

بررسی تاثیر مشخصه‌های فنی مصالح سنگی بر میزان تراکم لایه‌ی اساس به روش سطح پاسخ

علمی - پژوهشی

میلاذ راستی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری*، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مجتبی رجیبی بهاء‌آبادی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۱۶۴-۱۴۷

چکیده

یکی از اساسی‌ترین مسائل در راه‌سازی، رساندن میزان دانسیته و مقاومت لایه‌های مصالح سنگی به میزان مطلوب است؛ چراکه این لایه‌ها نباید در اثر تنش‌های وارده ناشی از عبور بار تغییر شکل دهند و باید توانایی تحمل و انتقال بار از لایه‌های بالاتر به پایین‌تر را داشته باشند. برای این منظور باید لایه‌های مختلف روسازی را تا حد قابل‌قبولی به وسیله غلتک‌ها متراکم نمود. از طرف دیگر عملکرد قشر سنگدانه‌ای روسازی که به شدت مؤثر بر عملکرد کل روسازی است، تحت تأثیر میزان تراکم آن‌هاست. از این رو، بررسی عوامل مؤثر بر میزان تراکم قشر سنگدانه‌ای روسازی از جمله اساس بسیار حائز اهمیت است؛ بدین جهت، این پژوهش با بررسی تأثیر مشخصات مصالح لایه اساس بر میزان تراکم آن به کمک روش سطح پاسخ انجام شده است. بدین منظور خصوصیات مصالح سنگی مؤثر بر تراکم شامل پارامترهای درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بی‌بینه، ضخامت لایه‌ی اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح از شیت‌های آزمایشگاهی مربوط به پروژه‌های دهقان، کوهپایه و شهرکرد استخراج شد و با نرم‌افزار *Design Expert* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که میزان تراکم لایه اساس با دانسیته خشک آزمایشگاهی، ضخامت لایه، حداکثر دما، دامنه خمیری و تمیزی رابطه عکس و با حداقل دما، ضریب یکنواختی رابطه مستقیم دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد رطوبت تا حدی باعث افزایش میزان تراکم می‌شود. علاوه بر این، با کمک این نرم‌افزار رابطه میان پارامترهای مختلف با میزان تراکم تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: تراکم، خصوصیات مصالح، روش سطح پاسخ، لایه‌ی اساس، عملکرد روسازی

۱-مقدمه

کیفیت آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Penkov et al., 2019). ساختار روسازی راه متشکل از چندین لایه است که شامل خاک بستر، لایه زیراساس، اساس و رویه است. عملکرد هر یک از این لایه‌ها، از جمله لایه اساس، تأثیر بسزای در عملکرد کلی ساختار روسازی دارد. مصالح شنی یا سنگی

امروزه راه‌ها به‌عنوان رگ‌های شریانی کشورها شناخته می‌شوند؛ چراکه رشد اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و غیره بدون وجود راه‌ها ممکن نخواهد بود (Khabiri & Fard, 2021) و این در حالی است که امروزه با افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش نیاز به حمل‌ونقل، اهمیت راه‌ها و همچنین

الاستیسیته تأثیر چشمگیری بر کاهش میزان تنش‌های حاصل از بارگذاری و عملکرد روسازی دارد (حیدری فیروزآبادی و خبیری، ۱۳۹۶). عاملی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی نظیر مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن پرداختند. بر اساس نتایج مطالعه عاملی و همکاران، جایگزینی مصالح بازیافتی در بتن غلتکی باعث کاهش درصد جذب آب و حداکثر چگالی بتن و در نتیجه باعث افزایش کارایی و تراکم بتن غلتکی می‌گردد. همچنین، طبق نتایج مطالعه مذکور، استفاده از آسفالت بازیافتی به اندازه بهینه باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی و در نهایت باعث بهبود عملکرد بتن غلتکی می‌شود (عاملی و همکاران، ۱۳۹۷). از آنجاکه دانه‌بندی مصالح سنگی یکی از ویژگی‌های بسیار مهم ترکیب سنگ‌دانه‌های آسفالت است، برخی از محققین نیز تأثیر دانه‌بندی مصالح سنگی بر عملکرد آسفالت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که دانه‌بندی سنگ‌دانه به‌طور قابل توجهی تقریباً بر تمام عملکردهای روسازی تأثیر می‌گذارد؛ از این رو، در روش طراحی مبتنی بر عملکرد برای مخلوط آسفالت باید توجه بیشتری به دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها شود (Fang et al., 2019). در مطالعه‌ای، نیز اثر پاسخ در برابر بارگذاری و مشخصات مکانیکی مصالح اساس بر عملکرد خستگی روسازی بلوکی بتنی را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که تأثیر مدول الاستیسیته لایه اساس تثبیت‌شده باسیمان، در تعداد تکرار بارگذاری مجاز کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین، اصلاح مشخصات فنی این لایه متأثر از ضخامت و مقاومت فشاری این لایه است. همچنین نتایج مطالعه پیشگفته نشان داد که تغییرات دمایی در لایه اساس تثبیت‌شده با قیر، تأثیر زیادی در کرنش‌های کششی کوچک دارد؛ لذا، مشخصات اساس می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد روسازی داشته باشد (خبیری و بلوچ سیرگانی، ۱۳۹۸). در پژوهشی دیگر با اشاره به اینکه بررسی تأثیرات مشخصات مختلف اساس بر عملکرد روسازی از زمانی که انواع مختلفی از لایه‌های اساس (اساس سنگ‌دانه‌ای، اساس قیری و اساس تثبیت‌شده باسیمان و غیره) در ساختار روسازی استفاده می‌شود، ضروری است؛ به بررسی ویژگی‌های لایه‌ی اساس برای طراحی مکانیکی-تجربی روسازی پرداخته‌اند. آن‌ها با بررسی مدول برجهندگی، نوع مصالح، ضخامت اساس، دانه‌بندی سنگ‌دانه و رطوبت یافتند

شکسته با مشخصات معین که بر روی قشر زیراساس یا بستر روسازی راه پخش شده و با رطوبت مناسب کوبیده شوند، قشر اساس نامیده می‌شود (Su et al., 2017; Van Niekerk et al., 2002).

عملکرد لایه‌های تشکیل‌دهنده روسازی به شدت بر عملکرد روسازی موثر بوده و وابسته به خصوصیات مصالح سازنده آن است (Hu et al., 2018; Thai et al., 2021). از این رو، مطالعات متعددی در خصوص تأثیر خصوصیات مصالح بر عملکرد لایه‌های تشکیل‌دهنده روسازی انجام گرفته است. ولی زاده و کمرودی (۱۳۹۴) با بیان اینکه لایه اساس روسازی‌های انعطاف‌پذیر نقش سازه‌ای مهمی در عملکرد کلی ساختار روسازی ایفا می‌کنند و ضریب نفوذپذیری یکی از مهم‌ترین خصوصیت لایه اساس است، به ارزیابی تأثیر ویژگی‌های مصالح سنگی تثبیت‌نشده بر ضریب نفوذپذیری لایه اساس پرداختند. در این پژوهش به منظور تعیین ضریب نفوذپذیری لایه اساس از آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت استفاده شد و بر اساس آن، اثر عوامل مختلف از جمله مقدار دامنه خمیری و گردگوشگی مصالح بر ضریب نفوذپذیری بررسی شد. همچنین در مطالعه مذکور، آزمایش نفوذپذیری برای مصالح با درصد ریزدانه و دامنه خمیری مختلف و شن و ماسه با گردگوشگی متفاوت انجام گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که با افزایش دامنه خمیری مصالح ریزدانه، ضریب نفوذپذیری مصالح سنگی کاهش می‌یابد و با افزایش میزان گردگوشگی شن و ماسه به اندازه‌ی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪، ضریب نفوذپذیری مصالح سنگی افزایش می‌یابد (ولی زاده و کمرودی، ۱۳۹۴). همچنین، محققین دیگر در مطالعه‌ای بایان اینکه شن و ماسه پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی و راه‌سازی‌اند و حدود ۹۵ درصد آسفالت را شن و ماسه تشکیل می‌دهد، به مقایسه تأثیر دانه‌بندی و مشخصه‌های فیزیکی مصالح سنگی بر کیفیت لایه‌های روسازی پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که دو عامل دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی مصالح سنگی از مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها بر عملکرد روسازی است (سیدی مرغکی و همکاران، ۱۳۹۵).

علاوه بر پژوهش‌های فوق، محققین دیگری، به مطالعه تأثیر تغییر مشخصات تراکم خاک بستر و اصطکاک بین لایه‌ای بر عکس‌العمل روسازی به روش عددی پرداختند. طبق نتایج این مطالعه، ویژگی‌های لایه‌ی خاک بستر از جمله مدول

بررسی تأثیر خصوصیات مصالح لایه اساس بر میزان تراکم لایه اساس می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

همانطور که اشاره شد، هدف این پژوهش بررسی تأثیر خصوصیات مصالح لایه اساس بر میزان تراکم آن است؛ بدین منظور در این مطالعه ابتدا پارامترهای مؤثر بر تراکم با توجه به پژوهش‌های پیشین تعیین شد و سپس این پارامترها از شیت‌های آزمایشگاهی سه پروژه استخراج گردید. پارامترهای مذکور با کمک روش سطح پاسخ در محیط نرم افزار DESIGN EXPERT مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه در این بخش، ابتدا، روش سطح پاسخ به صورت خلاصه تشریح می‌شود. سپس، متغیرهای مؤثر بر تراکم لایه اساس که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند تبیین می‌شوند. در نهایت، ضمن تشریح داده‌های مورد استفاده در مطالعه، تحلیل داده‌ها در نرم افزار تشریح می‌شود.

۲-۱- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه‌ی بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند. این روش در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد تا به امروز نیز از آن به‌عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌گردد (غفوری‌فرد، ۱۴۰۰). هرچند بسیاری این روش را به‌عنوان یک شبه مدل می‌دانند، مطالعاتی نظیر مطالعه کرمی و همکاران روش سطح پاسخ را به‌عنوان یک روش قابل قبول در مقایسه با روش‌های سنتی مدل‌سازی نشان داده است (Karami et al., 2016).

۲-۲- تعیین پارامترهای مؤثر در تراکم لایه اساس

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، قشر اساس دومین قشر از روسازی راه است که با مشخصات و ضخامت معین روی قشر زیراساس اجرا می‌شود و یکی از مهم‌ترین مشخصات آن، میزان تراکم آن است. از طرفی میزان تراکم این لایه به عوامل متعددی وابسته است که در این پژوهش بر اساس پژوهش‌های پیشین، پارامترهای مؤثر در تراکم لایه اساس به شرح زیر در نظر گرفته شد (Su et al., 2020.; Rahman et al., 2020.;

2017; Thai et al., 2021;

که تمامی خصوصیات اساس بر عملکرد روسازی مؤثر است و عملکرد روسازی نسبت به تغییرات مدول برجهندگی و میزان رطوبت حساس‌تر است (Su et al., 2017). در پژوهشی دیگر با بیان اینکه رفتار مصالح لایه اساس به سبب خاصیت الاستوپلاستیکی در کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت متفاوت است، تأثیر تراکم، رطوبت و ضخامت را بر رفتار لایه اساس مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از آزمایش افت‌وخیز سنج ضربه‌ای قابل حمل (LWD) که معمولاً به‌منظور تعیین قدرت باربری لایه‌های غیرچسبیده روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای بررسی اثر این سه پارامتر بر عملکرد اساس استفاده کردند. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که با افزایش تراکم به میزان ۱۰ درصد و همچنین افزایش ضخامت لایه اساس به اندازه ۲۰ سانتیمتر به میزان قابل توجهی مدول سطحی لایه افزایش و میزان افت‌وخیز آن کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، نتایج پژوهش مذکور نشان داد که تغییرات رطوبت لایه تأثیر چندانی بر مدول و افت‌وخیز لایه اساس ندارد (احدی و همکاران، ۱۳۹۸). محققین همچنین، به بررسی تأثیر مشخصات سنگدانه بر عملکرد سایش سطحی روسازی بتن غلتکی پرداختند و با مقایسه استفاده از سنگدانه‌های سخت، دانه‌بندی و طرح اختلاط متفاوت در بتن، دریافتند که عواملی همچون نوع و جنس کانی‌ها و عناصر تشکیل‌دهنده مصالح سنگی تأثیر بسزایی بر مقاومت سایشی بتن غلتکی دارد (فتاحی و همکاران، ۴۰۰). گو و همکاران (۲۰۲۱) نیز تأثیر به‌کارگیری سنگدانه سرباره فولادی بر عملکرد اساس را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که سرباره فولاد بافت سطحی بهتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارد. همچنین خواص فیزیکی از جمله تراکم، مسطح بودن و مقاومت فشاری بهتری را نسبت به سنگدانه معمولی داراست و باعث بهبود عملکرد اساس می‌گردد (Gao et al., 2021). همان‌طور که اشاره شد، تاکنون مطالعات متعددی در خصوص تأثیر مشخصات مصالح لایه اساس بر عملکرد آن انجام شده است؛ اما هیچ‌کدام آن‌ها به‌صورت جامع به بررسی تأثیر خصوصیات مصالح لایه اساس بر میزان تراکم نپرداختند. از آنجاکه عملکرد قشر سنگدانه‌ای روسازی به شدت تحت تأثیر قفل و بست بین سنگدانه‌هاست؛ بنابراین عملیات تراکم در راه‌سازی بسیار حائز اهمیت است (Van Niekerk et al., 2000). از این‌رو، این مطالعه به

-شاخص خمیری (PI): شاخصی است که بیانگر میزان این شاخص بیانگر محدوده‌ای از محتوای آب را نمایش می‌دهد که خاک خاصیت خمیری خود را حفظ می‌کند.

-تمیزی مصالح (SE): این پارامتر بر اساس آزمایش هم‌ارز ماسه‌ای تعیین می‌شود.

-ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح (Cu): ضریب یکنواختی به صورت نسبت D_{60} به D_{10} تعریف می‌شود.

۲-۳- استخراج داده‌ها از شیت‌های آزمایشگاهی

پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر میزان تراکم لایه اساس، داده‌های مربوطه از شیت‌های آزمایشگاهی مربوط به سه پروژه‌ی دهقان، کوهپایه، شهرکرد استخراج شد که تعداد داده‌های حاصله برای هر پارامتر ۲۳۷ عدد بود. علت انتخاب این پروژه‌ها متفاوت بودن شرایط آب و هوایی و فنی برای در نظر گرفتن شرایط مختلف بوده است. جدول ۱ و شکل ۱ به ترتیب مشخصات پروژه‌ها و محل آن‌ها را نشان می‌دهد.

-درصد رطوبت (M): میزان رطوبتی که به صورت طبیعی در مصالح اساس در محل پروژه وجود دارد.

-دانشیته خشک (D): دانشیته مصالح هنگامی که رطوبتی در آن وجود ندارد.

-درصد رطوبت بهینه (O): مقدار آبی است که به ازای آن، خاک در اثر وارد آمدن انرژی، تراکم بیشتری پیدا خواهد نمود؛ به عبارتی دیگر، خاک در درصد رطوبت بهینه بیشترین وزن مخصوص خشک را دارد.

-ضخامت (T): ضخامت لایه اساس که در مرحله طراحی روسازی تعیین می‌شود.

-بیشینه دمای محیط (T_{Max}): بیشترین دما محیط احداث پروژه در طول سال.

-کمینه دمای محیط (T_{Min}): کمترین دما محیط احداث پروژه در طول سال.

جدول ۱. مشخصات پروژه‌های مورد بررسی

| نام پروژه | پروژه سایت خدماتی و قسمتی از شهرک صنعتی دهقان | پروژه عملیات اساس و آسفالت قسمتی از معابر شهرک صنعتی کوهپایه | پروژه تهیه مصالح و اجرای جاده ورودی شهرک صنعتی شهرکرد |
|--|---|--|---|
| کارفرما | شرکت شهرک‌های صنعتی استان اصفهان | شرکت شهرک‌های صنعتی استان اصفهان | شرکت شهرک‌های صنعتی استان چهارمحال و بختیاری |
| مشاور: | شرکت مهندسين مشاور جامع کار سپاهان | شرکت مهندسين مشاور جامع کار سپاهان | دستگاه نظارت شرکت شهرک‌های استان چهارمحال و بختیاری |
| پیمانکار | شرکت مهندسی رهاب گستر پردیس | شرکت مهندسی رهاب گستر پردیس | شرکت مهندسی رهاب گستر پردیس |
| مبلغ پیمان (ریال) | ۲۸۹،۴۸۹،۴۳۹،۳۰ | ۲۹،۹۵۸،۳۲۰،۲۶۳ | ۵۶،۸۶۸،۳۳۱،۴۶۳ |
| مدت پیمان (ماه) | ۷ | ۹ | ۱۲ |
| تاریخ شروع کار | ۱۳۹۹/۷/۲۰ | ۱۳۹۸/۱۰/۲۴ | ۱۳۹۹/۷/۲۹ |
| مقدار مصالح اساس کارشده در پروژه (مترمکعب) | ۴،۹۹۴ | ۶،۴۸۴ | ۱۲،۶۷۳ |



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱. الف- پروژه سایت خدماتی و قسمتی از شهرک صنعتی دهقان ب- پروژه عملیات اساس و آسفالت قسمتی از معابر شهرک صنعتی کوهپایه ج- پروژه تهیه مصالح و اجرای جاده ورودی شهرک صنعتی شهرکرد

از این رو در این بخش به بررسی تأثیر یک‌به‌یک این پارامترها بر میزان تراکم پرداخته می‌شود.

۱-۳- توصیف آماری متغیرها

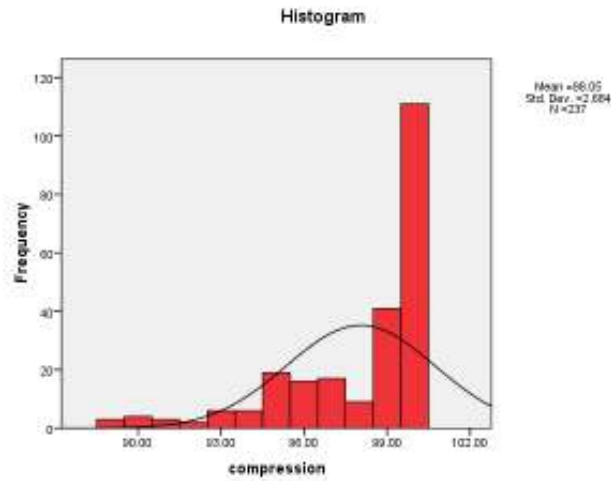
در این پژوهش به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها و توصیف آماری متغیرهای مورد استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شد. در شکل ۲ نمودار توزیع فراوانی این پارامتر ترسیم شده است، به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد که فراوانی دسته ۹۹ تا ۱۰۰ نسبت به سایر دسته‌ها بیشتر است. همچنین در جدول ۲ شاخص‌های آماری این پارامتر ارایه شده است. از آنجاکه تعداد داده‌های مورد بررسی بیش از ۳۰ داده است، بهتر است برای بررسی نرمال بودن داده‌ها، چولگی و کشیدگی داده‌ها بررسی گردد. در حالت کلی چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، -۲) نباشند داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند (Keller, 2015). باتوجه به جدول ۲ مقدار چولگی و کشیدگی برای میزان تراکم لایه اساس به ترتیب برابر است با ۱,۰۵۰۱- و ۱,۰۶۵۱ که هر دو در بازه (۲، -۲) قرار دارند، پس این پارامتر دارای توزیع نرمال است.

۲-۴- تحلیل داده‌ها با نرم افزار DESIGN EXPERT

همانطور که اشاره شد، پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر میزان تراکم لایه‌ی اساس و استخراج داده‌ها از شیت‌های آزمایشگاهی، این داده‌ها برای تحلیل و بررسی وارد نرم‌افزارهای DESIGN EXPERT 10 شدند. لازم به ذکر است که در این نرم‌افزار، میزان تراکم به‌عنوان پارامتر وابسته و پارامترهای درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت، بیشینه و کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح به‌عنوان پارامترهای وابسته تعریف شدند.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، به‌منظور بررسی هرچه دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مختلف (پارامترهای درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه‌ی اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح) بر میزان تراکم لایه‌ی اساس، از نرم‌افزار DESIGN EXPERT استفاده گردید.



شکل ۲. نمودار توزیع فراوانی متغیر وابسته (میزان تراکم لایه اساس)

جدول ۲. شاخص‌های آماری متغیر وابسته (میزان تراکم)

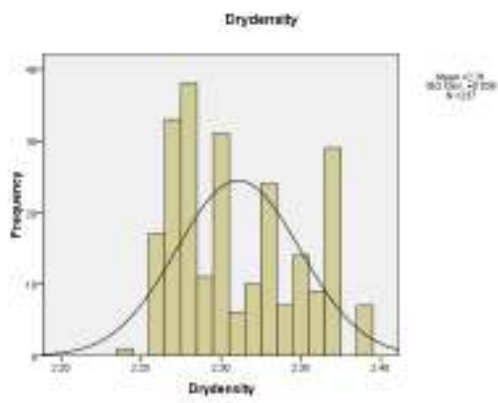
| | | | | |
|--------|--------|----------|---------------|---------|
| ۱۰۵۰۱- | چولگی | ۲۳۷ | تعداد داده‌ها | |
| ۱۰۶۵۱ | کشیدگی | ۹۸,۰۰۴۶۴ | میانگین | |
| ۸۹ | حداقل | ۹۹ | میانه | |
| ۱۰۰ | حداکثر | ۱۰۰ | مد | |
| ۹۶,۰۵ | ۲۵ | ۲,۶۸۴۳ | انحراف معیار | |
| ۹۹ | ۵۰ | | ۷,۲۰۵ | واریانس |
| ۱۰۰ | ۷۵ | | | |

در شکل ۳ می‌توان محدوده‌ای که بیشترین فراوانی داده‌ها در آن قرار دارد را یافت؛ به‌عنوان مثال با توجه به شکل ۳-الف می‌توان دریافت که بیشتر داده‌های درصد رطوبت بین ۱/۵ تا ۲ درصد است. با توجه به مقادیر چولگی و کشیدگی ارائه شده در جدول ۳، پارامترهای دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه‌ی اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح دارای توزیع نرمال هستند.

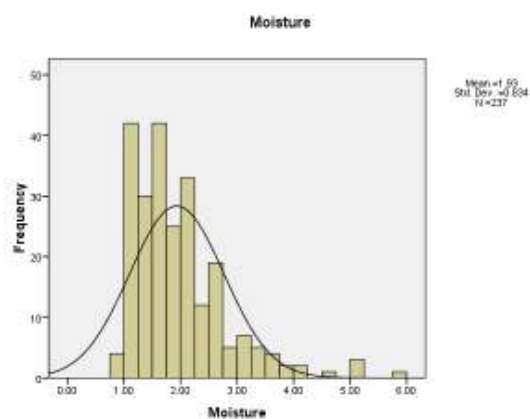
همانطور که اشاره شد، در این تحقیق پارامترهای درصد رطوبت، دانسیته خشک آزمایشگاهی، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح به‌عنوان پارامترهای مستقل و مؤثر بر میزان تراکم در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نمودار توزیع فراوانی این پارامترها ارائه شده است. در جدول ۳ نیز شاخص‌های آماری این پارامترها به نمایش گذاشته شده است. از نمودارهای ارائه شده

جدول ۳. شاخص‌های آماری متغیر مستقل

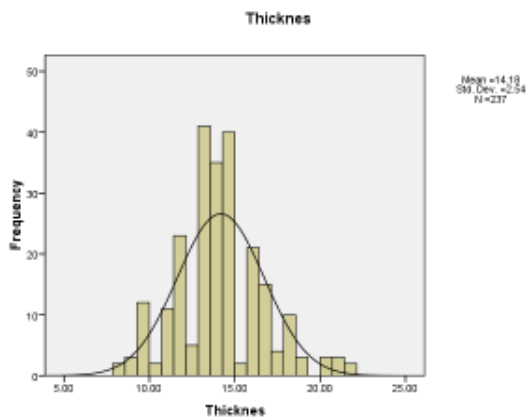
| M | D | O | T | T _{max} | T _{Min} | PI | SE | Cu | آماره/متغیر |
|---------|---------|---------|----------|------------------|------------------|--------|---------|----------|---------------|
| ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | ۲۳۷ | تعداد داده‌ها |
| ۱,۹۳۳۳ | ۲,۳۱۰۸ | ۴,۸۰۱۳ | ۱۴,۰۱۷۹۵ | ۳۰,۷۳۸۴ | ۹,۶۷۰۹ | ۰/۴۲۱۹ | ۴۴,۲۸۲۷ | ۷۵,۰۳۲۳۵ | میانگین |
| ۱,۰۸ | ۲,۳ | ۴,۷۶ | ۱۴ | ۳۵ | ۱۱ | ۰ | ۴۴ | ۷۴,۰۱۵ | میانه |
| ۱,۰۱ | ۲,۲۸ | ۵,۳ | ۱۴ | ۳۵ | -۷ | ۰ | ۴۴ | ۶۱,۰۸۶ | مد |
| ۰/۸۳۳۵۳ | ۰/۰۳۸۶۶ | ۰/۳۵۲۱۵ | ۲,۵۴۰۰۷ | ۹,۲۶۲۱۴ | ۸,۴۲۰۲ | ۱,۳۱۱۳ | ۹,۰۶۱۹۵ | ۲۰,۰۳۸۶ | انحراف معیار |
| ۰/۶۹۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۲۴ | ۶,۴۵۲ | ۸۵,۷۸۷ | ۷,۰۰۹ | ۱,۰۷۲ | ۸۲,۱۱۹ | ۴۰,۱۰۵۴۵ | واریانس |
| ۱,۶۵۹ | ۰/۴۲۱ | ۰/۰۸۶ | ۰/۳۷۴ | -۱,۰۲۰۸ | -۰/۷۰۲ | ۲,۹۳۵ | ۰/۹۵۷ | ۰/۹۰۳ | چولگی |
| ۳,۷۷۲ | -۱,۰۱۰۸ | -۰/۷۷۵ | ۰/۴۸۶ | -۰/۰۱۹ | -۰/۳۹۴ | ۷,۲۴۲ | ۰/۳۸۴ | ۰/۰۸۱ | کشدگی |
| ۰/۸ | ۲,۲۴ | ۴,۰۰۹ | ۸ | ۹ | -۷ | ۰ | ۳۱ | ۴۷,۰۵ | حداقل |
| ۵,۰۸ | ۲,۳۹ | ۵,۰۵۴ | ۲۲ | ۴۱ | ۲۲ | ۶ | ۶۸ | ۱۲۹,۰۷۶ | حداکثر |
| ۱,۰۳ | ۲,۲۸ | ۴,۰۵۶ | ۱۳ | ۲۹ | ۶ | ۰ | ۳۶ | ۵۹,۰۱۱ | ۲۵ |
| ۱,۰۸ | ۲,۳ | ۴,۰۷۶ | ۱۴ | ۳۵ | ۱۱ | ۰ | ۴۴ | ۷۴,۰۱۵ | ۵۰ |
| ۲,۰۳ | ۲,۳۴۵ | ۵,۰۰۳۵ | ۱۶ | ۳۶,۰۵ | ۱۵ | ۰ | ۴۷ | ۸۸,۰۶۷ | ۷۵ |



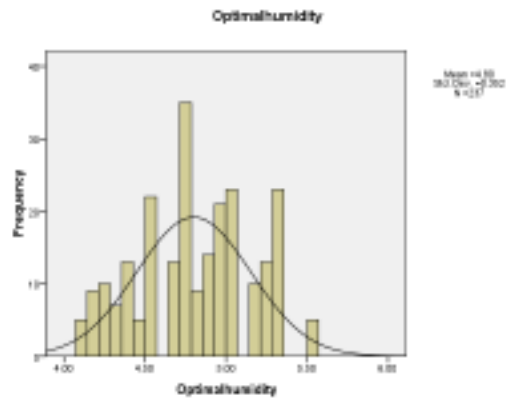
(ب)



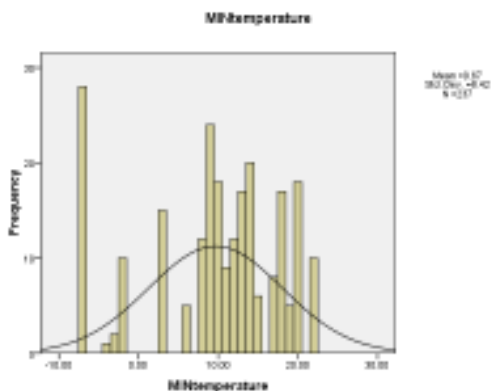
(الف)



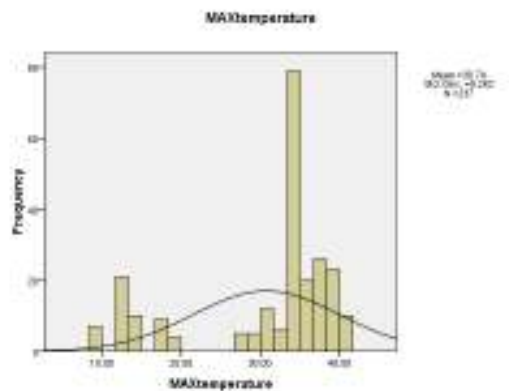
(د)



(ج)

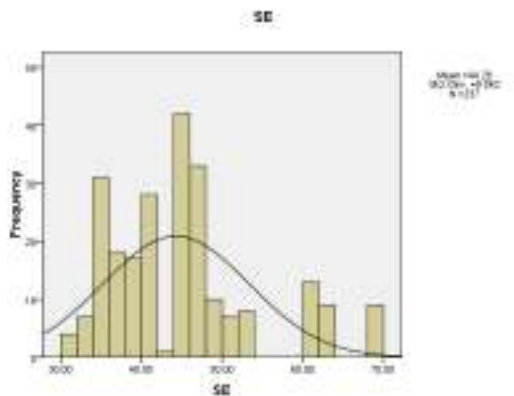


(و)

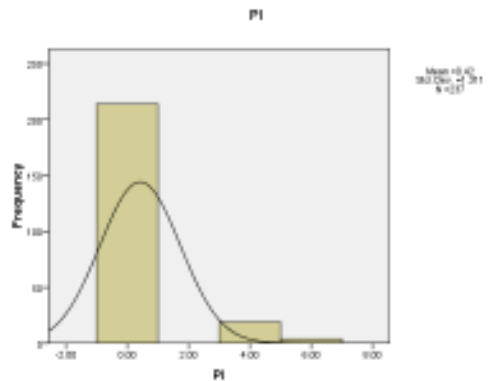


(ه)

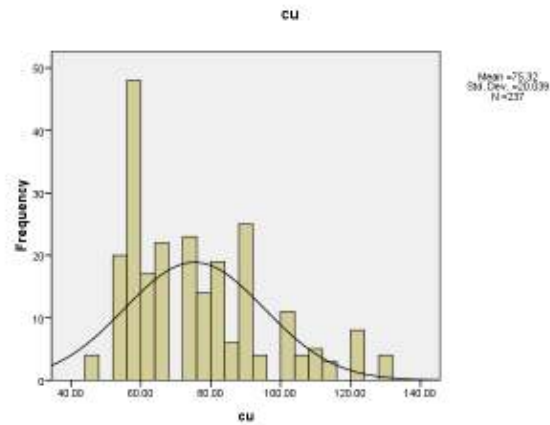
شکل ۳. نمودار توزیع فراوانی متغیرهای مستقل الف-درصد رطوبت ب-دانشیه خشک ج-درصد رطوبت بهینه د-ضخامت لایه ی اساس ه- ماکزیمم دمای هوا و-مینیمم دمای هوا



(و)



(ز)



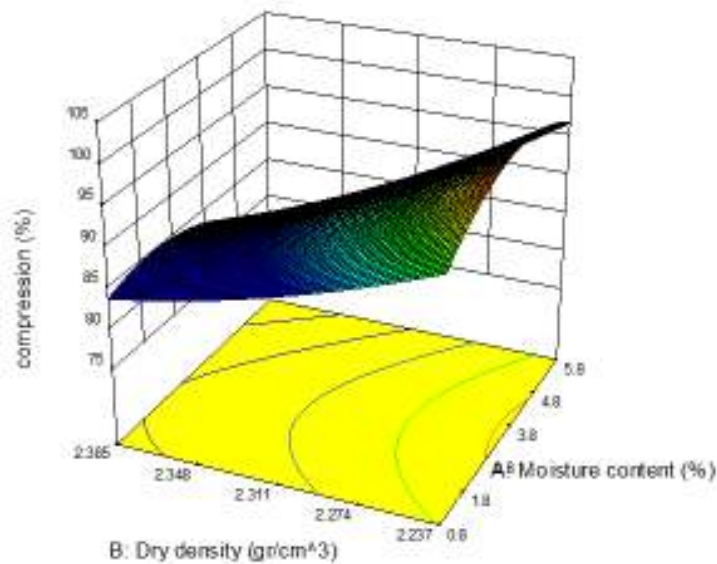
(ی)

ادامه شکل ۳. نمودار توزیع فراوانی متغیرهای مستقل ز-حد روانی ه-میزان تمیزی ی-ضریب یکنواختی

۲-۳- تأثیر درصد رطوبت و دانسیته خشک آزمایشگاهی مصالح بر میزان تراکم

دارد و اصطلاحاً آب باعث روغن‌کاری ذرات خاک می‌شود؛ اما در طرف مقابل اگر مقدار آب از یک میزان مشخص بیشتر شود، مقدار انرژی تراکم را مستهلک می‌کند. همچنین، آب فضای خالی مصالح را پر کرده و مانع تراکم بیشتر می‌شود؛ در واقع در این حالت آب یک نقش ممانعت‌کننده در برابر تراکم دارد (امیرافشاری، ۱۳۹۰).

در شکل ۲ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر درصد رطوبت مصالح و دانسیته خشک آزمایشگاهی بر میزان تراکم لایه‌ی اساس به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل ۴، افزایش درصد رطوبت تا حدی باعث افزایش میزان تراکم می‌شود. به‌طورکلی دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در رطوبت‌های کم، آب باعث می‌شود تا میزان اصطکاک بین ذرات خاک دانه‌ای کم شود؛ در واقع در این حالت آب نقش روان‌کننده



شکل ۴. نمودار تأثیر درصد رطوبت و دانسیته خشک آزمایشگاهی مصالح بر میزان تراکم

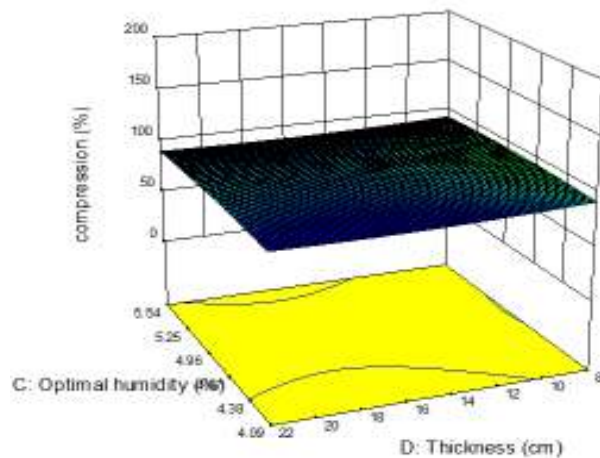
تقسیم دانسیته محل به دانسیته آزمایشگاهی است (امیرافشاری، ۱۳۹۰) و با افزایش دانسیته آزمایشگاهی، حاصل تقسیم دانسیته محل به دانسیته آزمایشگاهی، کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان تراکم کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۴ افزایش دانسیته خشک آزمایشگاهی باعث کاهش میزان تراکم می‌شود؛ در واقع دو پارامتر دانسیته خشک آزمایشگاهی و میزان تراکم رابطه عکس دارند. دلیل اینکه با افزایش دانسیته خشک آزمایشگاهی تراکم کاهش می‌یابد را اینگونه می‌توان بیان کرد که مبنای محاسبه میزان تراکم حاصل

۲-۳- تأثیر درصد رطوبت بهینه و میزان ضخامت لایه‌ی اساس بر میزان تراکم

از آنجاکه در این پژوهش مصالح دانه‌ای اساس مورد بررسی قرار گرفته و در واقع نوع خاک یکسان است، این پارامتر تأثیر چندانی بر میزان تراکم ندارد. علاوه بر این با توجه به شکل ۳ هرچه ضخامت لایه اساس بیشتر باشد، میزان تراکم کاهش می‌یابد؛ در واقع میزان تراکم خاک با ضخامت لایه رابطه عکس دارد و با صرف انرژی برابر، لایه‌های ضخیم کمتر متراکم می‌شوند. دلیل این مسئله نسبت پایین انرژی به وزن واحد در خاک‌های ضخیم است (شریفی و همکاران، ۱۳۸۹).

در شکل ۵ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر درصد رطوبت بهینه و میزان ضخامت لایه اساس بر میزان تراکم به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل ۵ با افزایش میزان رطوبت بهینه، تراکم افزایش می‌یابد؛ اگرچه تغییرات آن قابل توجه نیست. این پارامتر به‌نوعی نشان‌دهنده نوع خاک است؛ یعنی هرچه اندازه ذرات خاک بزرگ‌تر باشد، میزان رطوبت بهینه کمتر است و در مقابل هرچه این مقدار بیشتر باشد بیانگر آن است که مصالح ریزدانه و دامنه خمیری آن بیشتر است (امیرافشاری، ۱۳۹۰).

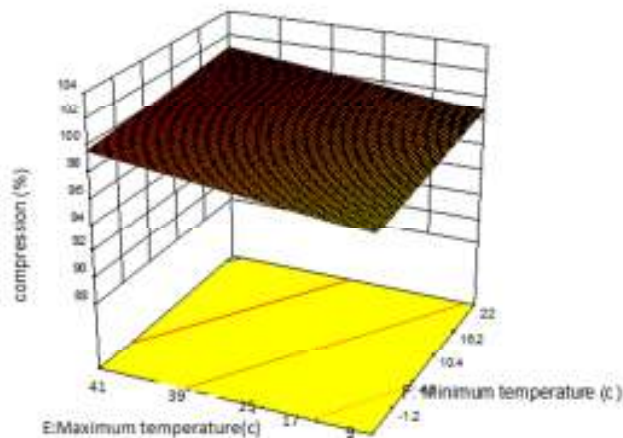


شکل ۵. نمودار تأثیر درصد رطوبت بهینه و میزان ضخامت لایه‌ی اساس بر میزان تراکم

۳-۳- تأثیر میزان ماکزیمم و مینیمم دمای هوا بر میزان تراکم

حداقل دمای هوا، کاهش دما به زیر صفر موجب یخزدگی لایه و با توجه به افزایش حجم آب درون لایه موجب کاهش دانسیته می‌گردد و در خصوص حداکثر دما، افزایش دما موجب خشک شدن زودتر از موعد لایه و از دست دادن رطوبت (اختلاف بین رطوبت لایه و رطوبت بهینه) می‌گردد که این امر موجب کاهش دانسیته می‌گردد.

در شکل ۶ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر ماکزیمم و مینیمم دمای هوا بر میزان تراکم به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، نوع آب‌وهوای منطقه که معمولاً با ماکزیمم و مینیمم دمای هوای آن منطقه بیان می‌شود، تأثیر بسزایی در میزان تراکم لایه اساس دارد؛ به‌طوری‌که میزان تراکم با حداقل دما رابطه مستقیم و با حداکثر دما رابطه عکس دارد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در خصوص

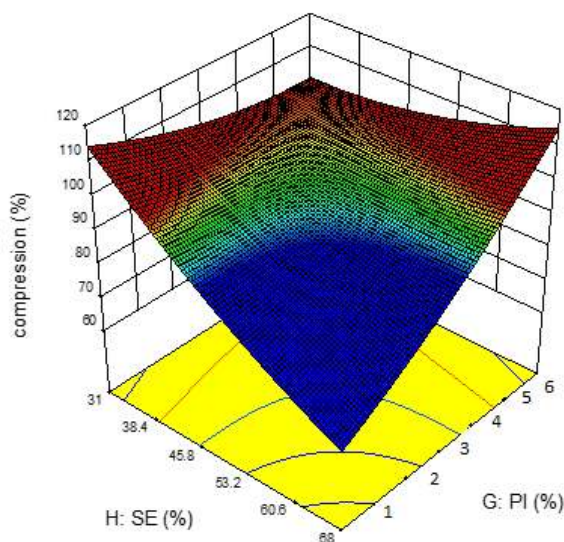


شکل ۶. نمودار تأثیر میزان ماکزیمم و مینیمم دمای هوا بر میزان تراکم

۳-۴- تأثیر میزان تمیزی و دامنه خمیری مصالح بر میزان تراکم

به تشخیص لای از رس، طبقه بندی خاک‌ها، تعیین عکس‌العمل خاک‌ها به حضور آب، تشخیص تراکم‌پذیری خاک‌ها اشاره کرد (طاحونی، ۱۳۹۲). همان‌طور که اشاره شد، این پارامتر، شاخصی برای تشخیص میزان تراکم‌پذیری خاک‌ها است؛ در واقع هرچه شاخص خمیری خاکی بیشتر باشد، تراکم‌پذیری آن بیشتر است. لازم به ذکر است که افزایش این پارامتر در صورتی که مصالح در رطوبت بهینه باشد موجب افزایش تراکم و در صورت کاهش میزان رطوبت به نسبت رطوبت بهینه موجب کاهش تراکم می‌گردد.

در شکل ۷ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر میزان تمیزی و دامنه خمیری مصالح بر میزان تراکم لایه اساس نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که میزان تراکم با مقدار دامنه خمیری رابطه عکس دارد. به‌طور کلی فاصله بین حد خمیری و حد روانی خاک، با عنوان دامنه یا شاخص خمیری شناخته می‌شود. این شاخص محدوده‌ای از محتوای آب را نمایش می‌دهد که خاک خاصیت خمیری خود را حفظ می‌کند. لازم به ذکر است که شاخص خمیری به میزان رس موجود در خاک وابسته است. از کاربردهای این پارامتر می‌توان



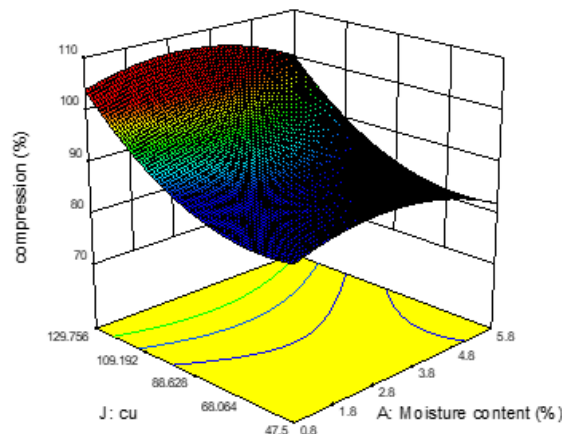
شکل ۷. نمودار تأثیر میزان تمیزی و دامنه خمیری مصالح بر میزان تراکم

اساس، موردبررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که هر چه اندازه Cu بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که توده خاک از دانه‌هایی با اندازه‌های مختلف تشکیل شده است (امیرافشاری، ۱۳۹۰). شکل ۸ بیانگر تأثیر میزان ضریب یکنواختی بر میزان تراکم است. با توجه به شکل ۸، مقدار این ضریب با میزان تراکم رابطه مستقیم دارد؛ به طوری که با افزایش مقدار ضریب یکنواختی، میزان تراکم افزایش می‌یابد؛ چراکه همان‌طور که اشاره شد، با افزایش مقدار Cu، دانه‌بندی از ذرات خاکی با اندازه‌های مختلف تشکیل شده و در نتیجه هنگام تراکم بهتر در هم فرو می‌روند و تراکم بهتر صورت می‌پذیرد (طاحونی، ۱۳۹۲).

شکل ۷ بیانگر آن است که با کاهش SE، تراکم افزایش می‌یابد؛ در واقع میزان تمیزی مصالح با میزان تراکم رابطه عکس دارد. قاعدتاً با افزایش SE، فیلر مصالح کمتر شده و به تبع آن خلل و فرج بیشتر و دانسیته محل کمتر می‌گردد و تراکم افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که تمیزی بیش‌ازحد مصالح، کمبود بخش ریزدانه، سبب متخلخل شدن دانه‌بندی و در نتیجه باعث عدم تراکم‌پذیری مصالح می‌گردد.

۳-۵- تأثیر میزان ضریب یکنواختی بر میزان تراکم

در این پژوهش ضریب یکنواختی که به صورت نسبت D_{60} به D_{10} تعریف می‌شود، به‌عنوان نماینده‌ای از دانه‌بندی مصالح



شکل ۸. نمودار تأثیر میزان ضریب یکنواختی بر میزان تراکم

۳-۶- تعیین رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته

وابسته (میزان تراکم لایه اساس) تعیین شد (رابطه ۱). لازم به ذکر است که این رابطه‌ی درجه دوم، بهترین رابطه ممکن بین متغیرهای مستقل و وابسته است که نرم‌افزار پیشنهاد داده است. در جدول ۴ و جدول ۵ به ترتیب اطلاعات آماری و خلاصه اطلاعات تحلیل ANOVA را ارائه می‌دهند.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار DESIGN EXPERT، رابطه میان پارامترهای مستقل (پارامترهای درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه‌ی اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح) و پارامتر

$$\begin{aligned} \text{Compaction} = & 1132 + 27.22 * M - 1026.85 * D - 80.54 * O + 7.09 * T + 4.56 * T_{\text{Max}} + 0.14 * T_{\text{Min}} \\ & + 7.56 * PI + 15.17 * SE - 1.43 * cu - 13.77 * M * D + 2.21 * M * O - 0.077 * M * T - 0.069 * M * \\ & T_{\text{Max}} + 0.067 * M * T_{\text{Min}} - 0.108 * M * PI + 0.017 * M * SE + 2.28237E-005 * M * cu + 58.94 * D \\ & * O - 3.96 * D * T + 1.029 * D * T_{\text{Max}} - 2.45 * D * T_{\text{Min}} + 5.78 * D * PI - 7.13 * D * SE + 0.187 * D \\ & * cu + 0.073 * O * T - 0.7878 * O * T_{\text{Max}} + 1.13 * O * T_{\text{Min}} - 1.56 * O * PI - 0.09 * O * SE + 0.067 * \\ & O * cu + 0.017 * T * T_{\text{Max}} - 0.0319 * T * T_{\text{Min}} - 0.044 * T * PI - 2.93107E-003 * T * \\ & SE + 4.60575E-003 * T * cu + 0.046573 * T_{\text{Max}} * T_{\text{Min}} + 0.09 * T_{\text{Max}} * PI - 9.66632E-003 * T_{\text{Max}} \\ & * SE - 0.024 * T_{\text{Max}} * cu - 0.16 * T_{\text{Min}} * PI - 0.0129 * T_{\text{Min}} * SE + 7.68221E-003 * T_{\text{Min}} * cu - 0.29 * \\ & PI * SE - 0.052 * PI * cu + 0.017 * SE * cu - 0.74 * M^2 + 226.96 * D^2 - 5.03 * T^2 + 0.046 * T^2 - 0.027 * \\ & T_{\text{Max}}^2 - 0.02 * T_{\text{Min}}^2 + 0.399 * PI^2 + 0.011 * SE^2 + 3.83098E-003 * cu^2 \end{aligned} \quad (1)$$

(Max temperature) T_{Min} : مینیمم دمای هوا محل اجرا
 اساس (Min temperature) PI : دامنه خمیری مصالح
 اساس، SE : تمیزی مصالح اساس، Cu : ضریب یکنواختی
 مصالح اساس.

M : درصد رطوبت مصالح لایه اساس (Moisture)
 D : دانسیته خشک آزمایشگاهی مصالح اساس
 (Dry density) O : درصد رطوبت بهینه مصالح اساس
 (Optimal humidity) T : ضخامت لایه اساس
 (Thicknes) T_{Max} : ماکزیمم دمای هوا محل اجرا اساس

جدول ۴. اطلاعات آماری رابطه پیشنهادی

| | |
|----------------|--------|
| R-Squared | ۰,۳۳۹۳ |
| Adj R-Squared | ۰,۱۴۳۳ |
| Pred R-Squared | ۰,۳۳۸۸ |

جدول ۵. جدول ANOVA رابطه پیشنهادی

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value |
|---------------------------------|----------------|----|-------------|--------------|----------|
| | | | | | Prob > F |
| Model | ۵۹۳,۴۸ | ۵۴ | ۱۰,۹۹ | ۱,۷۳ | ۰,۰۰۴ |
| A:Moisture content(M) | ۱,۳۸ | ۱ | ۱,۳۸ | ۰,۲۲ | ۰,۶۴۱۱ |
| B:Dry density (D) | ۱۱,۷۵ | ۱ | ۱۱,۷۵ | ۱,۸۵ | ۰,۱۷۵۳ |
| C: Optimum moisture content (O) | ۰,۳ | ۱ | ۰,۳ | ۰,۰۴۷ | ۰,۸۲۹۲ |
| D:Thickness (T) | ۲,۴۷ | ۱ | ۲,۴۷ | ۰,۳۹ | ۰,۵۳۳۲ |
| E: T_{Max} | ۰,۵۱ | ۱ | ۰,۵۱ | ۰,۰۸ | ۰,۷۷۷۴ |
| F: T_{Min} | ۱۷,۵۴ | ۱ | ۱۷,۵۴ | ۲,۷۶ | ۰,۰۹۸۲ |
| G: PI | ۰,۶۱ | ۱ | ۰,۶۱ | ۰,۰۹۶ | ۰,۷۵۶۹ |
| H: SE | ۰,۳۲ | ۱ | ۰,۳۲ | ۰,۰۵۱ | ۰,۸۲۱۶ |
| J: Cu | ۱۶,۰۸ | ۱ | ۱۶,۰۸ | ۲,۶۵ | ۰,۱۰۵۶ |
| AB | ۴,۷۴ | ۱ | ۴,۷۴ | ۰,۷۵ | ۰,۳۸۸۹ |
| AC | ۲۲,۹۲ | ۱ | ۲۲,۹۲ | ۳,۶۱ | ۰,۰۵۹ |
| AD | ۵,۲۹ | ۱ | ۵,۲۹ | ۰,۸۳ | ۰,۳۶۲۷ |
| AE | ۳,۰۵ | ۱ | ۳,۰۵ | ۰,۴۸ | ۰,۴۸۹ |
| AF | ۲,۷۹ | ۱ | ۲,۷۹ | ۰,۴۴ | ۰,۵۰۸ |
| AG | ۰,۳۵ | ۱ | ۰,۳۵ | ۰,۰۵۴ | ۰,۸۱۵۹ |
| AH | ۰,۳۴ | ۱ | ۰,۳۴ | ۰,۰۵۳ | ۰,۸۱۸۲ |
| AJ | ۰,۰۰۰۰۰۳ | ۱ | ۰,۰۰۰۰۰۳۴۵۸ | ۰,۰۰۰۰۰۰۵۴۴۵ | ۰,۹۹۹۴ |
| BC | ۵,۰۸۲ | ۱ | ۵,۰۸۲ | ۰,۹۲ | ۰,۳۳۹۵ |
| BD | ۳,۰۱ | ۱ | ۳,۰۱ | ۰,۴۹ | ۰,۴۸۵۶ |
| BE | ۰,۰۶ | ۱ | ۰,۰۶ | ۰,۰۰۹۴۶۲ | ۰,۹۲۲۶ |
| BF | ۰,۴۴ | ۱ | ۰,۴۴ | ۰,۰۶۹ | ۰,۷۹۳۳ |
| BG | ۰,۷۵ | ۱ | ۰,۷۵ | ۰,۱۲ | ۰,۷۳۱۴ |
| BH | ۲۴,۴۶ | ۱ | ۲۴,۴۶ | ۳,۸۵ | ۰,۰۵۱۲ |
| BJ | ۰,۲۷ | ۱ | ۰,۲۷ | ۰,۰۴۳ | ۰,۸۳۵۹ |

| | | | | | |
|----|-------|---|-------|-------|--------|
| CD | ۰,۰۵۹ | ۱ | ۰,۰۵۹ | ۰,۰۹۳ | ۰,۷۶۰۵ |
| CE | ۱۷,۶۱ | ۱ | ۱۷,۶۱ | ۲,۷۷ | ۰,۰۹۷۶ |
| CF | ۴۸,۱۳ | ۱ | ۴۸,۱۳ | ۷,۵۸ | ۰,۰۰۶۵ |
| CG | ۱۱,۸۳ | ۱ | ۱۱,۸۳ | ۱,۸۶ | ۰,۱۷۴ |
| CH | ۰,۸۱ | ۱ | ۰,۸۱ | ۰,۱۳ | ۰,۷۲۲۱ |
| CJ | ۴,۳۳ | ۱ | ۴,۳۳ | ۰,۶۸ | ۰,۴۰۹۷ |
| DE | ۲,۲۲ | ۱ | ۲,۲۲ | ۰,۳۵ | ۰,۵۵۵۱ |
| DF | ۹,۱۳ | ۱ | ۹,۱۳ | ۱,۴۴ | ۰,۲۳۲ |
| DG | ۰,۸۷ | ۱ | ۰,۸۷ | ۰,۱۴ | ۰,۷۱۱ |
| DH | ۰,۲۳ | ۱ | ۰,۲۳ | ۰,۰۳۶ | ۰,۸۴۹ |

ادامه جدول ۵-جدول ANOVA رابطه پیشنهادی

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value | Significance |
|----------------|----------------|-----|-------------|---------|---------|--------------|
| DJ | ۱,۶۲ | ۱ | ۱,۶۲ | ۰,۲۵ | ۰,۶۱۴۴ | ✓ |
| EG | ۲,۶۳ | ۱ | ۲,۶۳ | ۰,۴۱ | ۰,۵۲۰۷ | ✓ |
| EH | ۰,۷۹ | ۱ | ۰,۷۹ | ۰,۱۳ | ۰,۷۲۴ | ✓ |
| EJ | ۲۸,۰۹ | ۱ | ۲۸,۰۹ | ۴,۵۵ | ۰,۰۳۴۲ | ✓ |
| FG | ۱۱,۵۸ | ۱ | ۱۱,۵۸ | ۱,۸۲ | ۰,۱۷۸۶ | ✓ |
| FH | ۱۰,۶۵ | ۱ | ۱۰,۶۵ | ۱,۶۸ | ۰,۱۹۶۸ | ✓ |
| FJ | ۲,۸۷ | ۱ | ۲,۸۷ | ۰,۴۵ | ۰,۵۰۲۳ | ✓ |
| GH | ۱ | ۱ | ۱ | ۰,۱۶ | ۰,۶۹۱۲ | ✓ |
| GJ | ۴۴,۰۸ | ۱ | ۴۴,۰۸ | ۷,۰۵ | ۰,۰۰۸۶ | ✓ |
| HJ | ۲۴,۳۹ | ۱ | ۲۴,۳۹ | ۳,۸۴ | ۰,۰۵۱۵ | ✓ |
| A ^r | ۴۶,۴۵ | ۱ | ۴۶,۴۵ | ۷,۳۲ | ۰,۰۰۷۵ | ✓ |
| B ^r | ۰,۹۱ | ۱ | ۰,۹۱ | ۰,۱۴ | ۰,۷۰۵۴ | ✓ |
| C ^r | ۱۷,۸۱ | ۱ | ۱۷,۸۱ | ۲,۸۱ | ۰,۰۹۵۷ | ✓ |
| D ^r | ۲۷,۰۳ | ۱ | ۲۷,۰۳ | ۴,۲۶ | ۰,۰۴۰۵ | ✓ |
| E ^r | ۱,۸۵ | ۱ | ۱,۸۵ | ۰,۲۹ | ۰,۵۹ | ✓ |
| F ^r | ۱,۶۸ | ۱ | ۱,۶۸ | ۰,۲۶ | ۰,۶۰۸ | ✓ |
| G ^r | ۱,۳۷ | ۱ | ۱,۳۷ | ۰,۲۲ | ۰,۶۴۳۴ | ✓ |
| H ^r | ۸,۲۲ | ۱ | ۸,۲۲ | ۱,۳ | ۰,۲۵۶۶ | ✓ |
| J ^r | ۲۸,۹۸ | ۱ | ۲۸,۹۸ | ۴,۵۶ | ۰,۰۳۴ | ✓ |
| Residual | ۱۱۵۵,۶۶ | ۱۸۲ | ۶,۳۵ | | | ✓ |
| Lack of Fit | ۱۱۳۰,۶۶ | ۱۷۶ | ۶,۴۲ | ۱,۵۴ | ۰,۳۰۸۸ | × |
| Pure Error | ۲۵ | ۶ | ۴,۱۷ | | | ✓ |
| Cor Total | ۱۷۴۹,۱۴ | ۲۳۶ | | | | ✓ |

تراکم با توجه به پژوهش‌های پیشین تعیین شد؛ که این پارامترها شامل درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح اساس هستند. سپس پارامترهای مذکور از شیت‌های آزمایشگاهی سه پروژیه دهقان، کوهپایه، شهرکرد استخراج گردید و با کمک روش سطح پاسخ و نرم افزار DESIGN EXPERT مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار Design Expert، میزان تراکم با افزایش دانسیته خشک آزمایشگاهی و ضخامت لایه، کاهش می‌یابد؛ در واقع می‌توان گفت که میزان تراکم با پارامترهای دانسیته خشک و ضخامت لایه رابطه عکس دارد.

علاوه بر این، نتایج بیانگر آن است که پارامترهای حداکثر دما، دامنه خمیری و تمیزی با میزان تراکم رابطه عکس دارد؛ چراکه افزایش این پارامترها باعث کاهش میزان تراکم می‌گردد. همچنین میزان تراکم با پارامترهای حداقل دما و ضریب یکنواختی رابطه مستقیم دارد.

علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد رطوبت تا حدی باعث افزایش میزان تراکم می‌شود.

به کمک رابطه ۱ می‌توان با داشتن مقادیر پارامترهای خصوصیات فنی مصالح سنگی لایه اساس (درصد رطوبت، دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، ضخامت لایه اساس، بیشینه دمای محیط، کمینه دمای محیط، دامنه خمیری، تمیزی مصالح و ضریب یکنواختی دانه‌بندی مصالح) میزان تراکم لایه اساس را محاسبه و پیش‌بینی کرد.

در جدول ۴، R-Squared، ضریب تشخیص نام دارد که بیانگر مقدار تشابه میان داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل است و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است. پارامتر دیگر در جدول ۴ Adj R-Squared است که در محاسبه این پارامتر، نرم‌افزار تأثیر پارامترهایی که معنادار نیستند کمتر می‌کند و همچنین Pred R-Squared نشانگر آن است که این مدل چقدر برای پیش‌بینی پاسخ قوی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با اینکه مقدار ضریب تشخیص به عدد ۱ نزدیک نیست، اما نرم‌افزار مدل درجه دوم را پیشنهاد داده است؛ چراکه نرم‌افزار علاوه بر بررسی مقدار ضریب تشخیص پارامترهای دیگری را نیز برای آرایه مدل در نظر می‌گیرد. به‌عنوان مثال یکی از ملاک‌های یک مدل مناسب این است که اختلاف دو پارامتر Adj R-Squared و Pred R-Squared، کمتر مساوی ۰/۲ باشد و همچنین مقدار p-value مدل (ارایه شده در جدول ۵) کمتر از ۵ درصد باشد و علاوه بر این مقدار Lack of Fit که بیانگر میزان خطا در رابطه است، باید غیرقابل توجه (not significant) باشد که در این رابطه این موارد برقرار است. به‌طورکلی نرم‌افزار DESIGN EXPERT با توجه به اطلاعات و تحلیل‌های آماری، خود بهترین رابطه ممکن بین پارامترهای مستقل و وابسته را ارائه می‌دهد که در این پژوهش بهترین رابطه ممکن میان پارامتر میزان تراکم و عوامل مؤثر بر آن، یک رابطه درجه دوم است.

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر خصوصیات مصالح لایه اساس بر میزان تراکم آن انجام شده است؛ بدین منظور در این مطالعه ابتدا پارامترهای مؤثر بر

۵- مراجع

روسازی به روش عددی"، نهمین همایش قیر و آسفالت ایران. -خبیری، م.، بلوچ سیرگانی، پ.، (۱۳۹۸). "اثر پاسخ در برابر بارگذاری و مشخصات مکانیکی مصالح اساس بر عملکرد خستگی روسازی بلوکی بتنی"، سومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی. -سیدی مرغکی، م.، شاه‌رخ، ا. و رحیمی پردنجانی، ا.، (۱۳۹۵)، "مقایسه تأثیر دانه بندی و مشخصه های فیزیکی مصالح سنگی بر کیفیت لایه‌های روسازی (مطالعه موردی: جنوب کرمان)"، هشتمین

-احدی، م.، و میرهاشمی، س.، و صادق نژاد، م.، (۱۳۹۸)، "بررسی همزمانی تأثیر تراکم، رطوبت و ضخامت بر رفتار لایه اساس با استفاده از آزمایش LWD"، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۵ (۲)، (پیاپی ۱۸)، ص. ۸۹-۱۰۰. -امیرافشاری، س.، (۱۳۹۰)، "مکانیک خاک"، سری عمران. -حیدری فیروزآبادی، ح.، خبیری، م.، (۱۳۹۶)، "مطالعه اثر تغییر مشخصات تراکم خاک بستر و اصطکاک بین لایه‌ای برعکس العمل

- Keller, G., (2015), "Statistics for Management and Economics", Cengage Learning.
- Khabiri, M. M., & Fard, Z. G., (2021), "Application of Mathematical Models for Optimizing Inspection Frequency in Maintenance and Management of Pavement", *Journal of Science and Technology*, 13(2), pp.38-46.
- Penkov, V. O., Skoryk, O. O., Uzviieva, O. M., Panchenko, V. Y., & Korostelov, Y. M., (2019), "Improvement of the quality of the geodesic support for the reconstruction of the roads", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 12019.
- Rahman, S., Salgado, R., Prezzi, M., & Becker, P. J., (n.d.) (2019), "Improvement of stiffness and strength of backfill soils through optimization of compaction procedures and Purdue University", *Joint Transportation Research Program*.
- Stability analysis of anisotropic granular base layers in flexible pavement, (2018), M. Asadi and R. S. Ashtiani, 14, pp.183-189.
- Su, N., Xiao, F., Wang, J., & Amirhanian, S., (2017), "Characterizations of base and subbase layers for Mechanistic-Empirical Pavement Design", *Construction and Building Materials*, 152, pp.731-745.
- Thai, H. N., Kato, A., Nguyen, H. G., Nguyen, T. D., Tong, T. K., & Uchimura, T., & Kawamoto, K., (2021), "Effects of particle size and type of aggregate on mechanical properties and environmental safety of unbound road base and subbase materials: A literature review", *GEOMATE Journal*, 20(78), pp.148-157.
- Van Niekerk, A. A., Molenaar, A. A. A., & Houben, L. J. M. (n.d.) (2019), "Effect of material quality and compaction on the mechanical behaviour of base course materials and pavement performance", *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp.1071-1079.
- Van Niekerk, A. A., Van Scheers, J., Muraya, P., & Kisimbi, K., (2000), "The effect of compaction on the mechanical behaviour of mix granulate base course materials and on pavement performance", *Heron-English Edition*-, 45(3), pp.197-218.
- همایش قیر و آسفالت ایران.
- شریفی، ع. ح. فاطمی عقدا، س.، ارومیه‌ای، ع.، (۱۳۸۹)، "پیش بینی درصد تراکم خاک‌های ریزدانه در ساختمان سد مخزنی سراسی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، *زمین‌شناسی مهندسی*، ۴ (۲)، ص. ۹۸۷-۱۰۱۰.
- طاحونی، ش.، (۱۳۹۲)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، پارس آیین (شرکت اندیش کاو).
- عاملی، ع.، پرورش کاران، ا.، هاشمی، س.، (۱۳۹۷)، "تاثیر استفاده از مصالح بازیافتی در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی"، *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۵(۵۵)، ص. ۲۷۱-۲۹۶.
- غفوری فرد، ز.، (۱۴۰۰)، "بهبود سازی دانه بندی آسفالت متخلخل برای معابر کم عرض در بافت سنتی شهرهای کویری"، *دانشگاه یزد*.
- فتاحی، م. و خمیری، م. ی.، (۱۴۰۰)، "بررسی تاثیر مشخصات سنگدانه بر عملکرد سایش سطحی روسازی بتن غلتکی"، *تحقیقات بتن*، ۱۴(۲)، ص. ۳۵-۵۱.
- ولی‌زاده، م. و کمرودی، ن.، (۱۳۹۴)، "تاثیر ویژگی‌های مصالح سنگی تثبیت نشده برضریب نفوذپذیری لایه اساس"، *سومین کنفرانس بین المللی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران*، معماری و مدیریت شهری.
- ولی‌زاده، م. ولی‌زاده، م. و طاهرخانی، ح.، (۱۳۹۲)، "اثر مصالح سنگی تثبیت نشده بر روی رفتار ارتجاعی لایه اساس"، *هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران*.
- Fang, M., Park, D., Singuranayo, J. L., Chen, H., & Li, Y., (2019), "Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance, A review", *International Journal of Pavement Engineering*, 20(12), pp.1408-1424.
- Gao, B., Yang, C., Zou, Y., Wang, F., Zhou, X., Barbieri, D. M., & Wu, S., (2021), "Compaction Procedures and Associated Environmental Impacts Analysis for Application of Steel Slag in Road Base Layer", *Sustainability*, 13(8), 4396.
- Hu, W., Shu, X., Jia, X., & Huang, B., (2018), "Geostatistical analysis of intelligent compaction measurements for asphalt pavement compaction", *Autom. Constr.*, 89, pp.162-169.
- Karami, H. R., Keyhani, M., & Mowla, D., (2016), "Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, pp.104-112.

Investigating the Effect of Technical Characteristics of Aggregate Materials on the Compaction of the Base Layer by Response Surface Method

Milad Rasti, M.Sc., Grad., Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

Mojtaba Rajabi Bhaabadi, Assistant Professor, Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

One of the most fundamental issues in road construction is to increase the density and strength of the layers of stone materials to the desired level. For this purpose, the different layers of the pavement should be compacted to an acceptable extent by means of asphalt rollers. On the other hand, the performance of the pavement aggregate layers, which is highly effective on the performance of the entire pavement, is influenced by their compaction. Therefore, it is very important to investigate the factors affecting the field compaction of the pavement layers including the base layer. As a result, this research aims to examine the effect of the characteristics of the base layer materials on its relative compaction using the response surface methodology. For this purpose, the characteristics of stone materials including moisture content, dry density, optimal moisture content, thickness of the base layer, maximum ambient temperature, minimum ambient temperature, the plasticity index, the sand equivalent value and uniformity coefficient were extracted from the laboratory sheets related to Dahaghan, Kohpayeh and Shahrekord projects and then analyzed using Design Expert and SPSS software. The results show that the relative compaction has an inverse relationship with laboratory dry density, layer thickness, maximum temperature, the plasticity index and the sand equivalent value. Furthermore, we show that there exists direct relationship between relative compaction and the minimum temperature and the uniformity coefficient.

Keywords: Base Layer, Density, Material Properties, Pavement Performance, Response Surface Methodology