Civil Infrastructure Researches, Vol. 6, Issue.1, Spring and Summer 2020, pp. 1-16

M. Hamidinia

Civil Engineering Faculty, Yazd University.

e-mail: hamidiniamoham-mad@gmail.com

M.M. Khabiri*

Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Yazd University.

e-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

M. Mokhberi

Assistant Professor, Civil Engineering Faculty, Esteban University.

e-mail: mehdimokhberi@gmail.com

Identification and Presentation of Asphalt Pavement Construction Quality Control Algorithm by Data Classification Method and Artificial Neural Network

Asphalt construction *is one of the most important parameters of asphalt pavement quality that should always be carefully considered in any asphalt pavement project. The purpose of this study was to evaluate the performance of decision tree algorithm and artificial neural network in predicting mixture and field design parameters affecting pavement compaction in order to identify and control these parameters to control the compaction parameter value. In this study, we used data collected from relative asphalt compaction determination report, grain curve report and results of hot asphalt experiments and asphalt mix design report recovered from soil mechanics laboratory and using decision tree and artificial neural network algorithm have been proposed to predict the parameters affecting compaction. The results show that data with a distribution temperature between 126 and 155°C, fracture rates in two sides greater than 95.5%, strength (Marshall Resistance) less than 1417.5 kg-force and Asphalt Void less than 5.45 had good compaction rate (more than 97%). Also, three parameters of thickness, distribution temperature, and void were introduced as influence variables affecting compaction in the software.*

Keywords: Asphalt pavement, Density, Data Mining, Decision Tree, Artificial Neural Network.

* Corresponding author

Received 27 October 2019, Revised 06 December 2019, Accepted 12 January 2020.
DOI: 10.22091/cer. 2020.4923.1181

شناسایی و ارائه الگوریتم کنترل کیفیت اجرای روسازی آسفالتی به روش طبقه‌بندی داده‌ها و شبکه عصبی مصنوعی

محمد حمیدی‌نیا
پردیس فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.
پست الکترونیک:
hamidiniamohammad@gmail.com

محمدمهدی خبیری*
پردیس فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.
پست الکترونیک:
mkhabiri@yazd.ac.ir

مهدی مخبری
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه استهبان.
پست الکترونیک:
mehdimokhberi@gmail.com

اجرای آسفالت یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت روسازی آسفالت بوده که همواره در هر پروژه پخش آسفالت باید به آن دقت نمود. هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم و پیش‌بینی پارامترهای طرح اختلاط و میدانی مؤثر بر تراکم روسازی بوده تا با شناسایی و کنترل این پارامترها بتوان مقدار پارامتر تراکم را کنترل نمود. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از گزارش تعیین تراکم نسبی آسفالت، گزارش منحنی دانه‌بندی و نتایج آزمایش‌های آسفالت گرم و گزارش طرح اختلاط آسفالت همچنین با به‌کارگیری الگوریتم درخت تصمیم و شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی پارامترهای مؤثر بر تراکم پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد داده‌هایی که دارای دمای پخش بین ۱۲۶ تا ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد، درصد شکستگی در دو جبهه بیشتر از ۹۵/۵٪، استحکام (مقاومت مارشال) کمتر از ۱۴۱۷/۵ کیلوگرم- نیرو و فضای خالی کمتر از ۵/۴۵٪ بودند، تراکم در آنها دارای مقدار مناسب (بیشتراز ۹۷٪) بود. در نتیجه، این پارامترها مؤثرترین پارامترها در طرح اختلاط آسفالت معرفی شد.

واژگان کلیدی: روسازی آسفالتی، کنترل کیفیت، داده‌کاوی، درخت تصمیم، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

تراکم کافی روسازی آسفالتی در مرحله ساخت، از ضروریات عملکرد مناسب آن در طی عمر طولانی‌مدت آن است. اما امروزه با وجود انجام عملیات تراکم طبق آیین‌نامه، سطح آسفالت به تراکم مورد نظر نرسیده و پیمانکاران ملزم به پرداخت جریمه می‌شوند. تراکم کم یا زیاد، در فرآیند ساخت باعث خرابی‌های زودرس و خرابی‌های در طی زمان می‌شود. عوامل مؤثر در تراکم روسازی بسیار زیاد هستند، این عوامل می‌تواند ناشی از ویژگی‌های مواد و مصالح، چگالی اولیه، ترافیک عبوری یا فصل و شرایط محیطی ساخت روسازی و همچنین پارامترهای میدانی مانند دمای محیط، ضخامت روسازی، نوع و وزن غلتک، تراکم لایه‌های زیرین، و سرعت فینیشر باشد. از این‌رو، شناخت و بررسی هریک از عوامل مؤثر بر تراکم کافی مخلوط آسفالتی باعث افزایش عمر روسازی، کاهش هزینه‌های تعمیر و مرمت، و جلوگیری از گسیختگی زودهنگام روسازی می‌شود.

هدف از انجام این مطالعه، استفاده از تکنیک داده‌کاوی درخت تصمیم CART[1] برای تعیین اینکه کدام پارامترها تأثیر بیشتری بر کیفیت، حساسیت و میزان تراکم رویه آسفالتی در پروژه‌های اجرا شده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۰۵، بازنگری ۱۳۹۸/۰۹/۱۵، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۲۲.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2020.4923.1181

[1]- Classification And Regression Tree

می‌گذارند و براساس آنها کنترل‌های دقیق‌تری در میدان بر روی پارامترها انجام شود.

۲- مرور منابع

بیجلولد[۲] و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی بر روی رابطه بین دمای تراکم و خواص مکانیکی روسازی آسفالتی به این نتیجه رسیدند که دمای تراکم مخلوط آسفالتی برای کیفیت نهایی روسازی مهم است. تراکم روسازی در خارج از محدوده دمایی تراکم، با وجود دستیابی به تراکم موردنظر می‌تواند مقاومت در برابر ترک آسفالت را تا ۳۵٪ کاهش و احتمال ترک‌خوردن را تا ۴۰٪ افزایش دهد [۱].

چنگ[۳] و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی حول تأثیر مشخصات مخلوط بر نرخ سرد شدن روسازی آسفالتی و با هدف تخمین زمان موجود برای تراکم مخلوط آسفالتی داغ در شب به این نتیجه رسیدند که نرخ سرد شدن مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و مخلوط با دانه‌بندی متخلخل بسیار متفاوت است. با افزایش فضای خالی از ۱۰٪ به ۲۰٪ زمان لازم برای رسیدن به دمای ۸۰ درجه سانتیگراد تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. زمان مورد نیاز برای سرد شدن تا دمای ۸۰ درجه سانتیگراد دمای پایداری و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد دمای باز شدن مسیر بر روی ترافیک برای ضخامت‌ها و عمق‌های متفاوت مشخص شد [۲]. همچنین استفاده از مصالح مختلف بازیافتی نظیر فریتدر چگالی آسفالت تغییراتی ایجاد می‌کنند، که این تغییرات می‌تواند در فرآیند تراکم و اجرای آنها نیز تأثیرگذار باشد [۳].

در سال ۲۰۱۴ پژوهشگران در تحقیق خود تحت عنوان تخمین زمان سرد شدن مخلوط آسفالتی داغ تازه پخش شده در شرایط هوایی متفاوت به این نکته اشاره نمودند که در تولید مخلوط آسفالتی داغ، مخلوط تازه پخش شده باید قبل از اینکه بار ترافیکی روی آن قرار گیرد به اندازه کافی سرد شود. ایشان نتیجه گرفتند که مخلوط آسفالتی داغ تازه پخش شده باید حتماً قبل از قرار گرفتن بار ترافیکی روی آن، سرد شود [۴]. طبق تحقیق شرکت سیستم‌های ترنس تک[۴] (۲۰۱۸) حول موضوع شاخص کیفیت غیرهسته‌ای روسازی شیوه‌های اندازه‌گیری تراکم لایه‌های روسازی در محل متفاوت است، و با استفاده از روش تراکم‌سنجی الکترومغناطیسی می‌توان نتایج تراکم را در هر نقطه خیلی سریع‌تر و ایمن‌تر از دیگر روش‌های تعیین وزن مخصوص به‌دست آورد [۵]. در تحقیقی دیگر (۲۰۱۶) در رابطه با تأثیر تراکم بر مقاومت لغزشی روسازی‌های آسفالتی محققان به این نکته اشاره نمودند که تراکم، اثر بسیار زیادی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد؛ اما تحقیق بسیار کمی در زمینه اثر تراکم بر مقاومت لغزشی روسازی‌های آسفالتی انجام شده است. سطوح متراکم شده توسط غلتک‌های ارتعاشی دارای توزیع فضای خالی یکسانی در مقایسه با سطوح متراکم شده با غلتک‌های استاتیک می‌باشد [۶].

پژوهشگران (۲۰۱۳) در تحقیقی با هدف پژوهش اثرات شرایط تراکم میدانی بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی و سپس مقایسه این ویژگی‌ها با ویژگی‌های نمونه‌های آماده شده با تعداد چکش‌های مارشال متفاوت به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های آزمایشگاهی و میدانی به جهت‌های مختلف تحت تأثیر سطح تراکم و دما قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج آزمایش خزش دینامیکی (خزش پویا)، افزایش مشاهده شده در عدد روانی نمونه‌ها همراه با افزایش دما بیشترین مقدار را برای نمونه‌های متراکم شده توسط چکش مارشال و کمترین مقدار را برای نمونه‌های میدانی دارا بود [۷]. پلاتی[۵] و همکاران (۲۰۱۴) پژوهشی حول استفاده از گرماسنج مادون‌قرمز

[2]- Bijleveld
[3]- Chang
[4]- Trans-Tech
[5]- Plati

برای ارزیابی پخش و تراکم مخلوط آسفالتی داغ و بررسی اثربخشی و عملی بودن گرماسنج مادون‌قرمز به عنوان یک تکنولوژی نوظهور به انجام رساندند. نتایج حاصله از این قرار بود که با استفاده از گرماسنج مادون‌قرمز حین ساخت مخلوط آسفالتی داغ، تفاوت‌های دمایی روی سطح آسفالت به راحتی شناسایی شده و نقاط سردی که نیاز به انرژی تراکم بیشتری دارند را به‌طور همزمان در اختیار مهندسین قرار می‌دهد [۸].

داده‌کاوی هنر و علم استخراج اطلاعات پنهان، از مجموعه‌ای از داده‌های فراوان است. روش‌های اصلی داده‌کاوی دو دسته می‌باشند: توصیفی و پیش‌بینانه. وظایف روش توصیفی این است که خواص عمومی داده‌ها را مشخص می‌کند. هدف از توصیف، یافتن الگوهایی در داده‌هاست که قابل تفسیر باشد. از روش پیش‌بینانه به منظور پیش‌بینی رفتارهای آینده آنها استفاده می‌شوند [۹].

برای سال‌های متوالی از مدل‌های آماری برای تجزیه و تحلیل رابطه بین تصادفات و عوامل خطر استفاده شده است. در بین این مدل‌ها، روش پواسون و رگرسیون دوجمله‌ای منفی به‌خاطر طبیعت نرخ تصادفات در تقاطعات آزادراه (اعداد گسسته و غیرمنفی) در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای داشته است. براساس بحث‌های انجام شده حول این تحقیق، آنالیز CART در مقایسه با روش رگرسیون دوجمله‌ای منفی هم از نظر تئوری و هم از نظر عملی دارای مزیت‌هایی می‌باشد. از نظر تئوری مزیت آن این است که نیازی نیست شکل عملکردی مدل و فرض وجود رابطه بین عوامل خطر از قبل مشخص باشد؛ از نظر عملی نیز مزیت آن این است که توانایی نمایش گرافیکی نتایج را دارد که این کار درک نتایج را آسان می‌نماید. از مضرات این روش، عدم استفاده مؤثر و بهینه از متغیرهای پیوسته و ترتیبی، فراهم نکردن سطح احتمال یا بازه اطمینان برای عوامل خطر و پیش‌بینی‌ها و مشکل در انجام آنالیز حساسیت می‌باشد.

در تحقیق حاضر، نتیجه‌گیری شد که آنالیز CART جایگزینی مناسب برای تجزیه و تحلیل نرخ تصادفات آزادراه در مقایسه با مدل رگرسیون دو جمله‌ای منفی می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده در اینجا با بررسی طیف وسیعی از متغیرها از جمله هندسه بزرگراه، ترافیک و ویژگی‌های زیست‌محیطی، بینش ارزشمندی را در رابطه بین عوامل خطر و تصادفات خودرو نشان می‌دهد [۱۰]. ریواس[۶] و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی حول موضوع علت و پیش‌بینی تصادفات محل کار با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی به این نتیجه رسیدند که روش تحقیق آمار توصیفی متداول که امروزه به منظور پژوهش در حوزه خطرات محل کار استفاده می‌شود، به‌طور مناسب روابط علت- اثربخشی را شناسایی ننموده و امکان ساخت مدل‌هایی که بتوانند تصادفات را پیش‌بینی کنند ندارند. محققان در این تحقیق از تکنیک‌های داده‌کاوی (درخت تصمیم، بردار ماشین پشتیبان و شبکه‌های بیزی) و اطلاعات به‌دست آمده از مصاحبه‌های بعد از تصادف برای ساخت مدل تصادف استفاده نمودند. نتیجه تحقیق ایشان نشان‌دهنده پیشرفتی مهم در زمینه مدیریت اطلاعات تصادفات محل کار می‌باشد. نتایج رضایت‌بخش درخت‌های تصمیم و شبکه بیزی نشان از این است که این دو، ابزارهای قابل اعتمادی برای مطالعات تصادفات محل کار و علل آنها می‌باشد. کیفیت نتایج به‌گونه‌ای است که امکان طراحی و برنامه‌ریزی مطالعه‌ای هدفمندتر و جامع‌تر با هدف درک عمیق‌تر علل تصادف را می‌دهد [۱۱]. شریعت مهیمنی و توکلی کاشانی (۱۳۸۹) پژوهشی حول موضوع تحلیل شدت مصدومیت ناشی از تصادف‌ها در راه‌های دوخطه برون‌شهری با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی به انجام رساندند. هدف از این پژوهش، شناسایی مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در شدت مصدومیت رانندگان و سایر سرنشینان وسایل نقلیه درگیر

[6]- Rivas

در تصادفات برای راه‌های اصلی دو خطه برون‌شهری بود.براساس نتایج به‌دست آمده، مدل CART به سادگی قابل فهم و تفسیر است، زیرا نتایج حاصله را به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. با توجه به تجزیه و تحلیل نرم‌افزار، عدم استفاده از کمربند ایمنی مهم‌ترین عامل در افزایش شدت مصدومیت سرنشینان و رانندگان وسایل نقلیه است. اقداماتی که جهت پیشگیری از این نوع تصادفات می‌توان انجام داد، اعمال برخوردهای سختگیرانه برای استفاده از کمربند و استفاده از دوربین‌های پیشرفته جهت جریمه کردن متخلفین می‌باشد. از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده مصدومیت نیز سبقت خطرناک شناسایی شد. از جمله اقدامات جهت پیشگیری این نوع تصادفات نیز می‌توان به احداث باندهای سبقت و تشدید اعمال مقررات برای کاهش سبقت‌های خطرناک اشاره نمود [۱۲].

۳- روش تحقیق و معرفی روش داده‌کاوی به‌کاررفته

الگوریتم‌های درخت تصمیم انواع بسیاری دارد؛ اما روند همه آنها مشابه می‌باشد که این روند عبارت است از تقسیم مکرر داده‌ها به گروه‌های کوچک و کوچک‌تر به نحوی که با توجه به متغیر هدف، هر نسل جدید گره‌ها، خالص‌تر از پیشینیان خود می‌باشد. به علت این که برای این فرآیند فرمول‌های محاسباتی ریاضی متفاوتی پیشنهاد شده است، در نتیجه بسته به نوع متغیرهای موجود، روش‌های مختلفی برای ساخت درخت تصمیم در پایگاه داده به‌کار گرفته می‌شود. از جمله روش‌های مورد استفاده روش ID3 و CART می‌باشد. این روش‌ها در فرآیند انتخاب متغیر تقسیم‌گر و نقطه برش آن اختلاف دارند.

درخت دسته‌بندی از نظر مفهومی (برای متغیرهای اسمی و طبقه‌ای) مانند الگوریتم ID3 می‌باشد. این الگوریتم از سه جهت با ID3 تفاوت دارد: اول، در الگوریتم CART از شاخص جینی[۷] به عنوان اندازه ناخالصی استفاده می‌شود. دوم، اگر متغیر وابسته اسمی بیش از دو طبقه باشد، در الگوریتم CART باید طبقات آن طوری باهم ادغام شوند که در نهایت، متغیر هدف، دو طبقه‌ای باشد؛ که این فرآیند را دو بخشی‌سازی می‌گویند. سوم، اگر متغیر هدف، پیوسته (عددی) باشد، الگوریتم CART مجموعه‌ای از معادلات رگرسیونی درخت مبنا برای پیش‌بینی متغیر هدف ارائه می‌دهد. اگر متغیر هدف، پیوسته باشد آن را درخت رگرسیونی و اگر اسمی باشد درخت دسته‌بندی می‌نامند [۱۳].

بسته به متغیر هدف، چندین اندازه ناخالصی برای پیدا کردن تقسیم‌گر در مدل CART وجود دارد. اگر متغیر هدف، طبقه‌ای باشد؛ می‌توان از شاخص‌های جینی، دو بخشی‌سازی یا دو بخشی‌سازی ترتیبی استفاده کرد. اگر متغیر هدف، پیوسته باشد؛ می‌توان از کمترین مربعات خطا (LSD[۸]) یا کمترین قدرمطلق خطا (LAD[۹]) استفاده کرد. شاخص جینی، اندازه نامساوی است که توسط کارادو جینی[۱۰] آماردان ایتالیایی توسعه یافته است و در سال ۱۹۱۲ در مقاله‌ای تحت عنوان بی‌ثباتی و تغییرپذیری[۱۱] منتشر شد [۱۳]. این شاخص، معمولاً برای نامساوی‌های درآمد به‌کار می‌رفت، اما برای اندازه‌گیری هر توزیع ناهموار نیز به‌کار گرفته می‌شد. شاخص جینی، مقداری بین صفر و یک است که مقدار صفر، مطابق با مساوی کامل (همه افراد درآمد یکسان دارند) و مقدار یک، مطابق نامساوی کامل (یک فرد همه درآمد را دارد و بقیه درآمد صفر دارند) می‌باشد. شکل اصلاح شده شاخص جینی به عنوان اندازه ناخالصی گره و معمولاً زمانی که متغیر وابسته، طبقه‌ای است استفاده می‌شود. کمترین مقدار آن برابر صفر و بیشترین مقدار آن برابر $(1-1/k)$ که در آن k تعداد طبقات متغیر وابسته است. شاخص

[7]- Gini Index
[8]- Least Square Deviation
[9]- Least Absolute Deviation
[10]- Corrado Gini
[11]- Mutability and Variability

جینی در گره t، GINI(t) به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$GINI(t) = \sum p(j|t)\,p(j|t) \qquad (۱)$$

که t و j طبقه متغیر هدف هستند. عبارت فوق را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$GINI(t) = 1 - \sum (p(j|t))^2 \qquad (۲)$$

$p(j|t)$ برابر با نسبت طبقه j در گره t می‌باشد. پس وقتی تعداد نمونه در گره نسبت به متغیر هدف هموار توزیع می‌شود، شاخص جینی بیشترین مقدار خود یعنی $1-1/k$ را می‌گیرد. کمترین مقدار آن، که برابر صفر است، زمانی اتفاق می‌افتد که همه داده‌ها در گره، مربوط به یک طبقه متغیر هدف باشد. معیار جینی برای مجزاسازی بر پایه متغیر s در گره t به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$GINI_{split}(s,t) = GINI(T) - P_L GINI(t_L) - P_R GINI(t_R) \qquad (۳)$$

در این رابطه، P_L برابر نسبت نمونه در گره t که در گره فرزند سمت چپ قرار می‌گیرد، P_R نسبت نمونه در گره t که در گره فرزند سمت راست قرار می‌گیرد و $s \in S$ است که در آن S مجموعه کل انشعاب‌های ممکن می‌باشد. انشعاب S باید طوری انتخاب شود که مقدار $GINI_{split}(s,t)$ را حداکثر کند. چون GINI برای هر S در گره t ثابت است، می‌توان گفت که انشعاب Sای انتخاب می‌شود که مقدار رابطه $GINI(s,t) = P_L GINI(t_L) + P_R GINI(t_R)$ را حداقل کند. اگر برای متغیر طبقه‌ای بیش از دو طبقه وجود داشته باشد، آنگاه همه اقدام‌های ممکن برای ترکیب طبقات متغیر به دو طبقه باید انجام شود تا بهترین انشعاب صورت گیرد [۱۳].

هدف از دوبخشی‌سازی این است که طبقات متغیر به دو طبقه مناسب کاهش یابد. سپس از میان متغیرهای پیشگو، بهترین تقسیم‌گر با دو طبقه را پیدا کرده و داده‌ها را براساس آن جدا کرد. معیار دوبخشی برای تقسیم‌گر s در گره t به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$GINI_{Twoing}(t) = \frac{P_L \times P_R}{4} \times \left(\sum \left| P\left(\frac{j}{t_L}\right) \times P\left(\frac{j}{t_R}\right) \right|\right)^2 \qquad (۴)$$

که t_L و t_R گره‌های ایجاد شده توسط تقسیم‌گر s هستند. پس باید تقسیم‌گری انتخاب شود که معیار فوق را حداکثر کند. j شماره طبقه متغیر هدف است. بهترین کلاس‌های C_1 و C_2 در حالتی که متغیر هدف دسته‌ای است، به‌وسیله ترکیب طبقات هدف به‌دست می‌آید.

اغلب هر گره داخلی در درخت تصمیم براساس مقدار یک صفت خاصه منشعب می‌شود، در نتیجه الگوریتم به دنبال بهترین انتخاب خود در میان صفات خاص می‌گردد. معیار بهره اطلاعات[12] در رابطه (۵) یکی از معروف‌ترین معیارهایی است که برای ساخت درخت تصمیم از آن استفاده می‌شود و خود از معیاری دیگر به‌نام آنتروپی[13] استفاده می‌کند.

$$Information\ Gain\ (A) = Entropy(D) - Entropy(A(D)) \qquad (۵)$$

این فرمول، Information Gain را برای صفت خاصه A محاسبه می‌کند که در آن D دلالت بر مجموعه داده‌های آموزشی دارد. Entropy(D) و Entropy(A(D)) براساس روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$Entropy(D) = -\sum_{i=1}^{C} P_i \times Log\,2(P_i) \qquad (۶)$$

$$Entropy(A(D)) \sum_{j=1}^{v} \frac{|D_j|}{|D|} \times Entropy(D_j) \qquad (۷)$$

که در آن، C تعداد برچسب کلاس‌های موجود در داده‌های آموزشی، P_i احتمال نمونه‌ای از داده‌های متعلق

[12]- Information Gain
[13]- Entropy

به کلاس iام، v تعداد اعضای دامنه صفت خاصه A و D_j قسمتی از داده‌های اولیه که مقدار صفت خاصه آنها V_j است را نشان می‌دهد. همچنین $|D|$ دلالت بر اندازه داده‌های D دارد. از معیار Information Gain در الگوریتم ID3 که یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های درخت تصمیم است، استفاده می‌شود. اما در الگوریتم CART که یک درخت تصمیم دودویی است، از معیار شاخص جینی و Twoing استفاده می‌شود و همچنین روشی برای هرس کردن دارد [۱۳].

الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی[۱۴] در دسته‌بندی روشی است که این امکان را به کاربر می‌دهد تا با استفاده از مدل‌های ریاضی و توان کامپیوتر، برخی از جنبه‌های ساده مغز انسان را شبیه‌سازی کند. شبکه‌های عصبی به‌صورت یکی از بخش‌های پیچیده مغز انسان، به‌عنوان یک ساختار یادگیری غیرقابل درک، مشهور شده است. این ساختار پیچیده از مجموعه‌ای از نورون‌ها به‌وجود آمده است که خود نورون‌ها ساختار ساده‌ای داشته ولی شبکه اتصال این نورون‌ها وظایف یادگیری بسیار پیچیده‌ای را به انجام می‌رساند.

یکی از کاربردهای بارز شبکه عصبی مصنوعی در داده‌کاوی می‌باشد. تا آنجاکه حوزه‌ای تحت عنوان داده‌کاوی بر مبنای شبکه‌های عصبی[۱۵] به‌وجود آمده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی در برخی از عملیات مانند پیش‌بینی و دسته‌بندی در مقایسه با سایر روش‌ها دارای مزایای نسبی بوده و معمولاً در کارهای اجرایی ترجیح داده می‌شوند [۹].

۳-۱- معرفی متغیرهای تحقیق

نخستین گام برای مدل‌سازی، گردآوری اطلاعات مربوط به زمینه فعالیت می‌باشد. چراکه پایه و مبنای مدل‌سازی، اطلاعات است. در این بخش به معرفی متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق پرداخته می‌شود.

متغیرهای استفاده شده در این تحقیق از سه گزارش آزمایشگاهی مجزا استخراج شده و در نرم‌افزار اکسل وارد شده تا بتوان در نرم‌افزار SPSS از آنها استفاده نمود. گزارش‌های آزمایشگاهی شامل گزارش تعیین تراکم نسبی، گزارش منحنی دانه‌بندی، نتایج آزمایش‌های آسفالت گرم و گزارش طرح اختلاط آسفالت می‌باشد. در ادامه به توضیح این گزارش‌ها، پارامترهای استخراج شده از هرکدام و تعریف مختصری از آنها پرداخته و نمونه‌ای از شیت‌های آزمایشگاهی مربوط به هر گزارش آورده خواهد شد. پارامترهایی که توضیح داده شد مربوط به طرح اختلاط آسفالت بود، اما در این پژوهش از تعدادی پارامتر میدانی نیز استفاده شد که عبارتنداز: مدت زمان رسیدن کامیون حمل آسفالت از کارخانه به محل پروژه، نوع فینیشر، سرعت فینیشر، نوع غلتک در عبور اول، نوع غلتک در عبور دوم، تعداد کل عبور غلتک‌ها و سرعت متوسط غلتک‌ها.

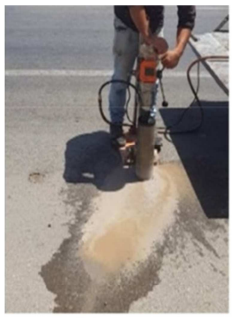
هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر پارامترهای طرح اختلاط و اجرایی بر عملکرد تراکم مخلوط آسفالتی می‌باشد. در راستای رسیدن به این هدف، جمع‌آوری اطلاعات گزارش تعیین تراکم نسبی آسفالت، گزارش منحنی دانه‌بندی، نتایج آزمایش‌های آسفالت گرم و گزارش طرح اختلاط آسفالت ضروری می‌باشد. با توجه به عدم دسترسی به شیت‌های آزمایشگاهی و محرمانه بودن داده‌های بانک اطلاعاتی آزمایشگاه و پس از نامه‌نگاری‌ها و درخواست‌های مکرر، داده‌ها از آزمایشگاه مکانیک خاک استان فارس تهیه گردید و پس از تفکیک در نرم‌افزار اکسل وارد شد.

به عمل استخراج نمونه آسفالتی جهت انجام آزمایش روی آن توسط دستگاه کرگیر[۱۶]، کرگیری (مغزه‌گیری) گفته می‌شود. دستگاه کرگیر یا همان

[14]- Artificial Neural Network
[15]- Neural Network Data Mining
[16]- Universal Electric Core Drill

مغزه‌گیر توسط اعمال نیروهای مختلفی با توجه نوع کاربرد کار می‌کند که شامل موتورهای الکتریکی، بنزینی و در بعضی موارد هیدرولیکی می‌باشد. دستگاه کرگیری با توجه به جنس مته‌ها و نیز جنس مصالح در حین کار، اصطکاک و در نهایت گرمای قابل‌توجهی تولید می‌کند که این نیز باید به روش‌های مختلفی مهار گردد. در مواردی مثل کرگیری آسفالت معمولا از آب جهت خنک کردن مته استفاده می‌شود [۱۴]. شکل ۱، نمونه‌ای از کرگیری میدانی و محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و مسیرهای منتخب(بارنگ قرمز) برای کرگیری میدانی

محدوده مورد مطالعه اجرای آسفالت بلوار شهید چمران، خیابان شهید علیان و معابر شهرستان کوهنجان به مقدار تقریبی ۱۶۰۰۰ مترمربع می‌باشد. پریمکت یا امولسیون قیر نفوذی به میزان ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب تهیه و اجرا شود. تهیه، حمل و اجرای آسفالت بلوار شهید چمران، خیابان شهید علیان و معابر شهر براساس آیین‌نامه‌های جاری کشور با دستگاه‌های مکانیزه انجام شود. در شکل ۱، موقعیت مکانی انجام پروژه با خطوط قرمز مشخص شده‌اند. تهیه و اجرای اندود قیری پریمکت (اندود نفوذی) به ازای هر مترمربع ۱/۳ کیلوگرم قیر در نظر گرفته شود.

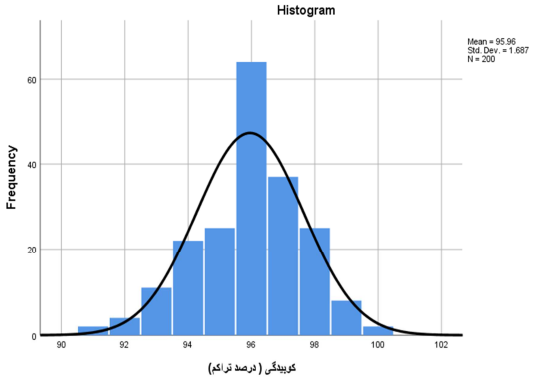
قیر مصرفی جهت تولید آسفالت از نوع ۷۰-۶۰ و از کارخانه نفت پاسارگاد می‌باشد که در اختیار کارفرما قرار می‌گیرد. در اجرای موضوع قرارداد از آسفالت با دانه‌بندی صفر تا ۱۹ میلی‌متر به ضخامت ۵ سانتی‌متر (پس از کوبیدگی) استفاده شود. اجرای آسفالت روی سطوح خیس و در هوای بارانی اکیداً ممنوع بوده و حداقل درجه حرارت آسفالت در زمان اجرا ۱۳۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد باشد. پس از اجرای آسفالت کوبیدگی با غلتک‌های فلزی و چرخ لاستیکی حداقل ۸ تنی الزامی است. در این پژوهش سعی بر آن بود تا با شناسایی عوامل مؤثر بر تراکم و کنترل آنها، میزان تراکم را به حد قابل قبول رساند. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری روش داده‌کاوی درخت تصمیم CART جهت شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر تراکم بود. در این فصل به مروری اجمالی بر نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

نتایج حاصل از مدل‌های درخت تصمیم CART به‌صورت مختصر در این بخش بیان شده است. در ادامه، اثر متغیرهای میدانی به عنوان متغیر تأثیر مورد اشاره قرار می‌گیرد. سپس به شبکه عصبی مصنوعی هرکدام از تراکم‌های بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪ اشاره می‌شود. در انتها پیشنهادهای کاربردی و پیشنهادهایی در راستای ادامه مطالعه، مدل‌سازی تراکم ارائه می‌شود.

۴- مدل‌سازی و کاربرد تکنیک‌های داده‌کاوی

پارامتر تراکم از مغزه‌گیری (کرگیری) نمونه آسفالتی به‌دست می‌آید که حاصل از تقسیم دانسیته آسفالت جاده بر دانسیته نمونه مارشال می‌باشد. در شکل ۲، نمودار منحنی نرمال پارامتر تراکم که متغیر وابسته این پژوهش می‌باشد، ارائه گردیده است.

همانطور که از نمودار مشاهده می‌شود ۳۲٪ از داده‌های تراکم مقدار ۹۶٪ می‌باشد. میانگین کل داده‌ها ۹۵/۹۶ و انحراف معیار برابر با ۱/۶۸۷ می‌باشد. همچنین در جدول ۱، شاخص‌های آماری مربوط به متغیر تراکم آورده شده است.



شکل ۲- نمودار منحنی نرمال متغیر تراکم

در ابتدا شیت‌های آزمایشگاهی دریافت، داده‌های لازم استخراج شده و سپس این داده‌ها در نرم افزار اکسل وارد گردید. پس از آن فایل اکسل اشاره شده در نرم‌افزار SPSS بازخوانی گردید و مدل‌سازی روی این داده‌ها انجام شد. در حالت سوم، درخت تصمیم مربوط به هرکدام از تراکم‌های بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪ به‌طور جداگانه رسم گردید. در حالت چهارم، شبکه عصبی مصنوعی مربوط به داده‌های کلی رسم گردید.

جدول ۱- فراوانی متغیر تراکم

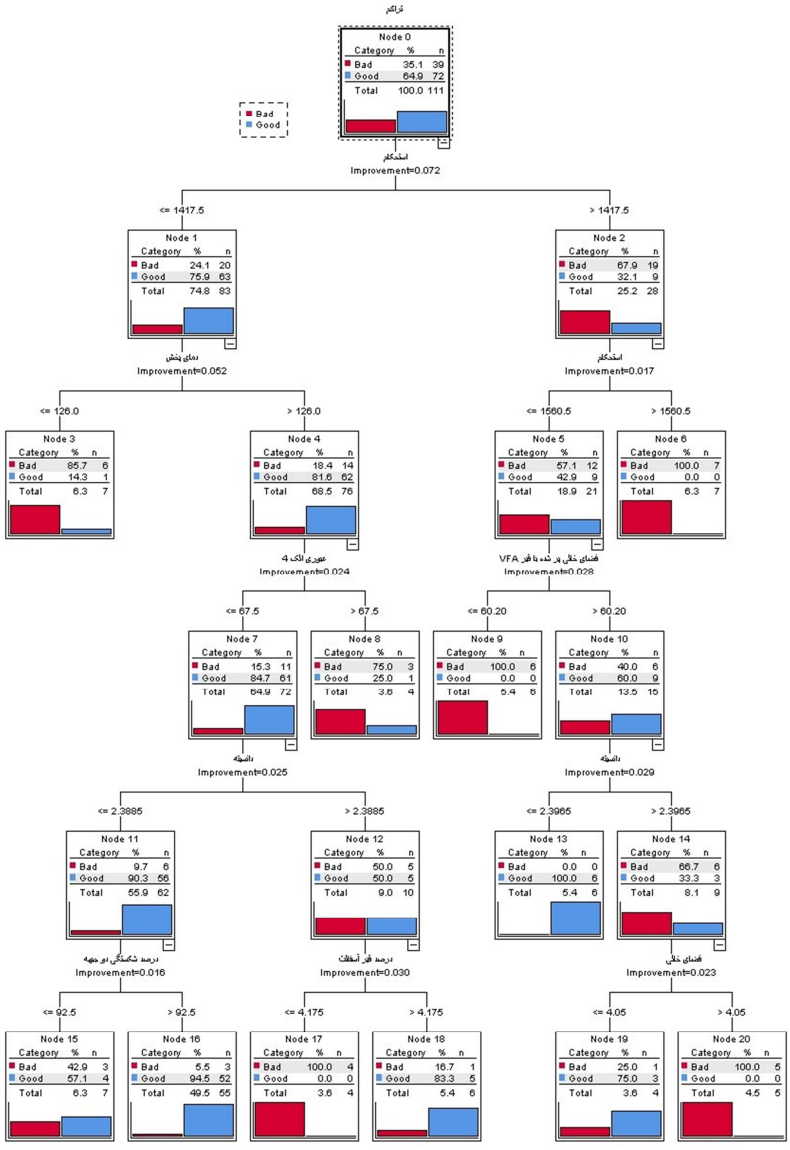
تراکم	تعداد	درصد	درصد معتبر	درصد تجمعی
۹۱	۲	۰/۱	۱/۰	۱/۰
۹۲	۴	۰/۲	۲/۰	۳/۰
۹۳	۱۱	۵/۵	۵/۵	۸/۵
۹۴	۲۲	۱۱/۰	۱۱/۰	۱۹/۵
۹۵	۲۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۳۲/۰
۹۶	۶۴	۳۲/۰	۳۲/۰	۶۴/۰
۹۷	۳۷	۱۸/۵	۱۸/۵	۸۲/۵
۹۸	۲۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۹۵/۰
۹۹	۸	۴/۰	۴/۰	۹۹/۰
۱۰۰	۲	۱/۰	۱/۰	۱۰۰/۰
جمع	۲۰۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	

۴-۱- مدل مربوط به تراکم‌های بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪

در این بخش به مدل‌سازی درخت تصمیم مربوط به تراکم‌های بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪ پرداخته می‌شود. در این بخش، جهت مقایسه داده‌های تراکم

بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪، به علت اینکه در پروژه‌های آسفالتی تراکم بیشتر از ۹۷٪ قابل قبول و تراکم کمتر از ۹۵٪ تخریب آسفالت پخش شده است. از آوردن داده‌های مربوط به ۹۶٪ و ۹۵٪، صرف‌نظر شد تا مقایسه بهتری انجام شود. در نرم‌افزار برای راحت‌تر نمودن مقایسه، داده‌های با تراکم بیشتر از ۹۷٪ با برچسب خوب و داده‌های با تراکم کمتر از ۹۵٪ با برچسب بد، برچسب‌گذاری شد. شکل ۳، مدل درخت تصمیم ساخته شده جهت داده‌های با تراکم بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪ را نشان می‌دهد. در جدول ۲ و ۳، میزان ریسک و دقت مدل پیش‌بینی مشاهده می‌شود.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، گره تراکم که گره اصلی بوده توسط متغیر استحکام به دو زیرگره ۱ و ۲ تقسیم شد. در گره ۲ که میزان استحکام از ۱۴۱۷/۵ کیلوگرم- نیرو بیشتر است، اکثریت داده‌ها یعنی ۶۷/۹٪ در گروه بد دسته‌بندی شدند. این بدان معناست که طبق این داده‌ها اگر استحکام از میزان معینی بیشتر شود، میزان تراکم نهایی کاهش می‌یابد. در نتیجه این گره درخت، همراه با زیرگره‌ها حذف شد.



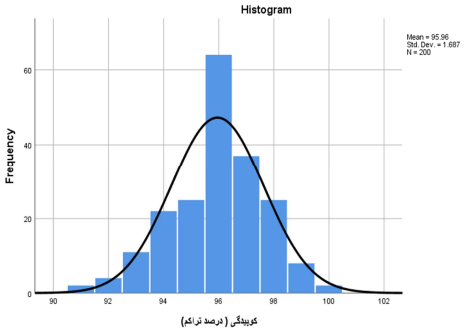
شکل ۳- مدل درخت تصمیم ساخته شده جهت داده‌های با تراکم بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪

جدول ۲- میزان ریسک مدل

ریسک	
خطای استاندارد	مقدار تقریبی
۰/۰۲۷	۰/۰۹۰
روش رشد درخت: CART	متغیر وابسته: تراکم

جدول ۳- میزان دقت پیش‌بینی مدل حالت دوم

طبقه‌بندی			
مشاهده شده	پیش‌بینی شده		
	بد	خوب	درصد صحیح
بد	۳۱	۸	۷۹/۵
خوب	۲	۷۰	۹۷/۲
درصد کلی	۲۹/۷	۷۰/۳	۹۱/۰



روش رشد درخت: CART	متغیر وابسته: تراکم

در گره شماره ۱، که شامل داده‌های با استحکام کمتر یا مساوی ۱۴۱۷/۵ کیلوگرم- نیرو می‌باشد، ۷۵/۹٪ از داده‌ها در دسته خوب قرار گرفته که نشان می‌دهد اکثر داده‌های مربوط به تراکم بیشتر از ۹۷٪ دارای استحکام کمتر یا مساوی ۱۴۱۷/۵ کیلوگرم- نیرو می‌باشد. گره شماره ۱ براساس دمای پخش به دو زیرگره ۳ و ۴ تقسیم می‌شود. در گره شماره ۳، که دمای پخش کمتر یا مساوی ۱۲۶ درجه سانتی‌گراد بود ۸۵٪ از داده‌ها در دسته بد قرار گرفتند. در نتیجه، این گره نیز حذف گردید. این موضوع بیانگر این است که یکی از دلایل این که تراکم آسفالت کمتر از ۹۴٪ می‌شود، دمای پخش کمتر از ۱۲۶ درجه می‌باشد. در گره شماره ۴، که دمای پخش بیشتر از ۱۲۶ درجه سانتی‌گراد بود، ۸۱/۶٪ از داده‌ها در دسته خوب قرار گرفتند. این موضوع بیانگر این است که دمای پخش آسفالت باید بیشتر از ۱۲۶ درجه سانتی‌گراد باشد. گره شماره ۴ براساس عبوری از الک شماره ۴ به دو زیرگره ۷ و ۸ تقسیم گردید.

در گره شماره ۸، که درصد عبوری الک شماره ۴ بیشتر از ۶۷/۵٪ بود، ۷۵٪ از داده‌ها در دسته بد قرار گرفت. در نتیجه این گره نیز حذف شد. این موضوع نیز بیانگر این است که براساس داده‌های موجود جهت رسیدن به تراکم لازم، درصد عبوری از الک شماره ۴ باید بیشتر از ۶۷/۵٪ باشد که در گره شماره ۷، ۸۴/۷٪ از داده‌ها در دسته خوب قرار گرفتند. گره شماره ۷ براساس دانسیته به دو زیرگره شماره ۱۱ و ۱۲ تقسیم شد. به علت این که در گره ۱۲، تعداد داده‌های موجود کم و تعداد این داده‌ها برابر بود، امکان پیش‌بینی درست درباره این گره وجود نداشت و این گره نیز حذف شد. در گره شماره ۱۱

که میزان دانسیته آن کمتر یا مساوی با ۲/۳۸ بود، مقدار ۹۰/۳٪ از داده‌ها در دسته خوب قرار گرفتند که قابل قبول واقع شد. در نهایت گره شماره ۱۱ نیز براساس درصد شکستگی دو جبهه به دو زیرگره ۱۵ و ۱۶ تقسیم شد. در گره شماره ۱۵، به علت اینکه تعداد داده‌های موجود کم بود و از قبل نتیجه‌گیری شد که درصد شکستگی دو جبهه باید بیشتر از ۹۲/۵٪ باشد، این گره نیز حذف گردید. در نهایت در گره شماره ۱۶، که درصد شکستگی دو جبهه در آن بیشتر از ۹۲/۵٪ بود، مقدار ۹۴/۵٪ از داده‌ها در دسته خوب قرار گرفت که قابل قبول بود.

در کل، از مدل درخت تصمیم ساخته شده در شکل ۳ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که متغیرهای استحکام، دمای پخش، عبوری الک ۴، دانسیته و درصد شکستگی دو جبهه در رسیدن تراکم آسفالت به ۹۷٪ تأثیر دارد و جهت رسیدن به تراکم مناسب این پارامترها باید کنترل شوند. براساس جدول ۲، میزان خطای استاندارد این مدل برابر با ۰/۰۲۷ است. همچنین جدول ۳، نشانگر دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد که براساس این جدول دقت پیش‌بینی کلی مدل درخت تصمیم ساخته شده در شکل ۳، برابر با ۹۱٪ می‌باشد.

پژوهش محققان در سال ۲۰۱۵، این موضوع را تصدیق می‌کند که دمای پخش و دمای تراکم، بیشترین اثر را بر تراکم میدانی مخلوط‌های آسفالتی دارند [۱۵]. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۲، دمای مخلوط در زمان تراکم صرف‌نظر از نوع مخلوط، تأثیر بسیار زیادی بر تراکم خواهد داشت [۱۶].

براساس مدل‌های ساخته شده نتیجه‌گیری شد که بازه دمای پخش باید بین ۱۲۶ و ۱۵۵ درجه باشد. در نتیجه در پروژه‌های آسفالتی با توجه به فاصله و زمان حمل آسفالت و دمای محیط، باید دمای پخش را کنترل نمود. همچنین پارامتر درصد شکستگی در دو جبهه نیز اهمیت زیادی دارد که از این موضوع می‌توان نتیجه‌گیری نمود مخلوط‌های آسفالتی که درصد شکستگی در آنها بیشتر از ۹۵/۵٪ باشد، تراکم بیشتری خواهند داشت.

متغیر اثرگذار بعدی استحکام می‌باشد که در درخت تصمیم ساخته شده در ردیف اول بود. با توجه به درخت تصمیم ساخته شده می‌توان نتیجه گرفت که اگر استحکام مخلوط آسفالتی بیشتر از ۱۴۱۷ کیلوگرم- نیرو باشد، سنگدانه‌های موجود در مخلوط به‌طور کامل در هم قفل شده و به هم می‌چسبند. در نتیجه، کارایی مخلوط کاهش یافته، متراکم نمودن چنین مخلوطی کار دشواری می‌باشد و مخلوط به تراکم مورد نیاز نمی‌رسد. پارامتر فضای خالی پر شده با قیر نیز در دو مورد از مدل‌ها، تکرار شد. این متغیر نیز بعد از متغیرهای معرفی شده قبلی، حائز اهمیت است. در انتها متغیرهای فضای خالی، درصد عبوری الک ۴، دانسیته، درصد قیر آسفالت و فضای خالی مصالح (VMA[17]) حائز اهمیت بوده و باید کنترل شوند.

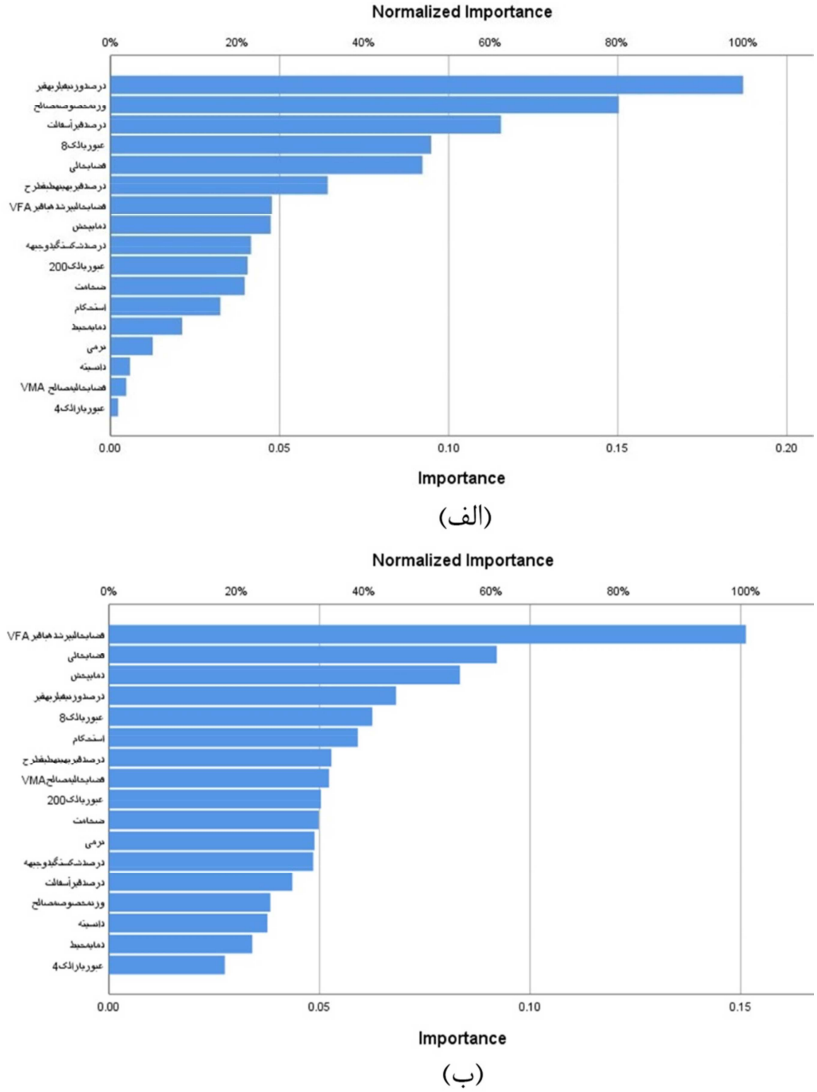
۴-۲- شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪

در این بخش، به‌طور جداگانه برای هرکدام از داده‌های مربوط به تراکم بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪ یک شبکه عصبی، مدل‌سازی شد با توجه به شکل ۴-الف، که شبکه عصبی مربوط به تراکم بیشتر از ۹۷٪ را نشان می‌دهد، این نتیجه حاصل شد که به‌ترتیب متغیرهای درصد وزنی فیلر به قیر، وزن مخصوص مصالح، درصد قیر آسفالت و عبوری الک ۸، بیشترین اثر را بر تراکم دارند.

براساس شکل ۴-ب که از شبکه عصبی مربوط به تراکم کمتر از ۹۵٪ به‌دست آمده است، می‌توان نتیجه گرفت که به ترتیب متغیرهای فضای خالی پر شده با قیر (VFA[18])، فضای خالی آسفالت، دمای پخش و درصد

[17]- Voids in Mineral Aggregate
[18]- Voids Filled with Asphalt

وزنی فیلر به قیر بیشترین اثر را بر تراکم دارند. این مقایسه در جدول ۴ نیز آورده شده است.



شکل ۴- نمودار اهمیت متغیرهای مستقل مربوط به تراکم (الف) بیشتر از ۹۷٪ و (ب) کمتر از ۹۵٪

۴-۳- بررسی اثر متغیرهای میدانی به عنوان متغیر تأثیر بر تراکم

متغیر تأثیر[19] در نرم‌افزار SPSS متغیری است که میزان اثرگذاری بر روند رشد درخت را مشخص می‌کند. در این بخش به بررسی دو متغیر میدانی ضخامت و دمای پخش بر تراکم و روند رشد درخت تصمیم پرداخته می‌شود. همانطور که در شکل ۵- الف مشاهده می‌شود، زمانی که متغیر ضخامت آسفالت به عنوان متغیر تأثیر انتخاب شد، اثرگذاری فضای خالی پر شده با قیر VFA، دمای محیط و عبوری از الک ۲۰۰ بیشتر شد و پس از استحکام، این متغیرها بیشترین اثر را بر تراکم دارند.

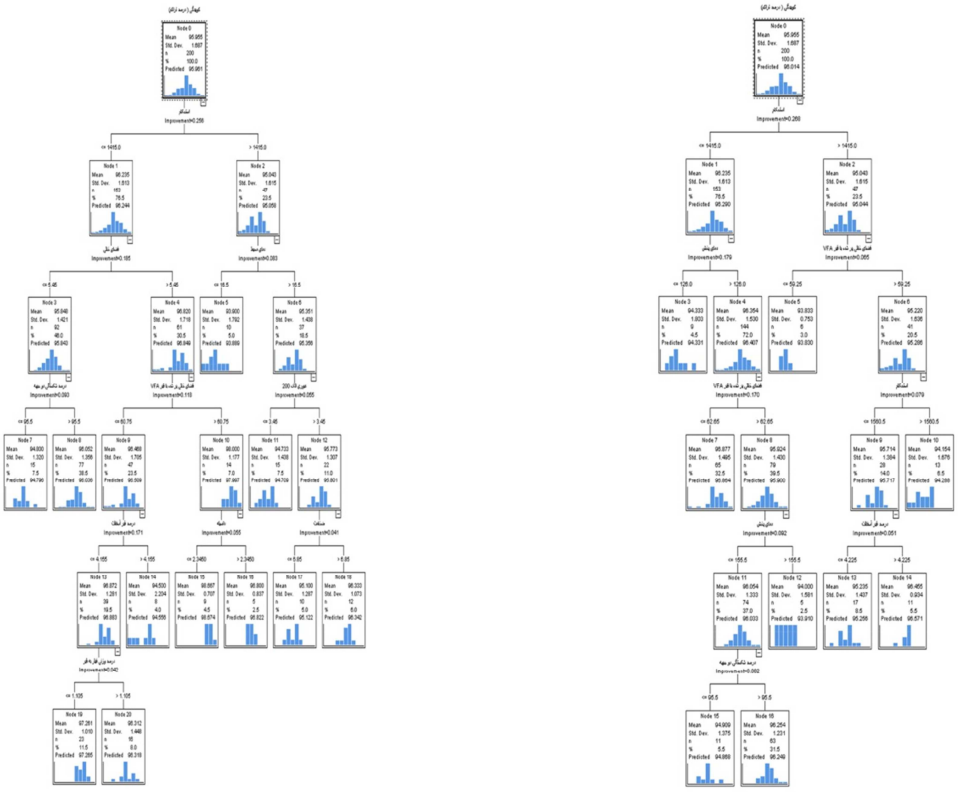
در انتها نیز درخت تصمیم مربوط به متغیر دمای پخش مدل‌سازی شد. همانطور که در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود درخت تصمیم مربوط به متغیر دمای پخش تفاوت چندانی با درخت تصمیم ساخته شده در حالت اول نداشته و تنها تفاوت آن در این موضوع است که گره شماره ۲ که گره پایانی بود، اکنون براساس دمای محیط

[19]- Influence Variable

به دو زیرگره تقسیم شده است که این موضوع نشانگر این است که زمانی که متغیر دمای پخش به‌عنوان متغیر تأثیر انتخاب شود، اثرگذاری متغیر دمای محیط و عبوری از الک ۲۰۰ بر تراکم افزایش می‌یابد.

جدول ۴- اهمیت متغیرهای مستقل به ترتیب بیشترین اهمیت

	مدل داده‌کاوی	
	درخت تصمیم بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪	شبکه عصبی مصنوعی
متغیرهای مستقل	استحکام<۱۴۱۷/۵	فضای خالی پرشده با قیر VFA
	دمای پخش<۱۲۶	دمای پخش
	عبوری الک ۴<۶۷/۵	درصد قیر آسفالت
	دانسیته<۲/۳۸	درصد شکستگی در دو جبهه
	درصد شکستگی دو جبهه<۹۲/۵	فضای خالی مصالح VMA



(الف) (ب)

شکل ۵- درخت تصمیم مربوط به متغیر تأثیر (الف) ضخامت شکل و (ب) دمای پخش

در کل با توجه به درخت‌های تصمیم، نتیجه‌گیری می‌شود که متغیرهای تأثیر ضخامت، دمای پخش، روند رشد درخت تصمیم را تحت تأثیر قرار داده و رشد درخت را بیشتر می‌کنند. در نتیجه، تأثیر برخی متغیرهای دیگر بر تراکم نیز مشخص می‌شود. جدول ۵، اهمیت متغیرهای مستقل درخت تصمیم‌های ساخته شده متغیر، ضخامت و دمای پخش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود متغیرهای دمای پخش، استحکام و درصد شکستگی در دو جبهه همانند سه مدل بحث شده قبل بیشترین اثر را داشته و درخت تصمیم ساخته شده در این مدل، نتایج سه مدل ساخته شده قبلی را تصدیق می‌کند.

۵- تحلیل و بحث مدل‌ها

همانگونه که ذکر شد، در این بخش به بیان متغیرهای مؤثر بر تراکم که در قالب مدل‌های درخت تصمیم و شبکه عصبی بررسی شده‌اند خواهیم پرداخت.

۵-۱- مدل درخت تصمیم مربوط به تراکم بیشتر از ۹۷٪ و کمتر از ۹۵٪

در این مدل، متغیر اول مؤثر بر تراکم، استحکام بود. در نتیجه مشخص شد که استحکام یکی از متغیرهای مهم در تراکم آسفالت بوده که باید در تولید آسفالت آن را کنترل نمود. متغیر بعدی در این مدل، دمای پخش بود.

جدول ۵- اهمیت متغیرهای مستقل ناشی از متغیر تأثیر

متغیر تأثیر	ضخامت	دمای پخش
متغیرهای مستقل	استحکام<۱۴۱۵	استحکام<۱۴۱۵
	دمای پخش>۱۲۶	فضای خالی<۵/۴۵
	فضای خالی پر شده با قیر>۶۲	درصد شکستگی دو جبهه>۹۵/۵

در این مدل اکثر داده‌هایی که دارای تراکم مناسب بودند دارای دمای پخشی بیشتر از ۱۲۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. پس می‌توان نتیجه‌گیری نمود دمای پخش مناسب جهت رسیدن به تراکم مطلوب بین ۱۲۶ و ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

بعد از دمای پخش، این مدل، عبوری از الک۴ را به عنوان متغیر مهم بعدی معرفی نمود. براساس آن درصد عبوری الک شماره ۴ باید کمتر از ۶۷/۵٪ باشد؛ زیرا الک شماره ۴ مرز بین مصالح درشت‌دانه و ریزدانه بوده و هرچه درصد عبوری این الک بیشتر شود، میزان ریزدانه مخلوط بیشتر می‌شود. در نهایت، دانسیته و درصد شکستگی در دو جبهه به عنوان آخرین متغیرهای اثرگذار معرفی شدند. در نتیجه، درصد شکستگی در دو جبهه نیز در هر دو مدل قرار دارد که این موضوع به اهمیت این متغیر می‌افزاید.

همچنین درخت‌های تصمیم ساخته شده با استفاده از متغیرهای تأثیر ضخامت و دمای پخش نشان می‌دهد که متغیرهای دمای پخش، استحکام و درصد شکستگی در دو جبهه همانند سه مدل بحث شده قبل، بیشترین اثر را بر تراکم داشته و درخت تصمیم ساخته شده در این مدل، نتایج سه مدل ساخته شده قبلی را تصدیق می‌کند. همچنین با توجه به درخت‌های تصمیم، نتیجه‌گیری می‌شود که متغیرهای تأثیر ضخامت، دمای پخش، روند رشد درخت تصمیم را تحت تأثیر قرار داده و رشد درخت را بیشتر می‌کنند. در نتیجه، تأثیر برخی متغیرهای دیگر بر تراکم نیز مشخص شد.

۵-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی

از شبکه عصبی مربوط به تراکم بیشتر از ۹۷٪ این نتیجه حاصل شد که به ترتیب متغیرهای درصد وزنی فیلر به قیر، وزن مخصوص مصالح، درصد قیر آسفالت و عبوری الک ۸ بیشترین اثر را بر تراکم دارند و همچنین از شبکه عصبی مربوط به تراکم کمتر از ۹۵٪ این نتیجه حاصل شد که به ترتیب متغیرهای فضای خالی پر شده با قیر (VFA)، فضای خالی آسفالت، دمای پخش و درصد وزنی فیلر به قیر، بیشترین اثر را بر تراکم دارند.

۶- نتیجه‌گیری

این بخش به بیان متغیرهای مؤثر بر تراکم که در قالب مدل‌های درخت تصمیم و شبکه عصبی بررسی شده‌اند خواهد پرداخت. با توجه به جدول ۶ و با مقایسه مدل‌های ساخته شده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که متغیر دمای پخش و استحکام اثرگذارترین متغیرها بر تراکم می‌باشند. همچنین متغیر درصد شکستگی در دو جبهه و متغیر فضای خالی پر شده با قیر (VFA) نیز به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر تراکم شناخته شدند.

از طرفی، علت عدم تراکم کافی آسفالت می‌تواند عدم کنترل یا کنترل نامناسب متغیرهای حاصل از پژوهش باشد. در نهایت با استفاده از روش‌های داده‌کاوی امکان ایجاد رابطه بین متغیرها به‌وجود آمده و در درخت‌های تصمیم ساخته شده، اثربخشی هرکدام از پارامترها بر تراکم آسفالت مشخص گردید.

جدول ۶- پارامترهای مؤثر با مقایسه مدل‌های آماری به‌کار رفته

نوع متغیر	پارامترهای مؤثر	درخت تصمیم تراکم بیشتر از ٪۹۷ و کمتر از ٪۹۵	مدل متغیر تأثیر ضخامت	مدل متغیر تأثیر دمای پخش	شبکه عصبی داده‌های بیشتر از ٪۹۷	شبکه عصبی داده‌های کمتر از ٪۹۵
میدانی	دمای پخش	✓	✓	-	-	✓
	ضخامت	-	-	-	-	-
اختلاط	استحکام	✓	✓	✓	-	✓
	فضای خالی	-	-	✓	✓	✓
	شکستگی در دو جبهه	✓	-	✓	-	-
	عبوری الک ۸	-	-	-	✓	✓
	فضای خالی مصالح VMA	-	-	-	✓	-
	فضای خالی پر شده با قیر VFA	-	✓	-	-	✓
	درصد قیر آسفالت	-	-	-	✓	-
	درصد وزنی فیلر به قیر	-	-	-	✓	✓

با توجه به پارامترهای نتیجه‌گیری شده از پژوهش، می‌توان چند مورد پیشنهاد کاربردی ارائه نمود:

۱- باتوجه به اینکه دمای پخش مؤثرترین متغیر بر تراکم آسفالت شناسایی شد، پیشنهاد می‌شود پیمانکاران با توجه به فاصله کارخانه آسفالت تا محل پروژه و زمان مورد نیاز برای رسیدن کامیون به محل پروژه، دمای پخش را کنترل نموده و با توجه به دمای محیط و دمای پخش اقدام به پخش آسفالت نمایند.

۲- با توجه به اینکه شکستگی در دو جبهه مصالح نیز از پارامترهای مهم در تراکم می‌باشد و براساس الزام اداره صنایع به قرار گرفتن آزمایشگاه مکانیک خاک در محل سنگ‌شکن و کارخانه آسفالت، توصیه می‌شود صاحبان کارخانه آسفالت اقدام به تجهیز آزمایشگاه مکانیک خاک در محل سنگ‌شکن نموده تا بتواند میزان شکستگی مصالح را اندازه‌گیری نماید.

۳- با توجه به اهمیت استحکام (مقاومت مارشال) آسفالت، پیشنهاد می‌شود صاحبان کارخانه آسفالت از اپراتورهای مجرب و با تجربه جهت تولید آسفالت استفاده نموده تا میزان دانه‌بندی با دقت کنترل شده و میزان استحکام آسفالت در بازه مناسب قرار گیرد.

قدردانی

با تشکر از مدیرعامل و پرسنل محترم شرکت آسفالت سازان جنوب که در پژوهش‌های میدانی همراهی نموده و در پیشرفت پژوهش کمال همکاری را داشته است. همچنین از مدیریت و پرسنل محترم آزمایشگاه مکانیک خاک استان فارس که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را در اختیار قرار دادند، کمال تشکر را دارم. از اساتید محترم دکتر خانی سانیچ و دکتر پدارم پیوندی نیز که با ارائه رهنمودهای سازنده در ارتقای علمی نوشتار کمک نمودند سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

[1] Bijleveld, F., Miller, S., De Bondt, A., & Dorée, A. (2012). “Too hot to handle, too cold to control–influence of compaction temperature on the mechanical properties of asphalt”, In *Proc. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress* (Istanbul, Turkey), (pp. A5EE-231).
[2] Chang, C. M., Chang, Y. J., & Chen, J. S. (2009). “Effect of mixture characteristics on cooling rate of asphalt pavements”, *Journal of Transportation Engineering*, *135*(5), 297-304.
[3] Nabiun, N., & Khabiri, M. M. (2016). “Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt”, *Construction and Building Materials*, *113*, 691-697.
[4] Gao, Y., Huang, X., & Yu, W. (2014). “The compaction characteristics of hot mixed asphalt mixtures”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, *29*(5), 956-959.
[5] TransTech Systems. (2018). “Non-Nuclear Pavement Quality Indicator (PQI 380) ”, The PQI 380 conforms to ASTM standard D7113 and AASHTO T 343-12.
[6] Kassem, E., Awed, A., & Masad, E. (2016). “Effect Of Compaction On Skid Resistance Of Asphalt Pavements”, *In Functional Pavement Design*, CRC Press, 1513-1522.
[7] Kök, B. V., Yilmaz, M., & Alataş, T. (2013). “Evaluation of the mechanical properties of field-and laboratory-compacted hot-mix asphalt”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, *26*(9), 04014064.
[8] Plati, C., Georgiou, P., & Loizos, A. (2014). “Use of infrared thermography for assessing HMA paving and compaction”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *46*, 192-208.
[9] Ghazanfari, M., Alizade, S., & Taymourpour, B. (2008). *Data Mining and Knowledge Discovery*. Tehran: Iran University of Science and Engineering (IUST) press.
[10] Chang, L. Y., & Chen, W. C. (2005). “Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency”, *Journal of safety research*, *36*(4), 365-375.
[11] Rivas, T., Paz, M., Martín, J. E., Matías, J. M., García, J. F., & Taboada, J. (2011). “Explaining and predicting workplace accidents using data-mining techniques”, *Reliability Engineering & System Safety*, *96*(7), 739-747.
[12] Shariati Mahimani, A., & Tavakoli Kashani, E. (2010). “Intensity Analysis of Accidental Injuries Using Two-Way Extrusion Roads Using Data Mining Models”, *Journal of Transportation Research*, *7* (2), 153-165.
[13] Xiawi, H., Michelin, K., & Jean, Pae. (2012). *Data Mining Concepts and Techniques*, Third Edition, Translate by Esmaili, M. Niaz Danesh Publishing Co., 224-236.
[14] Von Quintus, H. L., Schmitt, R., & Rao, C. (2006). *Non-nuclear density testing devices and systems to evaluate in-place asphalt pavement density*. Wisconsin Highway Research Program.
[15] Androjić, I., & Dimter, S. (2015). “Influence of compaction temperature on the properties of Marshall specimens”, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *10*(4), 309-315.
[16] Kassem, E., Scullion, T., Masad, E., & Chowdhury, A. (2012). “Comprehensive evaluation of compaction of asphalt pavements and a practical approach for density predictions”, *Transportation Research Record*, *2268*(1), 98-107.