903CT^{-0.001} - 35.267Log(TF) + 15.698EPB^{0.371} + 2050.337e^{0.005R} + 21.748e^{-0.018FIR} - 0.038C^{-2.039} + 26.069Log(\varphi) + 2.041 \times 10^{-21}e^{5.539D} \quad (۷)$$

که در این رابطه AR برحسب (mm/min)، CR برحسب (rev/min)، CT برحسب (MN.m)، TF برحسب (kN)، EPB برحسب (bar)، C برحسب (g/cm^2)، φ برحسب (Deg)، D برحسب (m) و FIR برحسب (%) می‌باشند. همچنین مقدار ضریب تعیین برای رابطه غیرخطی توسعه‌یافته برابر با ۰/۴۸۰ می‌باشد، که نشان می‌دهد این رابطه دارای دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB نمی‌باشد. همچنین سایر تحلیل‌های آماری انجام‌گرفته بر روی رابطه غیرخطی توسعه‌یافته (رابطه ۷)، در جدول ۷ ارائه‌شده است.

جدول (۷). تحلیل واریانس مدل تجربی توسعه‌یافته به منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی (رابطه ۷).

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R^2)	میانگین مربعات
رگرسیون	۱۴۶۹۱۸۴۴/۶۲	۱۵			۹۷۹۴۵۶/۳۰۸
باقیمانده	۵۱۷۹۷۶/۴۰۲	۹۹۲۳	۰/۶۹۳	۰/۴۸۰	۵۲/۲۰۰
کل اصلاح‌نشده	۱۵۲۰۹۸۲۱/۰۲	۹۹۲۸			
کل اصلاح‌شده	۹۹۶۵۸۸/۵۲۸	۹۹۳۷			

ورودی به یک فضای چندبعدی نگاهت می‌شوند [۱۶]. سپس یک ابر صفحه ساخته می‌شود که بردارهای ورودی را با بیشترین فاصله ممکن از هم جدا می‌کند که نحوه عملکرد آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به نمونه‌های مرزی بردار پشتیبان گفته می‌شود و برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری (مرز بهینه) دو کلاس کاملاً جدا از هم از روش حاشیه بهینه استفاده می‌شود. حاشیه بهینه به نحوه محاسبه می‌گردد که تمام نمونه‌های کلاس یک‌دریک طرف مرز و تمام نمونه‌های کلاس صفر در طرف دیگر واقع شوند و مرز بهینه به‌گونه‌ای می‌باشد که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی هر دو کلاس از هم در راستای عمود بر مرز تصمیم‌گیری تا جایی که ممکن است حداکثر شوند. همچنین اگر بخواهیم مرز بهینه را به‌طور موازی توسط دو خط از دو طرف گسترش دهیم تا از بین نزدیک‌ترین نمونه‌های دو کلاس بگذرد، حاشیه بهینه به وجود می‌آید که در این حاشیه بیشترین

غیرخطی توسعه‌یافته به منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی به صورت زیر می‌باشد:

$$AR = a_1CR + a_2CT^{a_3} + a_4Log(TF) + a_5EPB^{a_6} + a_7e^{a_8SR} + a_9e^{a_{10}FIR} + a_{11}C^{a_{12}} + a_{13}Log(\varphi) + a_{14}e^{a_{15}D} \quad (۶)$$

که در این رابطه $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots, a_{15}$ ضرایب رگرسیون می‌باشند. سپس همانند قسمت قبلی با وارد کردن داده‌های آموزش به نرم‌افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیون چند متغیره غیرخطی ضرایب رگرسیون تعیین و رابطه‌ای به فرم زیر توسعه داده شد:

۲-۲- ماشین بردار پشتیبان

اساس روش ماشین بردار پشتیبان^۱ (SVM) توسط کورتز و وپنیک^۲ در سال ۱۹۹۵ ارائه‌شده است [۱۵]. ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد است که از اصل استقرایی کمینه‌سازی خطای ساختاری بهره می‌جوید و در نهایت به یک جواب بهینه کلی منجر می‌شود. الگوریتم SVM یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد و همچنین جز روش‌های آموزشی با ناظر طبقه‌بندی شده است که بین داده‌های ورودی و مقدار متغیر وابسته بر اساس کمینه‌سازی ریسک ساختاری ارتباط برقرار می‌کند [۱۶، ۱۷]. این الگوریتم برخلاف الگوریتم‌های شبکه عصبی که سعی می‌کنند به تعریف پیچیدگی‌های توابع از فضای ورودی بپردازد، داده‌های غیرخطی را به فضایی با ابعاد بیشتر می‌برد و از توابع غیرخطی در فضای جدید استفاده می‌کند. به‌طور کلی عملکرد این الگوریتم در مسائل رگرسیونی به‌گونه‌ای می‌باشد که بردارهای

^۱ Cortes and Capnik

^۱ Support vector machine

شامل تبدیل معادلات غیرخطی به خطی می‌شوند. این روش یک راه‌حل منحصر به فرد برای حل مسائل بهینه‌سازی با توجه به ماهیت همگرایی آن می‌باشد. به‌طور کلی ماشین بردار پشتیبان به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود که شامل رگرسیون بردار پشتیبان^۱ (SVR)، طبقه‌بندی بردار پشتیبان^۲ (SVC)، حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان^۳ (LS-SVM) و برنامه‌ریزی خطی ماشین بردار پشتیبان^۴ (LP-SVM) و Nu ماشین بردار پشتیبان^۵ (Nu-SVM) می‌باشد. در این تحقیق به منظور توسعه مدل پیش‌بینی کننده برای تخمین نرخ پیشروی (AR) و میزان مصرف فوم (Q_i) ماشین حفار EPB از روش حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) در بسته نرم‌افزار MATLAB 2010 استفاده شده است. حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان یک مدل SVM اصلاح‌شده است که توسط سوپکس و همکارانش در سال ۲۰۰۲ ارائه شده است که قابل اجرا برای مسائل رگرسیونی و طبقه‌بندی می‌باشد. لازم به ذکر است به‌منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده به‌طور کلی یک مجموعه کد توسعه داده شده است.

۳-۲-۱. توسعه مدل حداقل مربعات بردار پشتیبان

در این بخش تئوری روش حداقل مربعات بردار پشتیبان و نحوه توسعه مدل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم LS-SVM به جای حل مسائل برنامه‌نویسی درجه دوم^۶ از معادلات خطی KKT^۷ استفاده می‌کند. LS-SVM به‌طور کلی از یک تابع تلفات درجه دوم بدون هیچ قانونی استفاده می‌کند که منجر به پیش‌بینی ضعیف می‌گردد، لذا برای حل این مشکل LS-SVM وزن‌دار در نظر گرفته شد و در مواردی که وزن‌های کوچک به داده‌ها اختصاص داده شود، از روش آموزش دومرحله‌ای استفاده می‌شود. همچنین این الگوریتم در مسائل رگرسیونی به دلیل وجود معادلات خطی دقت محاسباتی بیشتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان کلاسیک دارد. در ادامه تئوری عملکرد الگوریتم حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان شرح داده می‌شود. یک مجموعه آموزشی از N داده $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ در نظر گرفته می‌شود که $x_i \in R^d$ داده ورودی و $y_i \in R^d$ داده خروجی است. روابط رگرسیونی در الگوریتم LS-SVM به‌صورت زیر می‌باشند [۱۸]:

$$y(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (10)$$

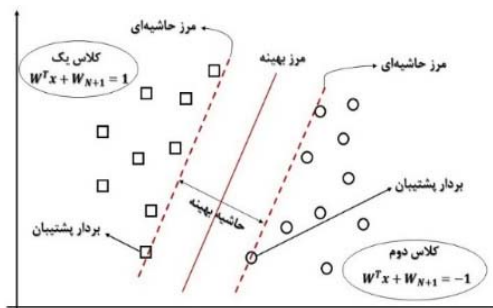
W و b به ترتیب مقادیر وزن‌ها و بایاس تابع رگرسیونی و

فاصله بین نمونه‌های دو کلاس دارد. آن دو خط موازی که مرز حاشیه بهینه را تشکیل می‌دهند، مرز حاشیه‌ای گفته می‌شوند. لذا برای نمونه‌هایی که بیرون از این مرزهای حاشیه‌ای قرار می‌گیرند روابط زیر برقرار می‌باشند:

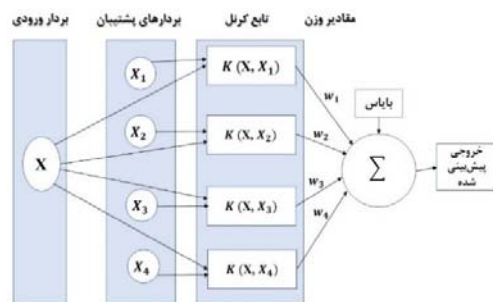
$$W^T x + W_{N+1} = 1 \quad (8)$$

$$W^T x + W_{N+1} = -1 \quad (9)$$

که در این روابط X یک نقطه روی مرز بهینه یا مرز تصمیم‌گیری و W یک بردار n بعدی عمود بر مرز تصمیم‌گیری می‌باشند. همچنین برای حل مشکل عملیات در فضایی با ابعاد زیاد از یک تابع کرنل استفاده می‌شود. در این صورت عملیات می‌تواند با همان سرعت در فضای داده‌های ورودی انجام گیرد. همچنین لازم به ذکر است که تابع کرنل مشکل چندبعدی و غیرخطی بودن نگاشت مذکور را برطرف می‌کند. شکل ۲ تصویری شماتیک از ساختار عملکرد ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد.



شکل (۱). نحوه عملکرد ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی پارامترها.



شکل (۲). روند عملکرد ماشین بردار پشتیبان (SVM).

به‌طور کلی این روش نسبت به روش‌های دیگر محاسباتی نرم‌چندین مزیت دارند:

به‌کارگیری مجموعه‌ای از معادلات کرنل با فضای بزرگ ابعادی که

^۵ Nu- support vector machine

^۶ Quadratic programming problem

^۷ Karush-Kuhn-Tucker equations

^۱ Support vector regression

^۲ Support vector classification

^۳ Least square- support vector machine

^۴ Linear programming- support vector machine

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (14)$$

در این رابطه $K(x, x_i)$ تابع کرنل نامیده می‌شود. انواع مختلفی از توابع کرنل وجود دارد که عبارتند از کرنل خطی، چندجمله‌ای، تابع پایه شعاعی (RBF) و سیگموئید که در این تحقیق از کرنل تابع پایه شعاعی به‌منظور توسعه مدل برای پیش-بینی نرخ پیشروی و میزان مصرف عامل کف‌ساز استفاده شده است. فرم نهایی کرنل تابع پایه شعاعی به‌صورت رابطه زیر می‌باشد [۱۹]:

$$K(x, x_i) = \exp(-x_i - x_j^2 / \sigma^2) \quad (15)$$

در این رابطه σ پارامتر تابع کرنل می‌باشد. به‌طور کلی در مدل‌سازی با استفاده از حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان دو پارامتر σ و γ اهمیت بسیار زیادی دارد که این دو پارامتر با آزمون و خطا و تکرار تعیین می‌گردند. لذا مقدار بهینه برای این دو پارامتر به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقدار اندازه-گیری شده نرخ پیشروی و میزان مصرف فوم ماشین حفار EPB دارای بیشترین همبستگی و کمترین مقدار خطا باشند. سپس در ادامه مجموعه داده‌های آموزش وارد مدل LS-SVM توسعه‌یافته، شدند و پس از آزمون و خطا مقدار بهینه برای دو پارامتر σ و γ تعیین شد که مقادیر این دو پارامتر برای هر دو مدل توسعه‌یافته به‌منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی و میزان مصرف فوم در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول (۸). مقادیر بهینه پارامترهای σ و γ مدل‌های توسعه‌یافته حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان به‌منظور ارزیابی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی.

مدل	σ	γ
LS-SVM Qt	۲/۴۷۰۶۲۳	۷۱۲۵/۳۰۹۳۸۴
LS-SVM AR	۱/۹۶۲۱	۳۰۵۵۰/۶۲۱۹۳۲

همچنین به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌های به‌کاربرده شده در پیش-بینی نرخ پیشروی، ارتباط بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده نرخ پیشروی برای آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی، آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی (MNL) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ قابل مشاهده می‌باشند.

همچنین به‌منظور ارزیابی بهتر و دقیق‌تر عملکرد رابطه‌های توسعه داده‌شده، مقادیر آماری جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده^۱ (NRMSE) و واریانس خطا^۲ (VAF) برای تمامی مدل‌ها محاسبه شدند. این مقادیر با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد [۲۰]:

$\varphi(x)$ ترسیم غیرخطی ورودی‌ها در فضای ویژگی با ابعاد بالا می‌باشند. زمانی که LS-SVM برای تخمین تابع استفاده می‌شود، مسئله بهینه‌سازی به‌وسیله حداقل کردن تابع معین، به‌صورت زیر فرموله می‌شود [۱۸]:

$$\min R(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (11)$$

در این رابطه γ پارامتر تنظیم‌کننده خطا و e میزان خطا را نشان می‌دهد. لذا بر اساس محدودیت زیر (رابطه ۱۲)، به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی از توابع لاگرانژی استفاده شده است [۱۸]:

$$y(x) = \frac{1}{2} w^T \varphi(x_i) + b + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$L(w, b, e, \alpha) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{w^T \varphi(x) + b + e_i - y_i\} \quad (13)$$

در این روابط α_i ضریب لاگرانژی می‌باشد. سپس با استفاده از مشتق جزئی w ، b ، α_i و e_i می‌توان رابطه ۱۳ را حل نمود. در نهایت با حل رابطه ۱۳ و با استفاده از شرایط KKT مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان به‌منظور تخمین هدف به‌صورت زیر می‌باشد:

۴- ارزیابی مدل‌های توسعه‌یافته

در این بخش کارایی روابط و مدل‌های توسعه داده‌شده با الگوریتم‌های مختلف موردبررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. مشخص کردن ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، شاخصی مناسب برای کنترل کردن کارایی هر مدل پیش‌بینی کننده است. شکل‌های ۳ تا ۵ ارتباط بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_i) را همراه با ضریب تعیین به ترتیب برای آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی (MLR)، آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی (MNL) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) نشان می‌دهند.

فرآیند حفاری)، A_{avg} میانگین مقادیر پارامتر خروجی و n تعداد داده‌های آزمون می‌باشند که در این مطالعه برابر با ۱۱۱۰ نمونه است. از نظر تئوری هرچه مقدار NRMSE نزدیک به صفر و مقدار VAF به ۱۰۰ نزدیک باشد، مدل توسعه‌یافته ایده آل تر است. مقادیر محاسبه‌شده NRMSE و VAF به همراه ضریب تعیین (R^2) برای شش مدل پیش‌بینی کننده میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_t) و نرخ پیشروی (AR) به ترتیب در جدول ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}}{A_{avg}} \quad (16)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{var(A_i - P_i)}{var(A_i)} \right] \times 100 \quad (17)$$

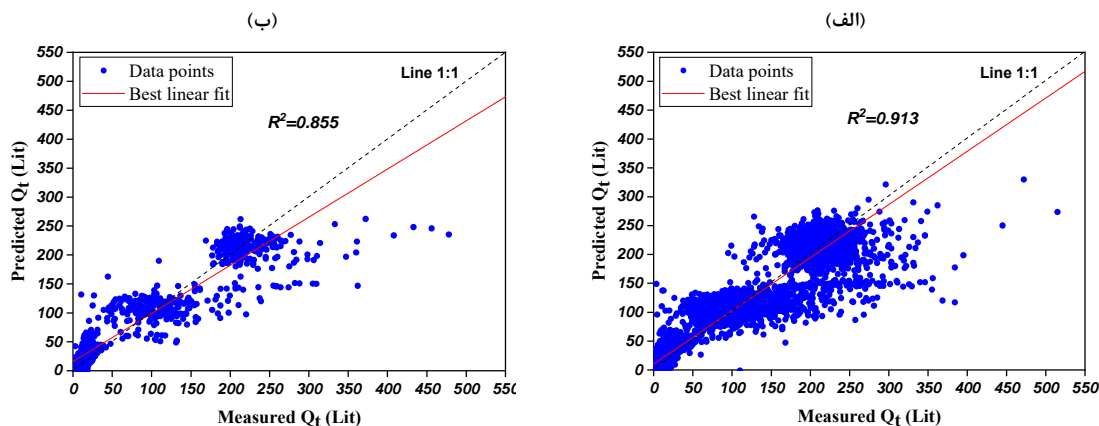
که در این روابط P_i و A_i به ترتیب برابر با مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پارامتر خروجی (میزان مصرف عامل کف‌ساز (میزان مصرف فوم) و نرخ پیشروی ماشین حفار EPB در طی

جدول (۹). مقایسه شاخص‌های آماری مدل‌های توسعه‌یافته به منظور پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (میزان مصرف فوم).

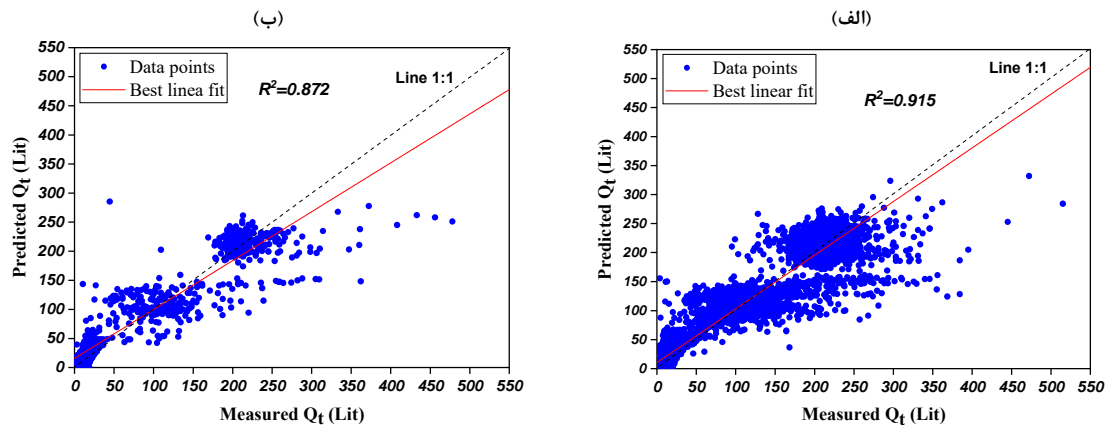
Model	R^2	NRMSE	VAF
آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی (MLR)	۰/۸۵۵	۰/۳۵۸	۸۷/۱۳۵
آنالیز رگرسیون چند متغیره غیر خطی (MNLR)	۰/۸۷۲	۰/۳۵۷	۸۷/۱۳۲
حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM)	۰/۹۴۵	۹۴/۳۵۶	۰/۲۳۷

جدول (۱۰). مقایسه شاخص‌های آماری مدل‌های توسعه‌یافته به منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی.

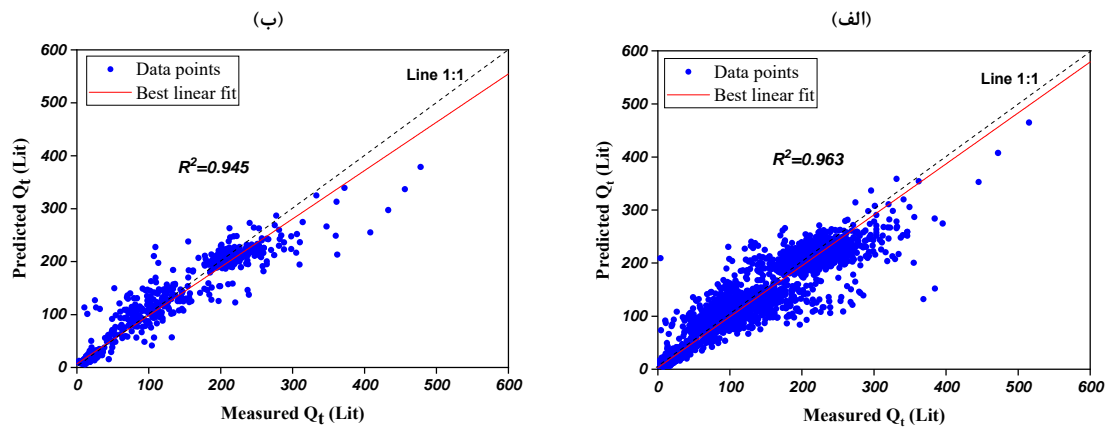
Model	R^2	NRMSE	VAF
آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی (MLR)	۰/۵۶۱	۰/۳۰۶	۵۱/۵۳۶
آنالیز رگرسیون چند متغیره غیر خطی (MNLR)	۰/۳۹۴	۰/۳۲۷	۲۹/۲۰۸
حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM)	۰/۷۴۱	۷۴/۰۷۱	۰/۱۴۹



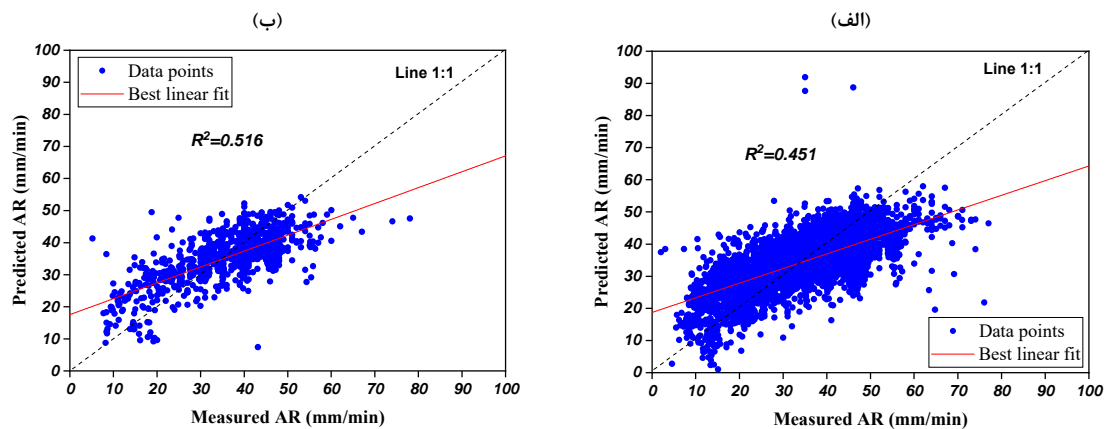
شکل (۳). مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده میزان مصرف عامل کف‌ساز بر اساس آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی (الف): مجموعه داده آموزش، ب: مجموعه داده آزمون

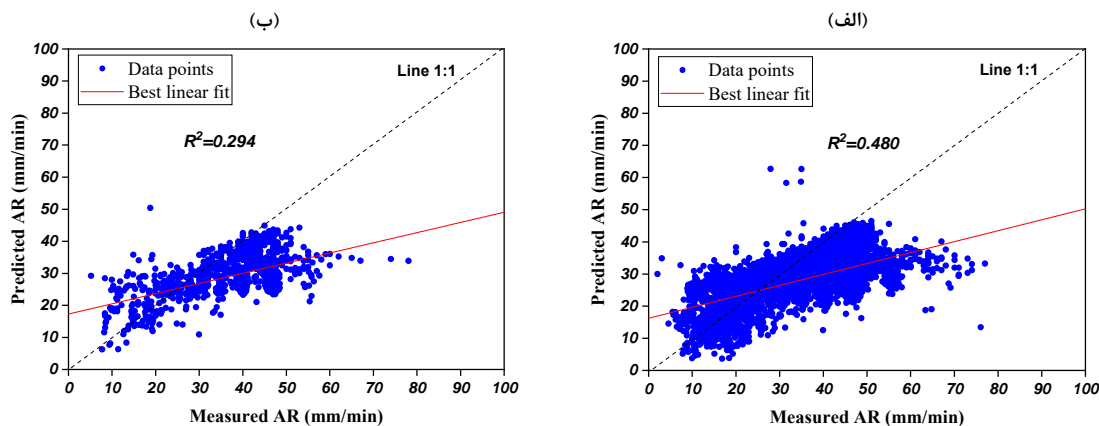


شکل (۴). مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده میزان مصرف عامل کف‌ساز بر اساس آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی (الف): مجموعه داده آموزش، ب: مجموعه داده آزمون)



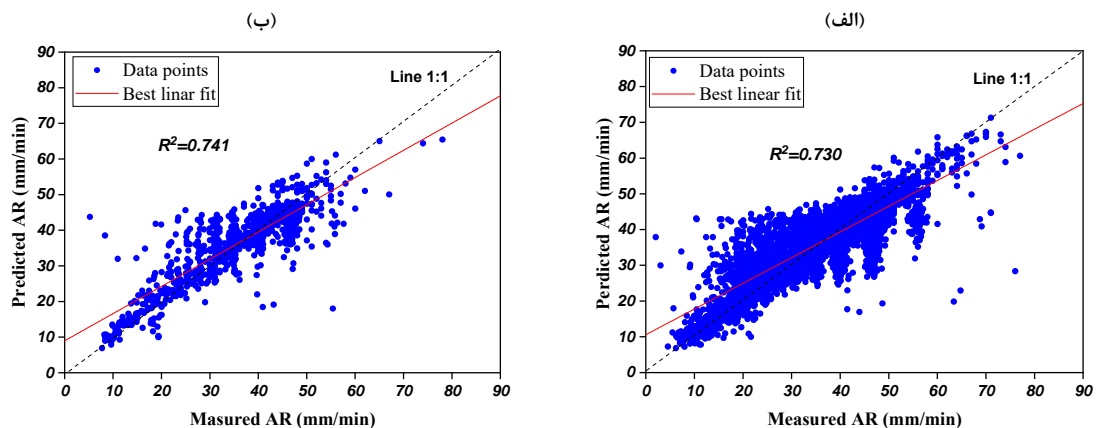
شکل (۵). مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده میزان مصرف عامل کف‌ساز بر اساس الگوریتم حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) (الف: مجموعه داده آموزش، ب: مجموعه داده آزمون)





شکل (۷). مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده نرخ پیشروی بر اساس آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی

(الف: مجموعه داده آموزش، ب: مجموعه داده آزمون)



شکل (۸). مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی شده نرخ پیشروی بر اساس الگوریتم حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان

(الف: مجموعه داده آموزش، ب: مجموعه داده آزمون) (LS-SVM)

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از پارامترهای ماشین حفار EPB (شامل سرعت چرخش کله حفار (CR)، گشتاور کله حفار (CT)، نیروی پیشران (TF)، میانگین فشار سینه‌کار (EPB_{avg}), سرعت چرخش حامل مارپیچی (SR)، نرخ نفوذ (PR)، نرخ تزریق فوم (FIR)، پارامترهای خاک (چسبندگی خاک (C)، زاویه اصطکاک خاک (φ)) و قطر تونل مدل‌هایی توسعه داده شدند. مدل‌ها با تکیه بر تکنیک‌های آماری شامل آنالیز رگرسیون (رگرسیون ساده، چند متغیره خطی (MLR) و غیرخطی (MNL)) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) توسعه داده شدند. لازم به ذکر است پایگاه داده مورد استفاده در این پژوهش به صورت تصادفی به دو مجموعه داده‌های آموزش و مجموعه داده‌های آزمون تقسیم‌بندی شدند که مجموعه داده‌های آموزش (شامل ۹۰ درصد کل داده‌ها) برای ساخت و توسعه مدل‌ها به کار برده شدند و مجموعه داده‌های آزمون

ماشین‌های حفر تونل (TBM) به طور گسترده در پروژه‌های عمرانی و حفر تونل‌های شهری استفاده می‌شوند. این ماشین‌ها بر اساس نوع سیستم نگهداری سینه‌کار، سامانه‌های حمل مواد حفر-شده و حالت‌های کاری به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از پر استفاده‌ترین TBM‌ها در زمین‌های نرم، TBM‌های نوع تعادل فشار زمین (EPB) می‌باشد. به دلیل افزایش قیمت و هزینه‌های بالای حفاری، ارزیابی عملکرد این ماشین‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این مطالعه به منظور ارزیابی عملکرد ماشین حفار EPB، پارامترهای میزان مصرف فوم (Q_f) و نرخ پیشروی (AR) مورد بررسی قرار گرفتند. لذا در این پژوهش به منظور پیش-بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (Q_f) و نرخ پیشروی (AR)، با

(In persian).

[7] D. Peila, C. Oggeri, and R. Vinai, "Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12), 1622-1625, 2007.

[8] H. Copur, E. Avunduk, D. Tumac, C. Balci, N. Bilgin, A.S. Mamaghani, S. Tolouci, G. Erkuş, S. Acun, and U. Ates, "Effect of Soil Conditioning on Performance of an EPB TBM: from Laboratory to MahmutbeyMecidiyekoy Metro Tunnels in Istanbul", *ITA-AITES- WORLD TUNNEL CONGRESS*, 2018.

[9] E. Avunduk, and H. Copur, "Effect of Clogging on EPB TBM Performance: A Case Study in Akfirat Waste Water Tunnel, Turkey", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(6), 4789-4801, 2019.

[10] M.A. Grima, P.A. Bruines, and P.N.W. Verhoef, "Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods" *Tunnelling and underground space technology*, 15(3), 259-269, 2000.

[11] A.G. Benardos, and D.C. Kaliampakos, "Modelling TBM performance with artificial neural networks," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(6), 597-605, 2004.

[12] K. Elbaz, S.L. Shen, A. Zhou, D.J. Yuan, and Y.S. Xu, "Optimization of EPB shield performance with adaptive neuro-fuzzy inference system and genetic algorithm", *Applied Sciences*, 9(4), 780, 2019.

[13] K. Elbaz, S.L. Shen, W.J. Sun, Z. Yin, and A. Zhou, "Prediction model of shield performance during tunneling with AI via incorporating improved PSO into ANFIS", *IEEE Access*, 2020.

[14] S. Mokhtari, and M.A. Mooney, "Predicting EPBM advance rate performance using support vector regression modeling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 104, 103520, 2020.

[15] C. Cortes, and V. Vapnik, "Support-vector networks. *Machine learning*", 20(3), 273-297, 1995.

[16] N. Cristianini, and J. Shawe-Taylor, "An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods", Cambridge university press, 2000.

[17] S. Aboutaleb, M. Behnia, R. Bagherpour, and B. Bluekian, "Using non-destructive tests for estimating uniaxial compressive strength and static Young's modulus of carbonate rocks via some modeling techniques", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1717-1728, 2018.

[18] J.A. Suykens, T. Van Gestel, and J. De Brabanter, "Least squares support vector machines," World scientific, 2002.

[19] A. Seifi, "Developing of expert system to prediction of dailyevapotranspiration by support vector machine and compare results to ANN, ANFIS and experimental method", *M.Sc. Thesis, Department of WaterEngineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran*, 2020.

[20] M. Yurdakul, and H. Akdas, "Modeling uniaxial compressive strength of building stones using non-destructive test results as neural networks input parameters", *Construction and Building Materials*, 47, 1010-1019, 2013.

[32] Prentice Hall Publisher. 2004.

[33] "Comprehensive plan of Kerman city," Kerman Municipality Transportation and Traffic Organization, 2012 (In Persian).

(شامل ۱۰ درصد کل داده‌ها) فقط برای ارزیابی دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. لذا با تکیه بر این تکنیک‌ها و الگوریتم‌ها و با استفاده از مجموعه داده‌های آموزش، شش مدل برای پیش-بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (فوم مصرفی) و شش مدل برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ماشین حفار EPB توسعه یافتند. سپس به منظور انتخاب بهترین مدل ارائه شده جهت پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز و نرخ پیشروی شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و واریانس خطا (VAF) برای هر الگوریتم با استفاده از مجموعه داده‌های آزمون محاسبه شدند. مقایسه بین مقادیر محاسبه شده شاخص‌های آماری مدل‌های توسعه یافته بر اساس الگوریتم‌های ذکر شده به منظور پیش‌بینی میزان مصرف عامل کف‌ساز (فوم مصرفی) نشان دادند که مدل ارائه شده بر اساس الگوریتم LS-SVM دارای بیشترین دقت و کمترین مقدار خطا می‌باشد که مقادیر R^2 ، VAF و NRMSE برای این مدل به ترتیب برابر با ۰/۹۴۵، ۰/۳۵۶ و ۰/۲۳۷ می‌باشند. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی نرخ پیشروی و همچنین مقایسه مقادیر محاسبه شده شاخص‌های آماری (R^2 ، VAF و NRMSE) برای هر سه مدل توسعه یافته به منظور پیش‌بینی نرخ پیشروی نشان می‌دهند که مدل ارائه شده بر اساس الگوریتم LS-SVM پیش-بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. مقادیر محاسبه شاخص-های آماری R^2 ، VAF و NRMSE برای مدل توسعه یافته بر اساس الگوریتم LS-SVM به ترتیب برابر با ۰/۷۴۱، ۰/۷۴۱ و ۰/۱۴۹ می‌باشند که این مقادیر نشان می‌دهند مدل ارائه شده دقت نسبتاً بالایی در بین سایر مدل‌ها از خود نشان داده است.

منابع

[1] B. Maidl, M. Herrenknecht, L. Anheuser, "Mechanized Shield Tunneling", Ernst and Sohn, ISBN: 3- 433-01292-X, 427 p, 1996.

[2] JSCE, Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specification for Tunnelling Shield Tunnels", ISBN: 978-4-8106-0568-6, 270 p, 2006.

[3] H. Copur, 2012. "Mechanical Excavation and Mechanization in Soft Ground" Graduate Class Notes. Istanbul Technical University, Mining Engineering Department, 2012.

[4] S. Psomas, "Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications", 2001.

[5] D. Peila, A. Picchio, and A. Chieregato, "Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 55-66, 2013.

[6] M. Khosravi, K. Shahriar, M. Manjezi and M. Khosrotash, "Investigation of the relationship between bitumen injection of soil processing agent and penetration rate in TBM-EPB of Tehran Metro Line 7", the first Asian conferences and the 9th National Tunnel Conference, 2012,