

ارائه مدل پیش‌بینی پارامترهای تراکم بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ آهن و سیمان با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

علیرضا غنی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
ابوذر یارمحمودی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
حکیمه عباسلو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
سعید دادکانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۵ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۱۱۰-۹۷

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، ارائه مدلی برای پیش‌بینی وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت‌شده با سیمان و باطله سنگ آهن است. برای این منظور سیمان با درصدهای ۰، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد و باطله با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به خاک رس اضافه و سپس آزمایش تراکم با استفاده از روش پروکتور اصلاح‌شده بر روی ۲۵ ترکیب مختلف انجام شد و پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۲۵ رکورد آماده شد. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، مدلی جهت پیش‌بینی وزن مخصوص بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ آهن و سیمان ارائه گردید. متغیرهای ورودی در این مدل شامل درصد رطوبت، درصد باطله و درصد سیمان و متغیر خروجی وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت‌شده است. مقدار ضریب رگرسیون مدل توسعه داده شده برابر با ۰/۹۶۳۴ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل است. همچنین مقدار R^2 پیش‌بینی‌شده (۰/۹۴۱۶) نشان‌دهنده سازگاری منطقی آن با مقدار R^2 تعدیل‌یافته (۰/۹۵۵۱) با توجه به تفاوت کمتر از ۰/۰۲ میان آن‌ها است. در نهایت بر پایه مدل توسعه داده شده، نمودارهایی برای پیش‌بینی حداکثر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی و تعیین رطوبت بهینه جهت تراکم بستر رسی تثبیت‌شده با سیمان و باطله سنگ آهن توسعه داده شد. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان بدون انجام آزمایش تراکم، رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک بستر رسی با خمیری کم تثبیت‌شده با سیمان و باطله سنگ آهن را پیش‌بینی نمود.

واژه‌های کلیدی: باطله سنگ آهن، بستر رسی، پارامترهای تراکم، تثبیت با سیمان پرتلند، روش سطح پاسخ (RSM)

۱- مقدمه

به سیمان و آهک اشاره نمود. در سال‌های اخیر تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از باطله و سیمان برای تثبیت خاک صورت گرفته است. باشا و همکاران تحقیقی باهدف تثبیت خاک‌های رسوبی با استفاده از سیمان و خاکستر پوسته برنج انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزودن سیمان و خاکستر پوسته برنج به خاک رسوبی، دامنه خمیری آن به شدت کاهش می‌یابد. این تحقیق نشان داد که مقدار بهینه

در چند دهه اخیر، تقاضا برای ساخت بزرگراه‌ها، ساختمان‌ها و پل‌ها تا حد زیادی رو به افزایش بوده است، خصوصاً در مناطقی که جمعیت به سرعت در حال افزایش است. در بسیاری از پروژه‌های راهسازی، سطح وسیعی از خاک بستر را رس تشکیل داده است که مناسب برای ساخت روسازی نمی‌باشد. برای تثبیت خاک بستر، افزودنی‌های متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله این افزودنی‌ها می‌توان

آهک و ضایعات سنگ آهن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق که به صورت آزمایشگاهی انجام شد، نشان داد که با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸ درصد، دانسیته خشک افزایش و پس از آن کاهش یافت. همچنین با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن، مقدار رطوبت بهینه کاهش یافت. به علاوه افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸ درصد، مقدار مقاومت فشاری محصور نشده را برای دوره های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، افزایش و پس از آن کاهش داد. همچنین با افزایش مقدار ضایعات سنگ آهن تا ۸ درصد، مقدار سی بی آر اشباع و غیر اشباع به حداکثر مقدار خود رسید و پس از آن کاهش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که درصد بهینه آهک ۸ درصد و درصد بهینه ضایعات سنگ آهن نیز ۸ درصد است (Osinubi et al., 2017). امروزه به دلایل زیست محیطی، ارزان بودن و سهولت دسترسی، استفاده از باطله سنگ آهن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. طبق تحقیقات صورت گرفته، در شرکت گل گهر سیرجان سالیانه بالغ بر ۲/۵ میلیون تن ضایعات سنگ آهن تولید می شود. این مقدار، هم باعث آلودگی محیط زیست می شود و هم محوطه ی زیادی را اشغال می کند. در دسترس بودن فضایی برای دفع ضایعات در آینده، یک مشکل عمده برای صنایع مرتبط خواهد بود. ضایعات معدنی که در سدهای باطله ذخیره شده اند، می توانند تأثیرات محیطی منفی را از طریق بی ثباتی ژئوتکنیکی، فیزیکی و شیمیایی داشته باشند. آلودگی زمین و آب های سطحی به وسیله مواد سمی مانند فلزات محلول، سیانید و سولفات ها که به وسیله ی ضایعات معدنی ذخیره شده در سدهای باطله به وجود آمده اند، اثرات منفی عمده ای روی محیط زیست دارند.

همچنین انباشت مداوم ضایعات معدنی در محیط زیست به مشکلات متعدد زیست محیطی مانند از دست دادن باروری زمین، گردوغبار، فرسایش و اثرات آن بر اکوسیستم کمک می کند (Kuranchie, 2015).

به منظور مدل سازی و ارائه رابطه ای بین پارامترهای معمول خاک با پارامترهای پیچیده تر خاک، روش های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می توان به روش رگرسیون خطی، روش رگرسیون غیرخطی و روش های مبتنی بر هوش محاسباتی اشاره نمود. استفاده از روش های رگرسیون در حالتی که روابط پیچیده غیرخطی بین پارامترها وجود داشته باشد،

سیمان ۶ تا ۸ درصد و مقدار بهینه خاکستر پسته برنج نیز ۱۵ تا ۲۰ درصد است (Basha et al, 2005). در تحقیق دیگری ژئی و همکاران امکان استفاده از باطله سنگ آهن و سیمان در اساس جاده ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان بیشتر از ۱۵ درصد، به خوبی جواب می دهد و باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می شود و می توان آن را در اساس و زیراساس راه های کم تردد استفاده نمود (Xu, 2013). ارزیابی های انجام شده توسط لی نشان داد که استفاده از باطله آهن در اساس ماکادامی تثبیت شده با سیمان، از یک سو می تواند مقدار زیادی از این مواد را مصرف کند و از یک سو می تواند آسیب های ناشی از انباشت آن را کاهش دهد (Li, 2014). کرانچی تحقیقی باهدف رفتار بار-نشست پی نواری روی سازه های پر شده با ضایعات سنگ آهن انجام داد. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری و مدول عکس العمل بستر با افزایش عمق پایه و تراکم نسبی ضایعات، افزایش می یابد که در مقایسه با خاک ماسه ای، دارای ظرفیت باربری و سختی قابل توجهی است (Kuranchie, 2015). قاسمی و نظام آبادی در تحقیق خود به بررسی تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت فشاری شفته آهک پرداختند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ضایعات معدن سنگ آهن به شفته آهک باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری می شود. این تحقیق نشان داد که درصد بهینه ضایعات ۲۰ و درصد بهینه آهک نیز ۲ درصد است (قاسمی و نظام آبادی، ۱۳۹۵ الف). قاسمی و نظام آبادی در تحقیق دیگری تأثیر ضایعات معدن سنگ آهن بر مقاومت ملات ماسه سیمان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه کردن ضایعات معدن سنگ آهن به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری می شود. همچنین این تحقیق نشان داد که درصد بهینه ضایعات ۱۰ و درصد بهینه سیمان نیز ۶ درصد است (قاسمی و نظام آبادی، ۱۳۹۵ ب). باستوس و همکاران به ارزیابی قابلیت استفاده از باطله سنگ آهن به عنوان مواد جایگزین برای زیرسازی جاده ها پرداختند. نتایج نشان داد که باطله سنگ آهن امکان استفاده در لایه های روسازی پس از تثبیت شیمیایی را دارد. همچنین سیمان مؤثرترین تثبیت کننده باطله سنگ آهن از بین سایر افزودنی ها بود (Bastos et al., 2016). اسینوبی و همکاران تثبیت خاک پنبه سیاه با

مقایسه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش شبکه عصبی چندلایه پرسپترون، مقدار وزن واحد خشک خاک را با دقت بالاتری نسبت به روش رگرسیون خطی پیش‌بینی می‌کند (Kolay and Baser, 2014). اردکانی و کردناج، از روش شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی پارامترهای فشردگی خاک استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی GMDH توانایی بسیار خوبی برای پیش‌بینی مقادیر دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه دارد (Ardakani and Kordnaej, 2017).

در این مقاله به مدل‌سازی وزن مخصوص بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ‌آهن و سیمان با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) پرداخته شده است. روش سطح پاسخ (RSM)، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که در بهینه‌سازی بسیاری از فرآیندهای مختلف به کار می‌رود. مزیت اصلی روش سطح پاسخ یعنی کاهش تعداد آزمایش‌های لازم جهت پیش‌بینی پارامترهای متعدد و برهم‌کنش بین آن‌ها، منجر به ترغیب محققان جهت ساخت مدل‌هایی ساده و عموماً دقیق برای مسائل پیچیده شده است. با توجه به پیشینه تحقیق ارائه‌شده، تاکنون هیچ مدلی برای پیش‌بینی وزن مخصوص بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ‌آهن و سیمان ارائه نشده است.

نتایج مناسبی را در پی ندارد. در این موارد معمولاً از روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی استفاده می‌شود. در ادامه به برخی تحقیقات انجام‌شده در این خصوص اشاره شده است. سینها و ونگ از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تراکم و نفوذپذیری خاک استفاده نمودند. مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که پیش‌بینی‌ها در محدوده اطمینان ۹۵ درصد می‌توانند از طریق مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به دست آیند (Sinha and Wang, 2007). گونایدین پارامترهای تراکم خاک (وزن مخصوص خشک حداکثر و مقدار رطوبت بهینه) را با استفاده از تحلیل‌های آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌سازی و موردبررسی قرار داد. تجزیه و تحلیل رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی نشان‌دهنده همبستگی قوی

($r^2=0.70-0.95$) بین پارامترهای تراکم و خواص طبقه‌بندی خاک بود (Gunaydin, 2008). تحقیقات اسلامی و همکاران در خصوص پیش‌بینی سرعت موج‌برشی نشان داد که روش گروهی بررسی داده‌ها (GMDH)، در مقایسه با روابط آماری قبلی، یک ابزار مؤثر برای تشخیص درست سرعت موج‌برشی است (Eslami et al., 2013). کولای و باسر روش‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی چندلایه پرسپترون را برای پیش‌بینی وزن مخصوص خشک خاک متراکم شده به کار گرفتند و این دو روش را با یکدیگر

جدول ۱. مشخصات خاک رس مورد استفاده در تحقیق

مقدار	مشخصات
A-6	طبقه‌بندی اشتنی
CL	طبقه‌بندی یونیفاید
۳۶/۵۸	حد روانی
۲۲/۲۴	حد خمیری
۱۴/۳۴	شاخص خمیری
۲/۴۵	چگالی خاک (G _s)

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح

داده شده است. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ II بود. سیمان مصرفی از کارخانه سیمان ممتازان واقع در ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهر کرمان تهیه شد. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است. باطله مورد استفاده نیز در شکل ۱-ب نشان داده شده است. نمودار دانه بندی باطله در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

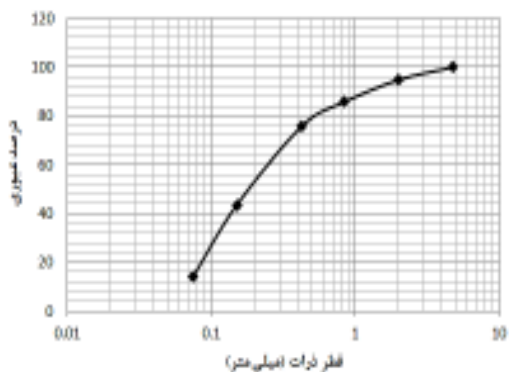
در این مطالعه از خاک رس با خمیری کم، سیمان و باطله سنگ آهن استفاده شده است. خاک مصرفی در این تحقیق از فاصله ۶۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان سیرجان واقع در استان کرمان تهیه شد. شکل ۱-الف خاک رس مصرفی را نشان می دهد. مشخصات خاک رس در جدول ۱ ارائه شده است. نمودار دانه بندی خاک رس در شکل ۲-الف نشان



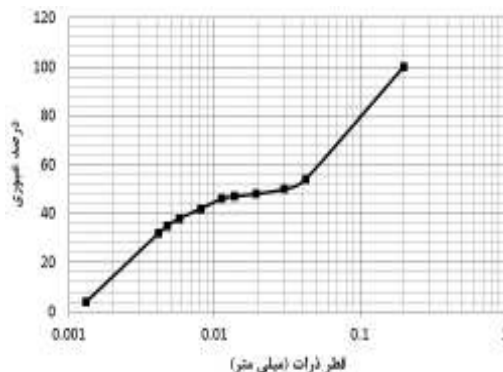
(ب)

(الف)

شکل ۱. مشخصات مصالح مصرفی. الف: خاک رس. ب: باطله سنگ آهن



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمودار دانه بندی مصالح مصرفی. الف: نمودار دانه بندی خاک رس. ب: نمودار دانه بندی باطله سنگ آهن

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان

ترکیبات	مقدار %
C ₃ A	۶/۵
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۴/۶
Fe ₂ O ₃	۳/۸
MgO	۱/۸
SO ₃	۲/۵
LOI	۱/۵
I.R	۰/۵

۲-۲- آزمایش پروکتور اصلاح شده

این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM D1557 انجام شد. هدف از انجام عملیات تراکم، کاهش میزان تخلخل خاک است. وجود آب تا میزان مشخصی، سبب تسهیل این عملیات می‌گردد. به دست آوردن این حد رطوبت و حداکثر چگالی خشک خاک پس از به کار بردن میزان معینی انرژی کوبشی، هدف مهم آزمایش تراکم است. در بسیاری از سازه‌های خاکی مثل سدها، دیوارهای حائل، بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها و غیره، متراکم کردن خاک امری ضروری برای بهبود مقاومت خاک است. متراکم کردن خاک که عبارت است از قرار دادن خاک در یک موقعیت چگال تر، به چند دلیل مطلوب است (افتخاریان و همکاران، ۱۳۹۳):

- کاهش نفوذپذیری
- بهبود خواص مکانیکی خاک
- کاهش قابلیت تورم خاک

آزمایش پروکتور به دو صورت استاندارد و اصلاح شده انجام می‌شود. با توجه به این‌که انرژی تراکم در روش پروکتور اصلاح شده به انرژی تراکم در عملیات راه‌سازی نزدیک‌تر است، در این تحقیق از روش پروکتور اصلاح شده استفاده شد. همچنین نشریه ۲۳۴ نیز برای کنترل تراکم لایه‌های روسازی، آزمایش پروکتور اصلاح شده را پیشنهاد کرده است (نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰). مشخصات مربوط به این آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است.

- کاهش نشست‌ها در آینده
- افزایش مقاومت برشی

جدول ۳. مشخصات آزمایش پروکتور اصلاح شده

پارامتر	مقدار
حجم قالب	۹۴۶/۴۵ سانتی‌متر مکعب
قطر قالب	۱۰/۱۶ سانتی‌متر
ارتفاع قالب	۱۱/۶۸ سانتی‌متر
وزن چکش	۴۵۰۰ گرم
تعداد لایه‌ها	۵
ارتفاع سقوط چکش	۴۵ سانتی‌متر
تعداد ضربات روی هر لایه	۲۵
انرژی تراکم حاصل در واحد حجم	۹۰۱/۸۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای این منظور ابتدا خاک عبوری از الک شماره ۴ درون سینی ریخته و با درصدهای مختلف باطله و سیمان مخلوط شد تا مخلوطی یکدست به دست آید. سپس به مخلوط (خاک، باطله و سیمان) به میزان ۵ درصد وزنش آب اضافه و به خوبی مخلوط شد تا همگن شود. آنگاه مخلوط در ۵ لایه در قالب تراکم ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شد تا متراکم شود. سپس مقداری از مخلوط درون ظرف نمونه‌گیر ریخته شد و پس از وزن نمودن آن به مدت ۲۴ ساعت داخل آن قرار گرفت تا درصد رطوبت تعیین شود. در مرحله بعد، به مخلوط ۸ درصد رطوبت اضافه شد و مجدداً مراحل فوق انجام شد. به همین شیوه هر مرحله باید ۳ درصد رطوبت به درصد رطوبت مرحله قبل اضافه شود. این کار را تا زمانی انجام می‌دهیم که وزن مخلوط متراکم شده در قالب از وزن

مخلوط متراکم شده در قالب مرحله قبل کمتر شود. سپس می‌توان درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را به دست آورد.

۳- پایگاه داده

پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، ۱۲۵ داده منحصر به فرد مربوط به درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک حاوی درصدهای مختلف سیمان و باطله سنگ آهن به دست آمد. در جدول ۴، درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر برای هر ترکیب آورده شده است. همچنین در جدول ۵، حدود آماری مجموعه داده مصالح، درصد رطوبت و چگالی خشک آورده شده است.

جدول ۴. درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر برای ترکیبات مختلف خاک، باطله و سیمان

درصد خاک	درصد باطله سنگ آهن	درصد سیمان	درصد رطوبت بهینه	چگالی خشک حداکثر
۱۰۰	۰	۰	۱۴/۵	۱/۹۳۵
۹۰	۱۰	۰	۱۳/۵	۲/۰۱۵
۸۰	۲۰	۰	۱۲	۲/۰۶۰
۷۰	۳۰	۰	۱۲	۲/۰۹۵
۶۰	۴۰	۰	۱۰/۵	۲/۱۲۰
۹۴	۰	۶	۱۴/۷	۱/۹۳۸
۸۴	۱۰	۶	۱۳/۵	۱/۹۹۸
۷۴	۲۰	۶	۱۲/۵	۲/۰۱۸
۶۴	۳۰	۶	۱۱	۲/۰۷۰
۵۴	۴۰	۶	۱۱/۵	۲/۰۶۸
۹۱	۰	۹	۱۳/۵	۱/۹۷۵
۸۱	۱۰	۹	۱۳	۲/۰۱۰
۷۱	۲۰	۹	۱۲/۶	۲/۰۴۵
۶۱	۳۰	۹	۱۱/۵	۲/۰۷۰
۵۱	۴۰	۹	۱۱/۴	۲/۰۷۵
۸۸	۰	۱۲	۱۳/۶	۱/۹۵۷
۷۸	۱۰	۱۲	۱۳	۱/۹۹۹
۶۸	۲۰	۱۲	۱۲/۶	۲/۰۳۵
۵۸	۳۰	۱۲	۱۱/۶	۲/۰۶۸
۴۸	۴۰	۱۲	۱۱/۵	۲/۰۸۰
۸۵	۰	۱۵	۱۴	۱/۹۵۸
۷۵	۱۰	۱۵	۱۳/۵	۲/۰۰۵
۶۵	۲۰	۱۵	۱۲/۷	۲/۰۳۰
۵۵	۳۰	۱۵	۱۰/۲	۲/۰۷۰
۴۵	۴۰	۱۵	۱۱/۲	۲/۰۶۵

جدول ۵. حدود آماری مجموعه داده مصالح، درصد رطوبت و چگالی خشک

متغیر	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	میان	مد
خاک	۱۰۰	۴۵	۷۱/۶	۱۵/۱۲	۷۱	۱۰۰
سیمان (cement)	۱۵	۰	۸/۴	۵/۱۸	۹	۰
باطله سنگ آهن (IOMT)	۴۰	۰	۲۰	۱۴/۲	۲۰	۰
درصد رطوبت (MC)	۱۹/۲۹	۶/۴۴	۱۲/۹۰	۳/۸۸	۱۲/۶۹	۱۳/۴۶
چگالی خشک (DD)	۲/۱۱	۱/۷۹	۱/۹۷	۰/۰۷	۱/۹۷	۲

۴- روش سطح پاسخ (RSM) روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهاست (Myers and Montgomery, 2002). روش سطح پاسخ یک روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چندین متغیر ورودی به‌طور بالقوه و یک پارامتر خروجی است. در اصطلاح به این پارامتر خروجی پاسخ گفته می‌شود. متغیرهای ورودی در اغلب اوقات به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند و در عمل بستگی به کنترل محققان و مهندسان دارند. از جمله کاربردهای روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری به‌منظور توسعه رابطه‌ای مناسب بین پاسخ Y و متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_k است. رابطه کلی به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3)$$

به دلیل ناشناخته بودن شکل تابع پاسخ f ، باید آن را تقریب زد. در حقیقت، استفاده موفق از سطح پاسخ به توانایی محقق برای توسعه یک تقریب مناسب برای f بستگی دارد. معمولاً یک تابع چندجمله‌ای مرتبه پایین در منطقه نسبتاً کوچکی از فضای متغیر مستقل مناسب است. در بسیاری از موارد، از یک مدل چندجمله‌ای مرتبه اول یا مرتبه دوم استفاده می‌شود. مدل‌های مرتبه اول زمانی مناسب‌اند که محقق علاقه‌مند باشد تا سطح پاسخ صحیح را در بیش از یک نقطه نسبتاً کوچک از فضای متغیر مستقل و محلی که در آن انحنای کمی در f وجود دارد، تخمین بزند. در صورت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه اول با توجه به متغیرهای کد شده به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (4)$$

شکل مدل مرتبه اول در معادله ۴ گاهی اوقات تحت عنوان مدل تأثیرات اصلی نامیده می‌شود، زیرا فقط اثرات اصلی دو متغیر فرضی x_1 و x_2 را شامل می‌شود. در صورت وجود یک برهم‌کنش بین این متغیرها، مدل به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (5)$$

افزودن جزء برهم‌کنش، معرف انحنای تابع پاسخ خواهد بود. اغلب انحنا در سطح پاسخ صحیح به‌اندازه‌ای است که مدل مرتبه اول (حتی با وجود جزء برهم‌کنش) برای تقریب آن دارای کارایی لازم نیست. در این شرایط به مدل مرتبه دوم نیاز خواهد بود. در حالت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه دوم به‌صورت معادل ۲ خواهد بود.

۴- روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهاست (Myers and Montgomery, 2002). روش سطح پاسخ یک روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چندین متغیر ورودی به‌طور بالقوه و یک پارامتر خروجی است. در اصطلاح به این پارامتر خروجی پاسخ گفته می‌شود. متغیرهای ورودی در اغلب اوقات به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند و در عمل بستگی به کنترل محققان و مهندسان دارند. از جمله کاربردهای روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری به‌منظور توسعه رابطه‌ای مناسب بین پاسخ Y و متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_k است.

رابطه کلی به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن شکل تابع پاسخ دقیق f ناشناخته است و ممکن است پیچیده باشد و ε نشان‌دهنده خطای مدل‌سازی است که در تابع f به‌حساب نیامده است. ε معمولاً شامل اثرات خطای اندازه‌گیری بر پاسخ و همچنین تأثیر خطای ناشی از عوامل پارامترهای ورودی ناشناخته در مدل‌سازی است. ε دارای ماهیت اتفاقی است و به همین دلیل معمولاً به‌صورت توزیع احتمال نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 فرض می‌شود. پس داریم:

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (2)$$

متغیرهای $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ در رابطه (۲) معمولاً متغیرهای طبیعی نامیده می‌شوند، زیرا با واحدهای اندازه‌گیری طبیعی مانند درجه سانتی‌گراد، کیلوگرم بر مترمکعب و غیره بیان شده‌اند. در اکثر تحقیقات مبتنی بر مدل سطح پاسخ، به‌راحتی می‌توان متغیرهای طبیعی را به متغیرهای کد شده x_1, x_2, \dots, x_k تبدیل کرد.

شدند. تحلیل نتایج نشان دهنده برتری تابع درجه چهار بود (جدول ۶). این مدل علاوه بر مقدار P کم (< 0.0001), ضریب رگرسیون 0.9634 را نتیجه داد. از طرفی با توجه به جدول ۷، مقدار R^2 پیش‌بینی شده (0.9416) نشان‌دهنده سازگاری منطقی آن با مقدار R^2 تعدیل‌یافته (0.9551) با توجه به تفاوت کمتر از 0.02 میان آن‌هاست. نتایج تحلیل واریانس نیز در جدول ۸ نشان داده شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که علاوه بر متغیرهای اولیه (سیمان، باطله سنگ‌آهن و رطوبت بهینه)، برهم‌کنش میان مجذور، مکعب، توان چهارم متغیرهای اولیه بر یکدیگر و همچنین بر خود متغیرهای اولیه در پیش‌بینی وزن مخصوص خشک مؤثر بوده است. همین‌طور با توجه به مقادیر F می‌توان نتیجه گرفت که درجه اهمیت متغیرها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} C^2 > BC^2 > AC > A > AC^3 > C > AB^2C > \\ A^2 > ABC > AB > A^2C^2 > B^3 > AB^2 > B^2C > \\ B > BC > C^3 > A^2C > B^2 = AC^2 > A^3 > A^2B > C^4 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (6)$$

این مدل می‌تواند برای تقریب سطح پاسخ صحیح در یک منطقه نسبتاً کوچک، به کار رود.

در این تحقیق به منظور ساخت مدل RSM از نسخه ۱۰ نرم‌افزار Design Expert استفاده شده است. این نرم‌افزار امکان برازش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف اعم از خطی، 2FI و چندجمله‌ای را به روش سطح پاسخ فراهم می‌آورد. همچنین صحت مدل با استفاده از آزمون فیشر سنجیده شد و دقت عملکرد مدل به وسیله ضریب رگرسیون (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مدل‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ

(RSM)

در این تحقیق از سه تابع درجه دوم، درجه سوم و درجه چهارم به منظور توسعه مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ‌آهن و سیمان، استفاده شده است و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه

جدول ۶. مقایسه مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی وزن مخصوص خشک.

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P Prob > F	R^2
درجه چهارم	۰/۰۲۳	۱۰۱	2.253×10^{-4}	۰/۰۲۶	< 0.0001	۰/۹۶۳۴
درجه سوم	۰/۰۴۱	۱۰۵	3.915×10^{-4}	۰/۰۶۲	< 0.0001	۰/۸۹۰۹
درجه دوم	۰/۰۶۸	۱۱۵	5.902×10^{-4}	۰/۰۳۱	< 0.0001	۰/۹۳۳۹

جدول ۷. تحلیل آماری مدل RSM

۰/۹۶۳۴	R^2
۰/۹۵۵۱	R^2 تعدیل‌یافته (Adj R-Squared)
۰/۹۴۱۶	R^2 پیش‌بینی شده (Pred R-Squared)
۴۶/۸۶۶	کفایت دقت (Adeq Precision)
۰/۰۱۵	انحراف معیار
۰/۷۶	ضریب تغییر (C.V. %)

جدول ۸. تحلیل واریانس

متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	F	P Prob > F
A-IOMT	۰/۰۱۴	۱	۶۳/۵۸	<۰/۰۰۰۱
B-cement	۸/۰۳۱×۱۰ ^{-۴}	۱	۳/۵۶	۰/۰۶۱۹
C-MC	۰/۰۱۲	۱	۵۲/۹۵	<۰/۰۰۰۱
AB	۳/۸۸۶×۱۰ ^{-۳}	۱	۱۷/۲۵	<۰/۰۰۰۱
AC	۰/۰۱۷	۱	۷۳/۶۰	<۰/۰۰۰۱
BC	۶/۹۲۵×۱۰ ^{-۴}	۱	۳/۰۸	۰/۰۸۲۶
A ²	۵/۰۸۵×۱۰ ^{-۳}	۱	۲۲/۷۱	<۰/۰۰۰۱
B ²	۳/۰۳۸×۱۰ ^{-۴}	۱	۱/۳۵	۰/۲۴۳۸
C ²	۰/۰۲۸	۱	۱۲۳/۳۶	<۰/۰۰۰۱
ABC	۴/۳۳۵×۱۰ ^{-۳}	۱	۱۹/۲۴	<۰/۰۰۰۱
A ² B	۸/۵۷۱×۱۰ ^{-۴}	۱	۳/۸۰۴×۱۰ ^{-۲}	۰/۹۹۵۱
A ² C	۳/۰۹۶×۱۰ ^{-۴}	۱	۱/۳۷	۰/۲۴۳۹
AB ²	۱/۶۶۹×۱۰ ^{-۳}	۱	۷/۴	۰/۰۰۷۷
AC ²	۳/۰۵۱×۱۰ ^{-۴}	۱	۱/۳۵	۰/۲۴۷۳
B ² C	۹/۹۳۵×۱۰ ^{-۴}	۱	۴/۴۱	۰/۰۳۸۲
BC ²	۰/۰۲۰	۱	۸۸/۲۲	<۰/۰۰۰۱
A ³	۱/۳۳۷×۱۰ ^{-۴}	۱	۰/۵۹	۰/۴۴۳۰
B ³	۲/۰۷۹×۱۰ ^{-۳}	۱	۹/۲۳	۰/۰۰۳۰
C ³	۶/۰۶۸×۱۰ ^{-۴}	۱	۲/۶۹	۰/۱۰۳۹
A ² C ²	۲/۷۴۹×۱۰ ^{-۳}	۱	۱۲/۲۰	۰/۰۰۰۷
AB ² C	۶/۸۰۹×۱۰ ^{-۳}	۱	۳۰/۲۲	<۰/۰۰۰۱
AC ³	۰/۰۱۲	۱	۵۳/۷۳	<۰/۰۰۰۱
C ⁴	۵/۴۰۴×۱۰ ^{-۳}	۱	۲۳/۹۸×۱۰ ^{-۸}	<۰/۰۰۰۱

A. باطله سنگ آهن، B. سیمان، C. درصد رطوبت

رابطه (۸) را می توان برای پیش بینی وزن مخصوص خشک، توسط مدل سطح پاسخ مورد استفاده قرار داد، که یک تابع درجه چهار است.

رابطه به دست آمده با روش سطح پاسخ برای پیش بینی وزن مخصوص خشک به صورت رابطه (۸) است. ضرایب هر یک از متغیرها نشان دهنده میزان اثرگذاری آن ها بر وزن مخصوص خشک است.

$$\begin{aligned}
 DD = & (3.57015) - (0.041092 \times \text{IOMT}) + (0.062429 \times \text{cement}) - (0.62428 \times \text{MC}) \\
 & - (1.603 \times 10^{-3} \times \text{IOMT} \times \text{cement}) + (0.011977 \times \text{IOMT} \times \text{MC}) - (7.4822 \times 10^{-3} \times \text{cement} \times \text{MC}) \\
 & + (3.3729 \times 10^{-4} \times \text{IOMT}^2) - (8.9982 \times 10^{-4} \times \text{cement}^2) + (0.0770 \times \text{MC}^2) \\
 & + (1.0594 \times 10^{-4} \times \text{IOMT} \times \text{cement} \times \text{MC}) + (9.6743 \times \text{IOMT}^2 \times \text{cement}) - (5.8715 \times 10^{-5} \times \text{IOMT}^2 \times \text{MC}) \\
 & + (8.2964 \times 10^{-5} \times \text{IOMT} \times \text{cement}^2) - (9.2182 \times 10^{-4} \times \text{IOMT} \times \text{MC}^2) + (1.4282 \times 10^{-4} \times \text{cement}^2 \times \text{MC}) \\
 & + (1.9541 \times 10^{-4} \times \text{cement} \times \text{MC}^2) - 6.1523 \times 10^{-7} \times \text{IOMT}^3 - (5.4116 \times 10^{-5} \times \text{cement}^3) \\
 & - (3.8087 \times 10^{-3} \times \text{MC}^3) + (2.3805 \times 10^{-6} \times \text{IOMT}^2 \times \text{MC}^2) - 5.6133 \times 10^{-6} \times \text{IOMT} \times \text{cement}^2 \times \text{MC} \\
 & + (2.1167 \times 10^{-5} \times \text{IOMT} \times \text{MC}^3) + (6.4608 \times 10^{-5} \times \text{MC}^4)
 \end{aligned} \tag{۸}$$

۱- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (h_i - t_i)^2} \tag{۹}$$

در این تحقیق از روابط آماری زیر برای محاسبه دقت و عملکرد مدول توسعه داده شده استفاده گردید:

شده i امین وزن مخصوص خشک، t_i مقدار پیش‌بینی شده i امین وزن مخصوص خشک، \bar{h}_i میانگین h_i و \bar{t}_i میانگین t_i است. مقادیر کمتر $RMSE$ ، MAD و $MAPE$ ، نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل پیش‌بینی خواهند بود. در واقع برای یک مدل پیش‌بینی دقیق و بدون هیچ‌گونه خطا می‌توان مقادیر R^2 برابر با یک و $RMSE$ ، MAD و $MAPE$ برابر با صفر را انتظار داشت. عملکرد مدل ساخته‌شده به روش سطح پاسخ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مدل سطح پاسخ قادر به پیش‌بینی وزن مخصوص خشک با خطایی کمتر از ۲ درصد است. از طرفی با توجه به نتایج پارامترهای آماری ارائه‌شده در جدول ۹ می‌توان دید که مقدار ضریب رگرسیون حاصل از روش سطح پاسخ برابر با ۰/۹۶۳۴ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل ارائه‌شده است.

۲- ضریب رگرسیون (R^2):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^M (t_i - \bar{t}_i)^2}} \right]^2 \quad (10)$$

۳- متوسط انحراف مطلق (MAD):

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{M} \quad (11)$$

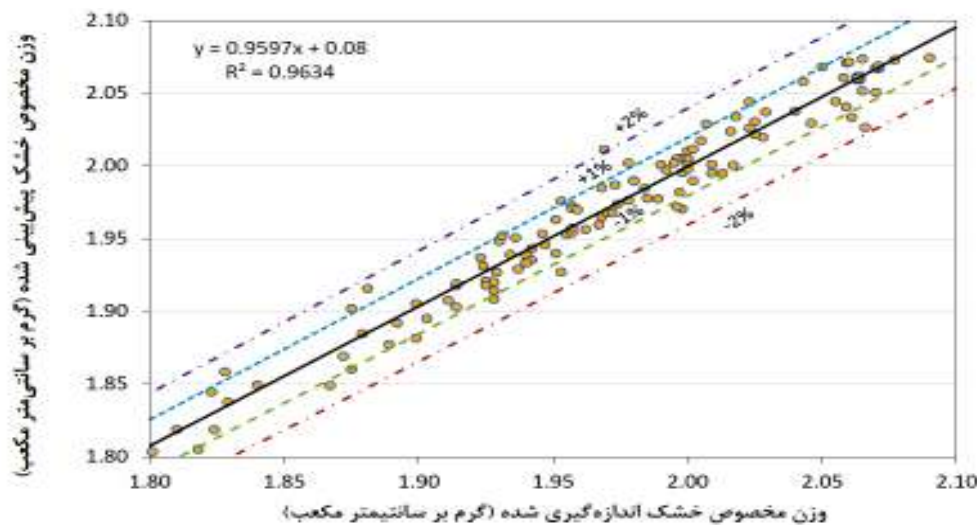
۴- متوسط درصد خطای مطلق ($MAPE$):

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{\sum_{i=1}^M h_i} \times 100 \quad (12)$$

که M تعداد کل داده‌ها در هر مجموعه، h_i مقدار اندازه‌گیری

جدول ۹. دقت مدل ساخته‌شده به وسیله روش سطح پاسخ (RSM)

مدل	R^2	RMSE	MAD	MAPE
RSM درجه چهار	۰/۹۶۳۴	۰/۰۱۳۵۱	۰/۱۰۶۳	۰/۵۳۸۹

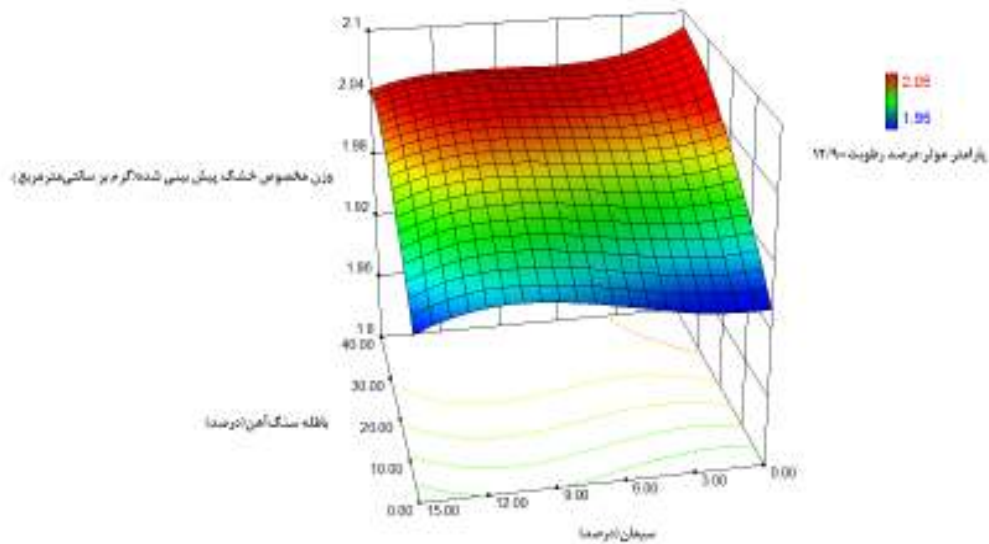


شکل ۳. عملکرد مدل ساخته‌شده به وسیله روش سطح پاسخ (RSM)

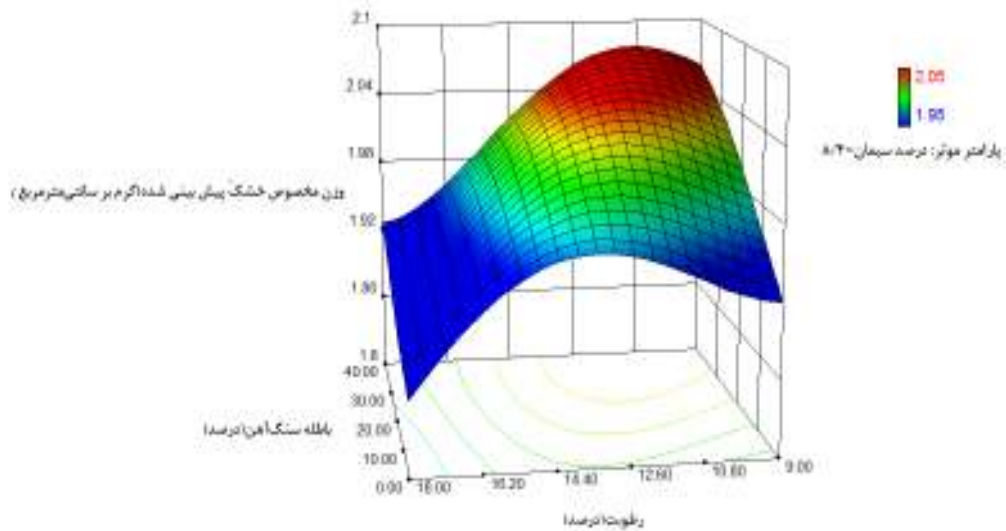
۲-۵- تحلیل پارامتریک

درصدهای مختلف باطله سنگ آهن متفاوت است با این وجود ملاحظه می‌شود که درصد سیمان تأثیر چندانی بر وزن مخصوص خشک ندارد. همچنین با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که با افزایش میزان رطوبت در همه درصدهای باطله مقدار وزن مخصوص خشک تا مقداری مشخص افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این افزایش وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی در درصدهای بالاتر باطله بیشتر بوده است. همچنین می‌توان دید که در یک درصد رطوبت مشخص، با افزایش درصد باطله وزن مخصوص خشک افزایش یافته است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد رطوبت در همه درصدهای سیمان، وزن مخصوص خشک افزایش یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود که درصد سیمان در رطوبت‌های مختلف تأثیر چندانی بر وزن مخصوص خشک ندارد.

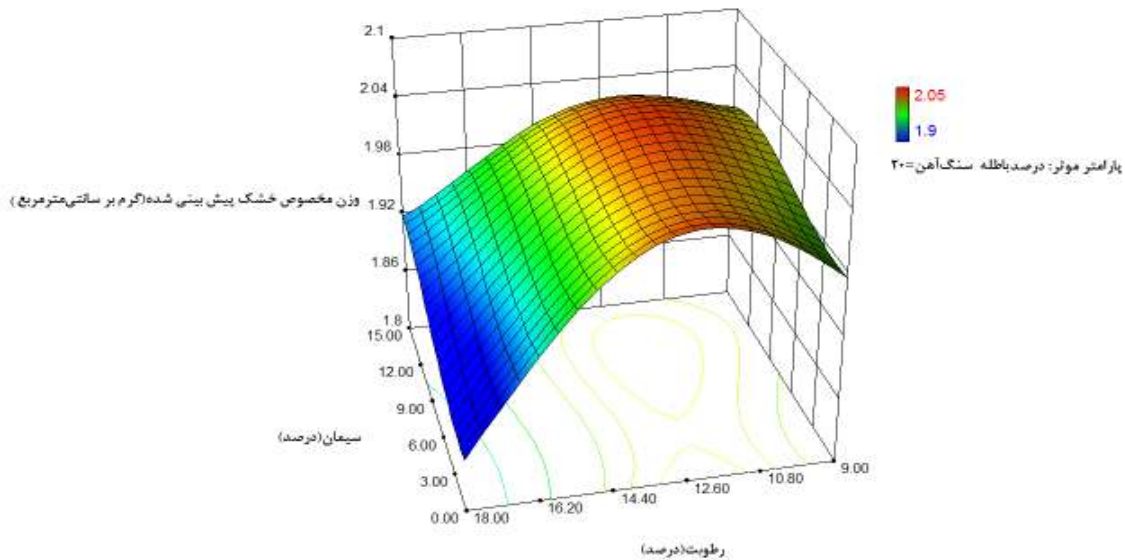
یکی از مزیت‌های روش سطح پاسخ (RSM)، این است که می‌توان تأثیرات برهم‌کنش متغیرهای مختلف را بر میزان خروجی مدل بررسی نمود. در این تحقیق مدل نهایی به دست آمده، شامل برهم‌کنش درصد سیمان و درصد باطله سنگ آهن، برهم‌کنش درصد سیمان و درصد رطوبت و برهم‌کنش درصد باطله و درصد رطوبت بر وزن مخصوص خشک خاک متراکم شده است. جهت انجام تحلیل پارامتریک یکی از متغیرها با عنوان پارامتر مؤثر برابر با مقدار میانگین آن در نظر گرفته شد و سپس با تغییر دو پارامتر دیگر نمودارهای سه بعدی که بعد سوم آن‌ها وزن مخصوص پیش‌بینی شده بود، ترسیم شدند. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، مقدار وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی با افزایش درصد باطله سنگ آهن افزایش یافته است. تأثیر درصد سیمان بر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی



شکل ۴. تأثیر تغییرات دو پارامتر درصد سیمان و درصد باطله سنگ آهن بر وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت شده



شکل ۵. تأثیر تغییرات دو پارامتر درصد باطله سنگ آهن و درصد رطوبت بر وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت شده



شکل ۶. تأثیر تغییرات دو پارامتر درصد سیمان و درصد رطوبت بر وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت شده

(معادله ۸) فراهم می نمود. با استفاده از این برنامه، درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به ازاء تغییرات درصد سیمان از ۲ تا ۱۵ درصد و تغییرات درصد باطله از ۰ تا ۴۰ درصد به دست آمد و نمودارهایی جهت پیش بینی درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک با توجه به درصد سیمان و درصد باطله ترسیم گردید. این نمودارها در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده اند.

۶. تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص

خشک حداکثر با توجه به درصد سیمان و باطله

به منظور کاربردی تر شدن نتایج این تحقیق برنامه ای در محیط MATLAB توسعه داده شده که امکان تعیین رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص را با توجه به درصد سیمان و درصد باطله مشخص بر اساس معادله سطح پاسخ

درجه چهار نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. این مدل علاوه بر مقدار P کم ($<0/0001$)، مقدار ضریب رگرسیون قابل قبولی ($R^2=0.9634$) دارد.

۲- مدل به دست آمده نشان داد که علاوه بر تمامی متغیرهای اولیه، برهم‌کنش میان مجذور، مکعب و توان چهارم در پیش‌بینی وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی تأثیرگذار است.

۳- مقدار R^2 پیش‌بینی شده ($0/9416$) نشان‌دهنده سازگاری منطقی آن با مقدار R^2 تعدیل یافته ($0/9551$) با توجه به تفاوت کمتر از $0/02$ میان آن‌ها بود.

۴- ارزیابی دقت مدل توسعه داده شده نشان داد که این مدل با خطایی کمتر از ۲ درصد امکان پیش‌بینی وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت‌شده با سیمان و باطله سنگ‌آهن را فراهم می‌سازد.

۵- تحلیل پارامتریک نشان داد که افزایش درصد باطله سبب افزایش وزن مخصوص خشک می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش سیمان تأثیر معنی‌داری بر وزن مخصوص خشک ندارد و نسبت به درصد باطله تغییر چندانی در وزن مخصوص خشک ایجاد نمی‌کند.

۶- نمودارهای توسعه داده شده در این تحقیق می‌توانند به منظور پیش‌بینی درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی بدون نیاز به انجام آزمایش تراکم مورد استفاده قرار گیرند.

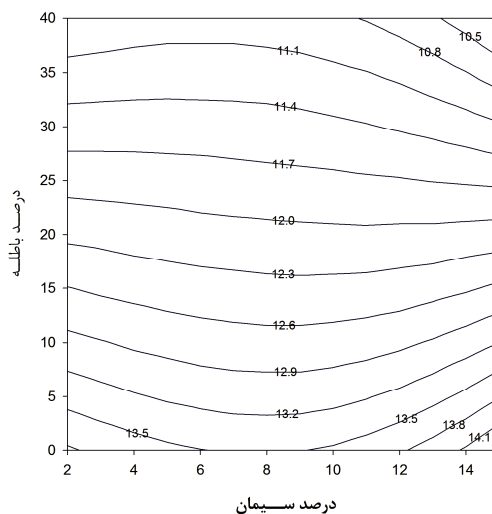
۸- مراجع

-افتخاریان، ل.، تی تی دژ، الف.، خاکباز، ب.، سارنگ، ا.، صادقیان، پ.، مهین روستا، ر.، نواری، م. (۱۳۹۳) "آزمایشگاه مکانیک خاک"، انتشارات نشر کتاب دانشگاهی، چاپ پنجم.

-قاسمی، م.، نظام‌آبادی، الف.، (۱۳۹۵)، "بررسی تأثیر ضایعات معادن سنگ‌آهن بر مقاومت فشاری شفته‌آهک"، سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۲۶ شهریورماه، تهران، ایران.

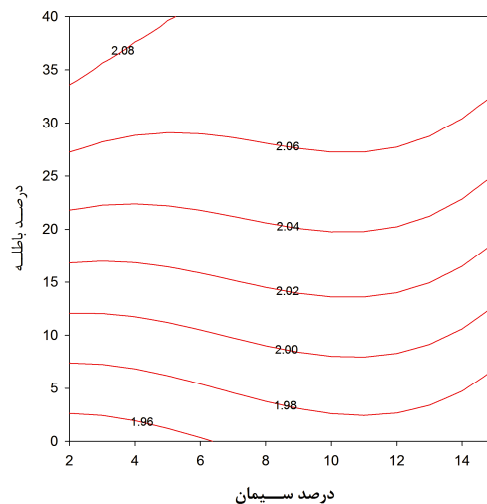
-قاسمی، م.، نظام‌آبادی، ب.، (۱۳۹۵)، "بررسی تأثیر ضایعات معدن سنگ‌آهن بر مقاومت ملات ماسه سیمان"، سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی

با استفاده از این نمودارها می‌توان بدون انجام آزمایش تراکم، درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص بستر رسی تثبیت‌شده با باطله سنگ‌آهن و سیمان را پیش‌بینی نمود.



شکل ۷. نمودار تعیین درصد رطوبت بهینه با توجه به

درصد سیمان و درصد باطله.



شکل ۸. نمودار تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک با توجه به

درصد سیمان و درصد باطله

۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر قابل بیان است:

۱- توسعه مدل سطح پاسخ با استفاده از سه تابع درجه چهار، درجه سه و درجه دو به منظور پیش‌بینی وزن مخصوص خشک بستر رسی تثبیت‌شده با سیمان و باطله سنگ‌آهن انجام شد. دقت مدل مبتنی بر تابع

- Li, H., (2014) "Experimental Research on Performance of Road Base with Cement Stabilized Iron Tailings Sand", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 513-517, pp. 60-64.
- Kolay, E., Baser, T. (2014) "Estimating of the Dry Unit Weight of Compacted Soils Using General Linear Model and Multi-layer Perceptron Neural Networks", *Applied Soft Computing*, Vol. 18, pp. 223-231.
- Kuranchie, F. A. (2015) "Characterisation and applications of iron ore tailings in building and construction projects", Ph.D. thesis, Cowan University, Australia.
- Li, H., (2014) "Experimental Research on Performance of Road Base with Cement Stabilized Iron Tailings Sand", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 513-517, pp. 60-64.
- Myers Raymond H., Montgomery, D. C., (2002) "Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiment", A Wiley-Interscience Publication.
- Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., & Etim, R. K. (2017), "Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture", *Transportation Geotechnics*, Vol. 10, pp. 85-95.
- Sinha, K. S., Wang, M. C., (2007) "Artificial Neural Network Prediction Models for Soil Compaction and Permeability", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 47-64.
- Xu, S., (2013) "Research on Application of Iron Tailings on Road Base", *Advanced Materials Research*, Vol. 743, pp. 54-57.
- عمران، معماری و مدیریت شهری، ۲۶ شهریورماه، تهران، ایران.
- "دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی"، (۱۳۹۰)، "نشریه شماره ۲۳۴: آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". تجدیدنظر دوم.
- Ardakani, A., Kordnaeij, A. (2017) "Soil compaction parameters prediction using GMDH-type neural network and genetic algorithm", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-14.
- ASTM. (2015). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", D1557-12, West Conshohocken, PA.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S., (2005) "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 6, pp. 448-453.
- Bastos, C, A, L., Silva, C., G., Mendes, C., J., Peixoto, F, A, R. (2016) "Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 10.
- Eslami, A., Mola-Abasi, H., shourijeh, P, T. (2013) "Shear Wave Velocity by Polynomial Neural Networks and Genetic Algorithms Based on Geotechnical Soil Properties", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 829-838.
- Gunaydin, O., (2008) "Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks", *Environmental Geology*, 57:203.