بررسی همزمانی تأثیر تراکم، رطوبت و ضخامت بر رفتار لایه اساس با استفاده از آزمایش LWD

محمدرضا احدی*، دانشیار، عضو هیئت‌علمی، پژوهشکده حمل‌ونقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
سید فرزاد میرهاشمی، کارشناس ارشد، گرایش راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود
مصطفی صادق‌نژاد، دکترا، گرایش راه و ترابری، پژوهشکده حمل‌ونقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

Email: m.ahadi@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

چکیده

در اکثر کشورهای جهان، از جمله ایران، روسازی‌های انعطاف‌پذیر همواره بیشترین سهم را در ساخت راه‌ها به خود اختصاص می‌دهند. در اغلب روش‌های طراحی، توجه کمتری به لایه‌های اساس و زیراساس می‌شود و بیشتر تحقیقات بر لایه آسفالتی متمرکز است. چون رفتار این مصالح، به سبب خاصیت الاستوپلاستیک در کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت متفاوت است، لزوم بررسی رفتار آن‌ها قبل از به‌کار بردن در لایه‌های روسازی و همچنین مقایسه رفتاری بین انواع مصالح اهمیت دارد. ماحصل این امر، انتخاب بهترین نوع مصالح برای روسازی و بهترین شرایط دانه‌بندی، رطوبتی و تراکم است. لذا، انتخاب شرایط آزمایشی که بتواند دقیقاً شرایط تنش واقعی وارد شده به روسازی را شبیه‌سازی کند مهم است. آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌ای قابل حمل (LWD) معمولاً به منظور تعیین قدرت باربری لایه‌های غیرچسبنده روسازی استفاده می‌شود. هدف این تحقیق، بررسی همزمان نقش عوامل مؤثر مرتبط با لایه اساس بر رفتار این لایه به‌وسیله آزمایش LWD می‌باشد. عوامل مؤثر انتخابی شامل تراکم، ضخامت و رطوبت لایه می‌باشند. نتایج نشان داد که با افزایش تراکم از ۸۷٪ به ۹۷٪ و همچنین ضخامت لایه اساس از ۲۰ به ۴۰ سانتی‌متر، به میزان قابل توجهی بر مدول سطحی لایه افزوده شده و از افت‌وخیز آن کاسته می‌شود. همچنین، تغییرات رطوبت لایه تأثیر چندانی بر مدول و افت‌وخیز لایه اساس نداشته است.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، لایه اساس، مصالح غیرچسبنده، تراکم، آزمایش PFWD.

۱. مقدمه

در اکثر کشورهای جهان، روسازی‌های انعطاف‌پذیر همواره بیشترین سهم را در ساخت راه‌ها به خود اختصاص می‌دهند. کشور ایران نیز از این قاعده پیروی می‌کند. در اغلب روش‌های طراحی، توجه کمتری به لایه‌های اساس و زیراساس می‌شود و بیشتر تحقیقات و مطالعات بر نقش

لایه آسفالتی بر طراحی متمرکز است (یوهانس و همکاران، ۲۰۰۹).

مصالح دانه‌ای غیرچسبنده از اعضای جدانشدنی این نوع روسازی‌ها هستند که به‌طور گسترده‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس، از آن‌ها استفاده می‌شود. ظرفیت باربری این نوع مصالح مبتنی بر قفل و بست بین اجزای سنگدانه‌ای می‌باشد. مصالح سنگدانه‌ای هنگامی که تحت بار دینامیک قرار می‌گیرند از خود دو نوع تغییرشکل ارتجاعی و ماندگار نشان می‌دهند. تغییرشکل ارتجاعی (که ممکن است الاستیک یا غیرالاستیک باشد) می‌تواند منجر به ایجاد ترک خستگی در لایه‌های بالایی (لایه‌های چسبنده) شود و تغییرشکل ماندگار (پلاستیک)، شیار شدگی در مسیر چرخ‌ها را به همراه دارد (سیگاردور و همکاران، ۲۰۱۷). تغییرشکل ماندگار ماحصل تجمع سهم‌های کوچک هر یک از سیکل‌های بارگذاری است. اگرچه تغییرشکل ارتجاعی (برگشت‌پذیر) تقریباً یکنواخت‌تر از تغییرشکل پلاستیک (غیرقابل برگشت) می‌باشد، اما پس از تعدادی سیکل بارگذاری، جزء پلاستیک افزایش یافته و ممکن است منجر به شکست احتمالی ناشی از شیار شدگی بیش از حد مجاز شود.

عوامل متعددی در تغییرشکل مصالح غیرچسبنده مؤثر هستند که برخی از آن‌ها در طول عمر روسازی می‌تواند ثابت فرض شود و به ویژگی‌های ذره‌ای آن‌ها مربوط می‌شود مانند رنگ، شکل، زبری، دانه‌بندی، وضعیت معدنی و ویژگی‌های پلاستیک. عواملی نیز بر اثر شرایط و در طول زمان تغییر می‌کنند و به ویژگی‌های توده‌ای آن مربوط می‌شوند مانند ساختمان، چگالی، نسبت فضای خالی، نفوذپذیری و مقاومت سنگدانه. رفتار ارتجاعی این مصالح توسط برخی پارامترها از قبیل سطح تنش، تنش همه‌جانبه، جابجایی تنش‌های اصلی، روش تراکم، چگالی، مقدار آب، تاریخچه تنش و سیکل ذوب و یخبندان می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. همچنین، رفتار تغییرشکل ماندگار نیز متأثر از عواملی همچون سطح تنش، فشار همه‌جانبه، چرخش نسبت به تنش اصلی، تعداد دفعات بارگذاری، رطوبت، تاریخچه تنش، چگالی، دانه‌بندی، مقدار ریزدانه و ویژگی‌های فیزیکی ذرات سنگدانه‌ها می‌باشد (سیریپون و همکاران، ۲۰۱۲).

از آنجایی که رفتار این مصالح در کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت متفاوت بوده و به سبب خاصیت الاستوپلاستیکی که دارند، رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند، لزوم بررسی رفتار آن‌ها قبل از به‌کار بردن در لایه‌های روسازی و همچنین مقایسه رفتاری بین انواع مصالح از اهمیت بالایی برخوردار است که ماحصل آن انتخاب بهترین نوع مصالح و شرایط دانه‌بندی، رطوبتی و تراکم است (فریر و همکاران، ۲۰۱۰).

آزمایش‌های به‌کار گرفته شده به منظور ارزیابی مصالح سنگی مختلف، از جمله مصالح غیرچسبنده، به طور کلی به سه دسته آزمایشگاهی، صحرایی و تسریع شده تقسیم می‌شوند. آزمایش‌های آزمایشگاهی (مانند ضریب باربری کالیفرنیا و آزمایش سه‌محوری) در مقیاس آزمایشگاه روی برخی خصوصیات خاص مصالح تمرکز دارند. آزمایش‌های صحرایی نیز دامنه وسیعی از قبیل DCP، CBR صحرایی و PFWD را شامل شده و به منظور ارزیابی و بررسی روسازی‌های موجود استفاده می‌شوند. همچنین، از مناسب‌ترین آزمایش‌ها به منظور ارزیابی رفتار مصالح دانه‌ای غیرچسبنده، آزمایش تسریع شده روسازی (APT) می‌باشد که در آن تمامی شرایط یک روسازی واقعی شبیه‌سازی می‌شود؛ اما سختی تکرارپذیری آن از یک سو و همچنین صرف هزینه و زمان طولانی انجام آن از نکات منفی این آزمایش می‌باشد. از طرفی، پُرکاربردترین آزمایشی که رفتار مصالح غیرچسبنده را ارزیابی می‌کند، آزمایش سه‌محوری با بارگذاری تکراری است. این آزمایش نیز با وجود این که عموماً در دسترس بوده (هزینه و زمان کمی برای انجام آن نیاز است و به راحتی قابلیت تکرار را دارد) قادر به شبیه‌سازی شرایط واقعی تنش نمی‌باشد و همچنین شرایط رطوبتی آن نیز با شرایط روسازی واقعی بسیار متفاوت است (برازوان و همکاران، ۲۰۱۴).

با توجه به مباحث ذکر شده، انتخاب شرایط آزمایشی که بتواند دقیقاً شرایط تنش واقعی وارد شده به روسازی را شبیه‌سازی کند از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. در این بین، آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌ای قابل حمل (LWD) نمونه سبک و بدون نیاز به ماشین معمولاً به منظور تعیین قدرت باربری لایه‌های غیرچسبنده روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کمک افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه، امکان

تعیین سختی لایه‌های چسبنده و غیرچسبنده روسازی با استفاده از روش‌های محاسبه مستقیم و معکوس میسر می‌گردد. همچنین، ارزیابی رفتار ارتجاعی لایه‌های دانه‌ای غیرچسبنده در روسازی با استفاده از دستگاه فوق، ممکن می‌باشد. با استفاده از منحنی افت‌وخیز در زمان اعمال ضربه، می‌توان انرژی مستهلک شده در مصالح را نیز محاسبه نمود (فخری و برازوان، ۲۰۱۴).

با توجه به موارد فوق و ضعف‌ها و قوت‌های مطرح شده، هدف این تحقیق، بررسی همزمان نقش عوامل مؤثر بر رفتار تغییرشکل ارتجاعی مصالح دانه‌ای غیرچسبنده به‌وسیله آزمایش LWD می‌باشد.

۲. مطالعات پیشین

رفیعی و کاوسی (۲۰۱۰) به‌منظور ارزیابی تأثیر وزنه بارگذاری در پروژه‌های مختلف، وزنه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرمی را با ارتفاع سقوط معین و یک صفحه ثابت بارگذاری به کار گرفت و میزان مدول سختی برای هر حالت را محاسبه کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که در کلیه پروژه‌ها، با افزایش مقدار وزنه (در سه محدوده مورد بررسی)، مدول سختی افزایش می‌یابد. در این تحقیق، علت این تحقیق چنین گزارش شد که وقتی از وزنه‌های سنگین‌تر استفاده می‌شود، وزن دستگاه و میزان تنش‌های استاتیک جانبی قبل از بارگذاری افزایش می‌یابد و افزوده شدن تنش‌های جانبی نیز باعث افزایش مدول سختی می‌شود.

همچنین، رفیعی و کاوسی (۲۰۱۰) برای بررسی اثر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، بارگذاری LWD در آزمایش‌های میدانی در دو ارتفاع و در شرایط آزمایشگاهی در سه ارتفاع سقوط را انجام دادند. در کل آزمایش‌ها، وزنه ثابت ۱۵ کیلوگرمی و با صفحه ۳۰۰ میلی‌متری به کار گرفته شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تغییر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر مدول سختی ندارد (حداکثر ضریب تغییرات برابر ۶٪ است). علت این مسئله آن است که برای مصالح سنگدانه‌ای که مقاومت آن‌ها به اصطکاک بین‌دانه‌ای بستگی دارد، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار روی مدول سختی، تنش جانبی است. در صورتی که در آزمایش LWD با تغییر ارتفاع سقوط، تنش انحرافی تغییر می‌کند و چون بارگذاری با سرعت زیاد صورت می‌گیرد، فرصت کافی برای تغییر تنش جانبی ایجاد نمی‌شود. در نتیجه، مدول سختی نیز تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

بر اساس مطالعات استاینرت و همکاران (۲۰۰۵) در خصوص روسازی‌های آسفالتی، معمولاً مدول دستگاه با افزایش مقدار وزنه کاهش می‌یابد. ولی کاهش ارتفاع به میزان ناچیزی باعث کاهش مدول می‌شود. همچنین، مدول اندازه‌گیری شده برای وزنه‌های ۱۵ و ۲۰ کیلوگرمی، مستقل از قطر صفحه بارگذاری است، در صورتی که برای وزنه ۱۰ کیلوگرمی، با افزایش قطر صفحه مدول کاهش پیدا می‌کند. علت این مسئله بدین صورت گزارش شد که وقتی قطر صفحه و مقدار وزنه کوچک باشد، فقط قسمت بالایی روسازی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و بنابراین میزان خیز، متأثر از قسمت سخت‌تر روسازی است و در نتیجه مدول بزرگ‌تری را نتیجه می‌دهد.

لین و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی، نشان دادند که اثر ارتفاع سقوط وزنه روی مدول LWD چشمگیر نیست. به گونه‌ای که ارتفاعات مختلف، مدول مشابهی را نتیجه می‌دهند. بر اساس این مطالعات، مهم‌ترین پارامتر در میزان مدول محاسبه شده، اندازه صفحه بارگذاری است و مدول E0 به‌دست آمده از صفحه ۱۰۰ میلی‌متری حدود ۱/۵ برابر بیشتر از مدول صفحه ۳۰۰ میلی‌متری است. همچنین، نتایج این تحقیق دلالت بر ارجح بودن صفحه ۳۰۰ میلی‌متری نسبت به صفحه ۱۰۰ میلی‌متری داشت.

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱. مصالح مصرفی

مصالح مصرفی مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل مصالح سنگی است که دانه‌بندی آن حد وسط دانه‌بندی پیوسته تیپ ۳ مربوط به قشر لایه اساس مطابق با نشریه شماره ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران است. حدود این دانه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مشخصات مربوط مرغوبیت مصالح سنگی نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی لایه اساس

اندازه الک (میلی‌متر)	محدوده مجاز		درصد انتخابی
	حد پایین (٪)	حد بالا (٪)	
۵۰	۱۰۰	-	۱۰۰
۲۵	۷۵	۹۵	۸۵
۹/۵	۴۰	۷۵	۵۹
۴/۷۵	۳۰	۶۰	۴۵
۲	۲۰	۴۵	۳۳
۰/۴۲۵	۱۵	۳۰	۲۳
۰/۰۷۵	۲	۸	۶

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین‌نامه		نتیجه آزمایش
		حداکثر	حداقل	
سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)	ASTM C13	۲۵	-	۱۹
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	۸	-	۰/۶۲
شکستگی (درصد)	ASTM D5821	-	۶۰	۹۲
سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد)	ASTM D479	۱۵	-	۱۰

۲-۳. آزمون افت‌وخیزسنج ضربه‌ای سبک (LWD)

دستگاه افت‌وخیزسنج ضربه‌ای سبک مورد استفاده در این تحقیق، نوع قابل حمل دستی و یا به کمک چرخ PFWD ساخته شده توسط شرکت دانمارکی Dynatest می‌باشد، که مشخصات آن به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳. مشخصات دستگاه LWD مدل Dynatest

مشخصه	مقدار
وزن کلی دستگاه (کیلوگرم)	۲۲
تعداد ژئوفون	۳ - ۲ - ۱
قطر صفحه بارگذاری (متر)	۰/۳- ۰/۲ - ۰/۱۵ - ۰/۱
وزنه‌ها (کیلوگرم)	۲۰ - ۱۵ - ۱۰
محدوده بارگذاری (KN)	حداکثر ۱۵
ارتفاع سقوط (سانتی‌متر)	حداکثر ۸۵

دستگاه LWD بارهای ضربه‌ای را به‌منظور شبیه‌سازی بارگذاری ناشی از حرکت چرخ به سطح روسازی وارد می‌کند (ASTM E2583، ۲۰۰۷). مکانیسم کلی دستگاه به این صورت است که ابتدا صفحه بارگذاری و ژئوفون‌ها روی سطح روسازی قرار می‌گیرند. سپس، وزنه از ارتفاع مشخص سقوط می‌کند. وزنه با اصابت به ضربه‌گیرهای موجود، تنش متناظر بار چرخ را بر سطح روسازی اعمال می‌کند. تنش حاصله حدوداً در مدت ۲۵ میلی‌ثانیه به سطح وارد شده، به میزان حداکثری خود رسیده و برداشته می‌شود. بعد از اعمال تنش، میزان افت‌وخیز ایجاد شده در سطح روسازی توسط ژئوفون‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود (خاوندی و خاکسار، ۲۰۱۷).

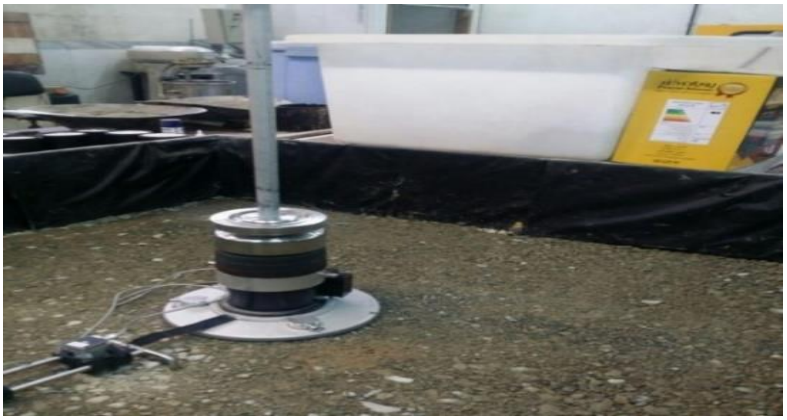
همچنین، در هنگام برخورد وزنه با ضربه‌گیرها، نیروسنج، نیروی وارده را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. نرم‌افزار تحلیل داده‌های دستگاه LWD که قابلیت تعریف سه لایه و محاسبه مدول هر یک از آن‌ها را دارد LWDMood نام دارد.

به‌منظور ساخت نمونه، ابتدا باید قالبی به‌منظور انجام آزمایش تهیه می‌گردید. پس از تعیین حداکثر وزن مخصوص تئوریک و درصد رطوبت بهینه، ساخت قالب نمونه آغاز شد. با توجه به موضوع تحقیق و حجم بالای مصالح مورد آزمایش، ابتدا یک قالب از جنس چوب جهت انجام آزمایش به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰*۶۰ سانتی‌متر با وزن ۱۳۰ کیلوگرم ساخته شد و سنسورهای مربوط به ترازوی دیجیتالی جهت اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها به آن متصل گردید. این ترازو با دقت ۰/۵کیلوگرم قادر به اندازه‌گیری وزن مصالح بود. بعد از تراز کردن محل قرارگیری قالب،

درون آن توسط کیسه‌های پلاستیکی ضخیم جهت جلوگیری از خروج آب و عدم ایجاد تغییر در میزان رطوبت نمونه‌ها به طور کامل در دو لایه پوشانیده شد. به‌منظور استحکام هر چه بیشتر قالب، اطراف و زیر آن توسط پروفیل‌های فلزی کاملاً مهار گردید تا ضربات ناشی از دستگاه متراکم کننده نمونه باعث جدا شدن دیواره‌ها و کف قالب از یکدیگر نشود. شکل ۱، نحوه انجام آزمایش روی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

در آزمایش LWD، تاریخچه زمانی خیز و بار اعمالی بر صفحه بارگذاری ثبت می‌شود. ولی معمولاً فقط حداکثر بار و خیز برای تخمین مدول سختی مصالح به‌کار می‌رود.

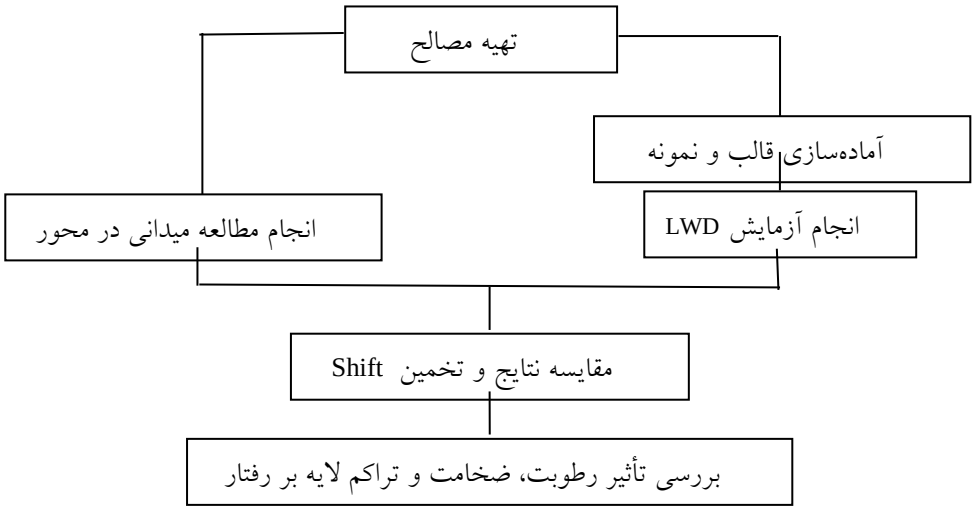
پس از مرور تحقیقات انجام شده در زمینه خصوصیات مصالح سنگدانه‌ای و عوامل مؤثر بر انتخاب آن‌ها در لایه اساس و زیراساس، عوامل تأثیرگذار جمع‌بندی گردید. با توجه به این تحقیقات، عواملی همچون ویژگی‌های فیزیکی از قبیل شکل و اندازه و همچنین میزان تراکم، دانه‌بندی، ضخامت و درصد رطوبت مشخص گردید (Code 234، ۲۰۱۳). با بررسی همه‌جانبه تحقیقات گذشته و با توجه به امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری موجود و وجود محدودیت‌های زمانی و مالی، سرانجام چهار عامل مؤثر بر انتخاب مصالح سنگدانه‌ای غیرچسبنده مطابق جدول ۴ انتخاب شد. در این بین، عوامل ضخامت، رطوبت و تراکم لایه اساس به عنوان عوامل مرتبط با آماده‌سازی لایه متغیر و عامل وزنه پرتابی ثابت در نظر گرفته شد. جدول ۴، پارامترهای در نظر گرفته شده در این تحقیق و مقادیر آن‌ها را نشان می‌دهد. ضخامت‌های تعیین شده بر اساس بررسی پروژه‌های اجرایی و مقادیر منطقی لایه اساس انتخاب گردیده‌اند. همچنین، رطوبت بهینه پس از انجام آزمایش-ها برابر ۷٪ تعیین گردید که به منظور بررسی پارامتر درصد رطوبت بهینه مقادیر ۴ و ۱۰ درصد نیز مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی همزمانی تأثیر پارامترهای ضخامت لایه، درصد رطوبت بهینه و تراکم لایه بر مدول و افت‌وخیز لایه اساس از نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد. همچنین، فلوچارت روش تحقیق این مقاله در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. نحوه انجام آزمایش LWD در این تحقیق

جدول ۴. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق

ردیف	متغیر	مقدار
۱	ضخامت لایه (سانتی‌متر)	۲۰، ۳۰ و ۴۰
۲	تراکم لایه (٪)	۸۷، ۹۲ و ۹۷
۳	رطوبت (٪)	۴، ۷ و ۱۰
۴	وزنه بارگذاری (کیلوگرم)	۲۰



شکل ۲. فلوچارت تحقیق حاضر

۴. نتایج آزمایش LWD

جدول ۵، نتایج مربوط به میانگین داده‌های ثبت شده نمونه بعد از ۵ مرتبه تکرار آزمایش LWD را به ازای درصدهای مختلف رطوبت نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج اولیه نشان می‌دهد، مقدار مدول سطحی اولیه با افزایش تراکم مصالح به صورت نسبی افزایش و افت‌وخیز ژئوفون مرکزی کاهش یافته است. به عبارت دیگر، افزایش تراکم باعث افزایش تنش جانبی شده که موجب افزایش گردیده است. این نتیجه در تطابق کامل با مطالعات قبلی است. از طرفی، بررسی نتایج این بخش نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه، مدول سطحی اولیه افزایش یافته و افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه کاهش یافته است.

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از تحلیل کاسه انحنای افت‌وخیز، تعدادی آزمایش LWD در شرایط روسازی واقعی انجام شد تا نتایج آن با داده‌های افت‌وخیز مقایسه شود. نتایج آزمایش LWD در حالت میدانی با استفاده از مصالح یکسان و شرایط مشابه با شرایط آزمایشگاهی انجام شد. محور کمربندی گیلاوند در حاشیه بزرگراه پردیس- فیروزکوه با توجه به شرایط اجرایی و استفاده از مصالح مشابه برای این منظور انتخاب گردید. لایه‌های روسازی در محور مورد نظر شامل لایه زیراساس به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، لایه اساس به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر رویه آسفالتی بود که در زمان انجام آزمایش‌ها، تا لایه اساس اجرا شده بود. با مقایسه نتایج صحرایی و آزمایشگاهی، مقادیر Shift Factor که ضرایب اصلاح نتایج آزمایشگاهی خواهند بود مطابق جدول ۶ به دست آمده که اعمال آن در مقادیر جدول ۵ منجر به تخمین مقادیر واقعی‌تر از افت‌وخیز و مدول سطحی گردید.

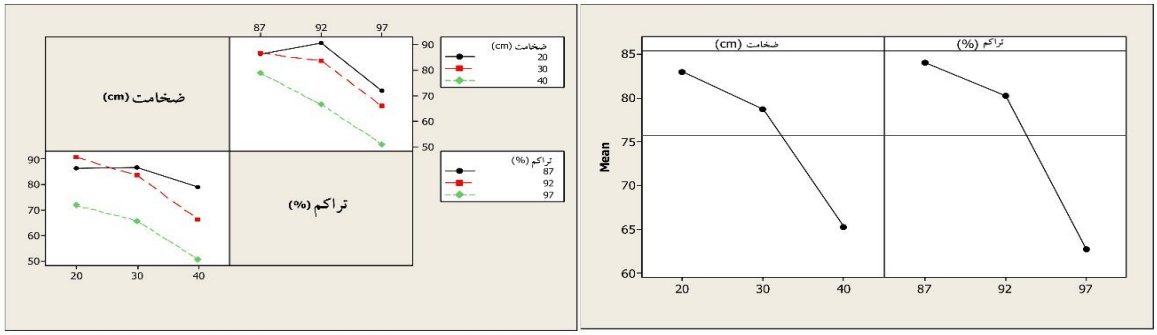
در شکل‌های ۳ تا ۵ به بررسی میزان تغییرات افت‌وخیز ژئوفون مرکزی به ازای تغییرات دو به دوی متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق پرداخته شده است. در شکل-های مورد نظر، با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد، به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر، به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵ و ۱۷ درصد افزایش یافته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که رطوبت نیز تأثیر چندانی بر افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده نداشته است. مقایسه نتایج در این بخش نشان می‌دهد که از بین سه متغیر، افت‌وخیز ژئوفون مرکزی بیشترین تأثیرپذیری را از درصد تراکم لایه داشته است.

جدول ۵. میانگین داده‌های ثبت شده در آزمایش LWD برای نمونه‌های مختلف

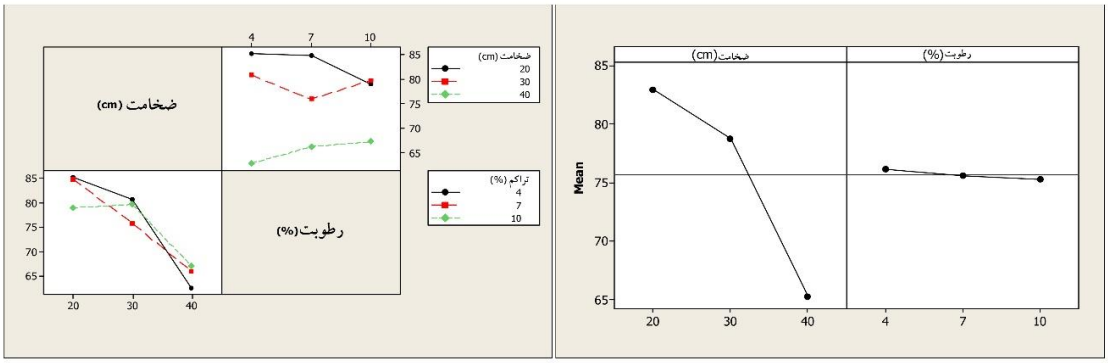
ضخامت لایه (سانتی‌متر)	تراکم (درصد)	رطوبت ۴٪		رطوبت ۷٪		رطوبت ۱۰٪	
		افت‌وخیز (میکرومتر)	مدول (مگاپاسکال)	افت‌وخیز (میکرومتر)	مدول (مگاپاسکال)	افت‌وخیز (میکرومتر)	مدول (مگاپاسکال)
۲۰	۸۷	۹۸۱/۷۶	۲۸۰/۱۴	۱۱۹۹/۶۱	۲۳۲/۲۱	۹۸۹/۵۳	۲۷۶/۳۸
	۹۲	۱۲۶۵/۲۵	۲۱۸/۷۳	۱۱۵۲/۱۱	۲۳۷/۵۵۱	۸۹۰/۱۵	۳۰۸/۹
	۹۷	۸۳۲/۴۳	۳۳۹/۵۴	۸۷۲/۸۳	۳۲۲/۲۹	۹۲۰/۵۲	۳۰۳/۷۹
۳۰	۸۷	۹۹۱/۸۹	۲۹۱/۵۶	۱۰۸۶/۰۹	۲۷۲/۷۳	۱۰۵۸/۸۷	۲۷۲/۱۶
	۹۲	۹۹۴/۶۵	۲۹۱/۲۵	۹۹۴/۶۵	۲۹۱/۲۵	۹۴۵/۵۹	۳۰۲/۸
	۹۷	۸۰۹/۰۱	۳۸۸/۷۰	۷۵۹/۵۸	۴۰۸/۵۹	۸۲۸/۰۳	۳۸۰/۰۲
۴۰	۸۷	۱۱۳۰	۲۵۱/۷	۱۰۹۵/۸۲	۲۶۴/۲۶	۹۹۲/۲۳	۲۸۷/۵۳
	۹۲	۱۰۲۸/۱۷	۲۷۵/۳	۸۴۵/۹۷	۳۴۱/۶۶	۸۸۹/۳۳	۳۲۲/۲۵
	۹۷	۲۳۱/۸۳	۶۶۹/۱	۸۳۴/۳۷	۳۴۲/۵۲	۸۳۶/۴۶	۳۴۳/۳۶

جدول ۶. مقادیر شیفت فاکتور افت‌وخیز به ازای ضخامت لایه و وزنه‌های متغیر

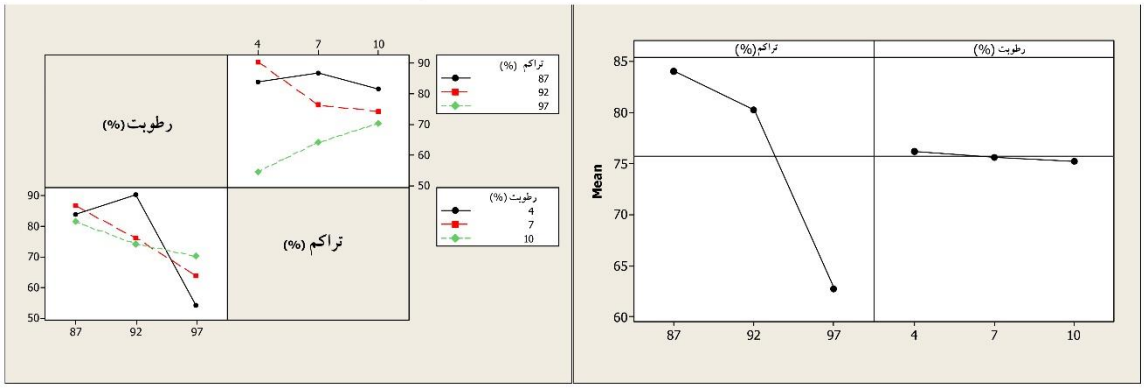
ضخامت لایه (cm)	۲۰	۳۰	۴۰
مقدار Shift Factor	۱۵۴/۵	۱۲۲	۹۱



شکل ۳. نمودار Main Effect و اندرکنش افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده بر اساس ضخامت لایه و تراکم



شکل ۴. نمودار Main Effect و اندرکنش افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده بر اساس ضخامت لایه و رطوبت

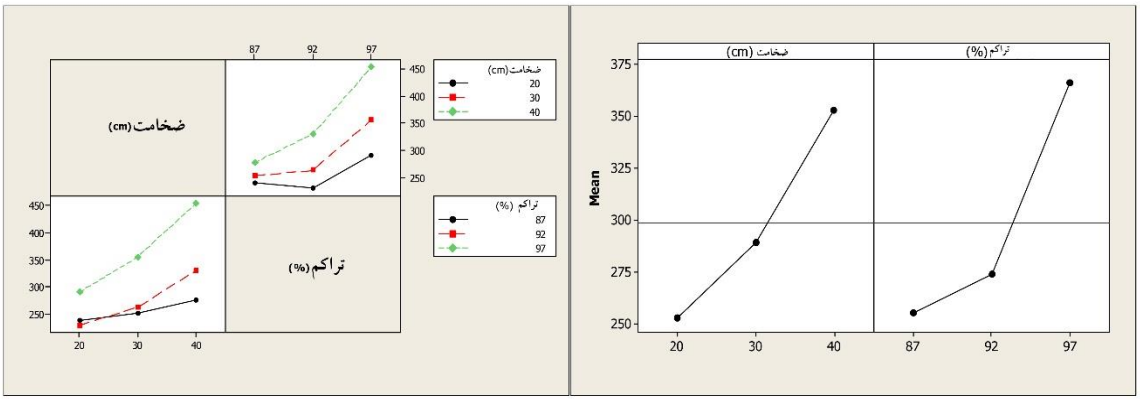


شکل ۵. نمودار Main Effect و اندرکنش افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده بر اساس تراکم و رطوبت

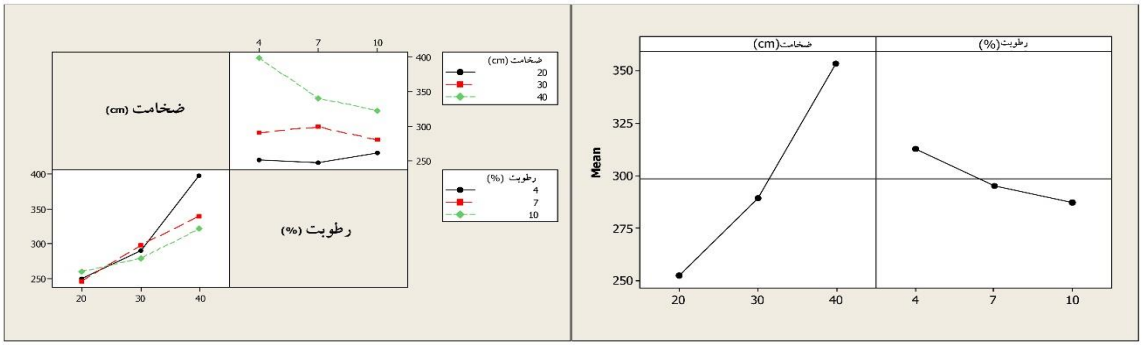
همچنین، در نمودارهای شکل‌های ۶ تا ۸ به تغییرات مقدار مدول سطحی به ازای تغییرات دو به دوی متغیرهای دیگر پرداخته شده است. با توجه به این نمودارها، افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۸ و ۳۴ درصد افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر، مدول سطحی اصلاح شده به ترتیب ۱۶ و ۲۰ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش رطوبت از ۴ به ۷ و از ۷ به ۱۰ درصد، مدول سطحی اصلاح شده به ترتیب ۶ و ۳ درصد کاهش یافته است. در این بخش نیز بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیرپذیری مدول سطحی لایه اساس از متغیر درصد تراکم بسیار بیشتر از دو متغیر دیگر بوده و لازم است تا در حین اجرای لایه به تراکم لایه توجه حداکثری گردد، زیرا کم و یا زیاد شدن آن تأثیر تا ۳۴ درصدی بر مقدار مدول سطحی لایه خواهد داشت.

به منظور تعیین محدوده‌های با افت‌وخیز و مدول یکسان در اندرکنش پارامترهای مستقل در آزمایش LWD، منحنی‌های هم‌تراز بر اساس سه پارامتر تراکم، رطوبت، و ضخامت لایه ترسیم شده‌اند. در هر منحنی، دو پارامتر که در محورهای عمودی و افقی قرار گرفته‌اند دارای مقادیر متغیر و دو پارامتر دیگر دارای مقدار ثابت سطح وسط می‌باشند. نمودارهای هم‌تراز افت‌وخیز و مدول سطحی در شکل‌های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده است.

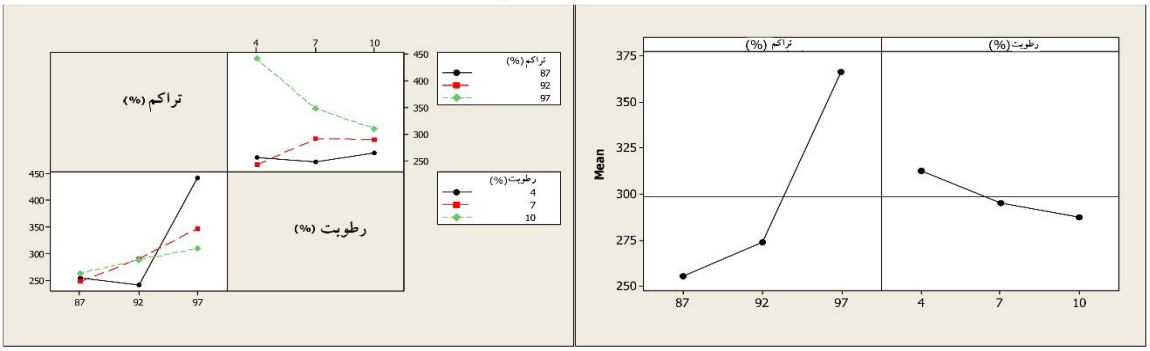
همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، محدوده مدول سطحی اصلاح شده بین ۱۷۵ تا ۵۰۰ مگاپاسکال بوده که بیشترین آن مربوط به حالت تراکم ۹۷٪ و ضخامت لایه ۴۰ سانتی‌متر و کمترین آن مربوط به حالت تراکم ۸۷٪ و ضخامت لایه ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.



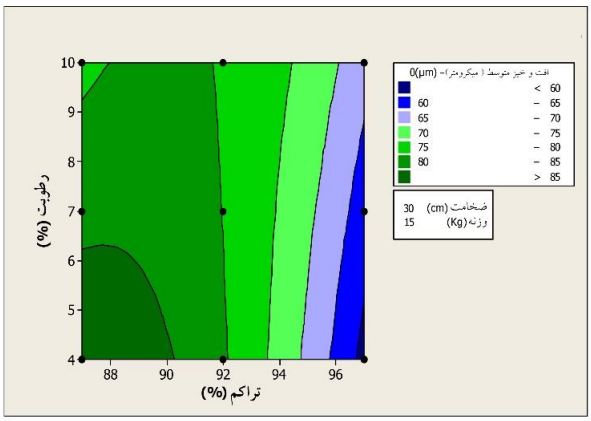
شکل ۶. نمودار Main Effect و اندرکنش مدول اصلاح شده بر اساس ضخامت لایه و تراکم



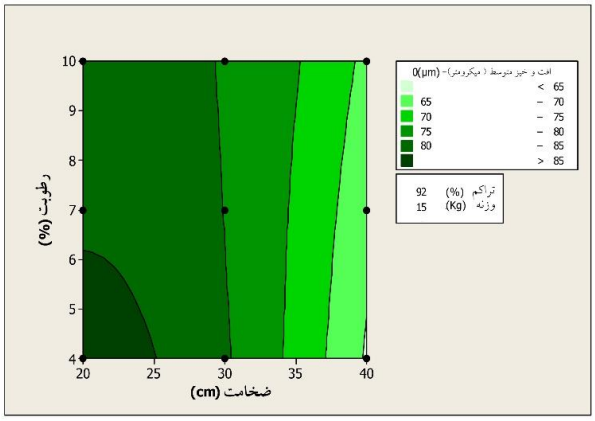
شکل ۷. نمودار Main Effect و اندرکنش مدول اصلاح شده بر اساس ضخامت لایه و رطوبت



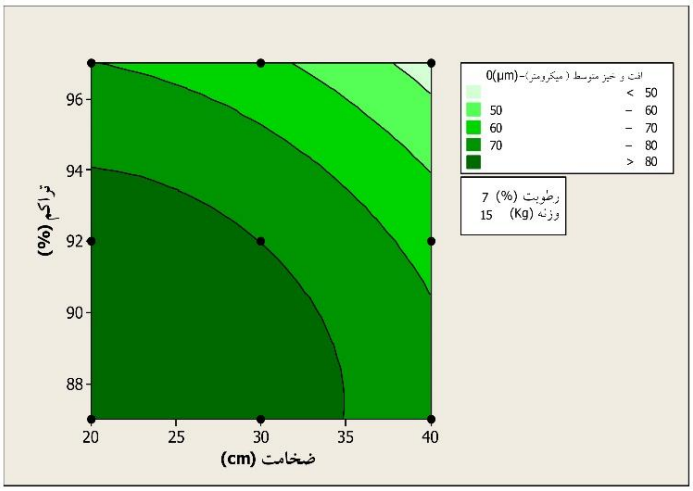
شکل ۸. نمودار Main Effect و اندرکنش مدول اصلاح شده بر اساس تراکم و رطوبت



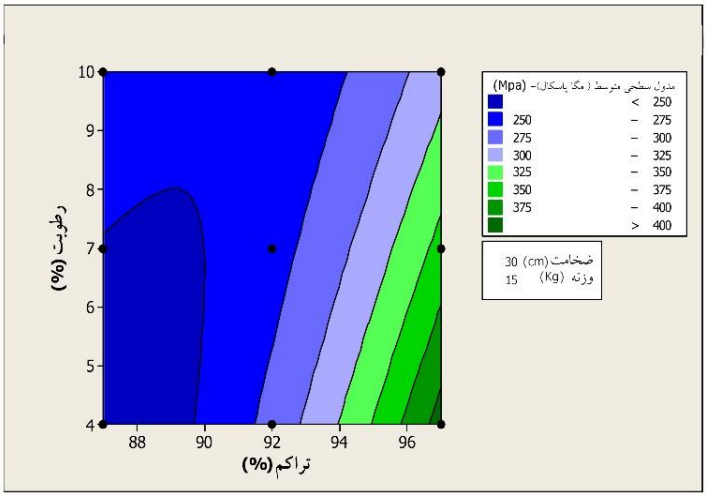
شکل ۹. نمودارهای هم‌تراز افت‌وخیز ژئوفون مرکزی بر حسب رطوبت و تراکم



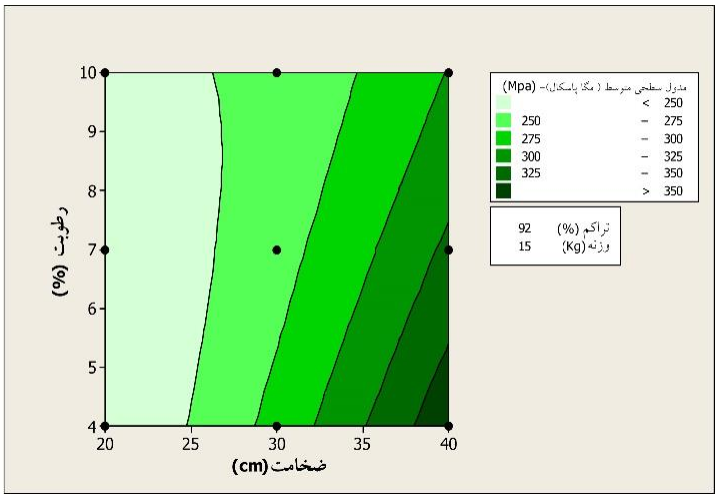
شکل ۱۰. نمودارهای هم‌تراز افت‌وخیز ژئوفون مرکزی بر حسب رطوبت و ضخامت لایه



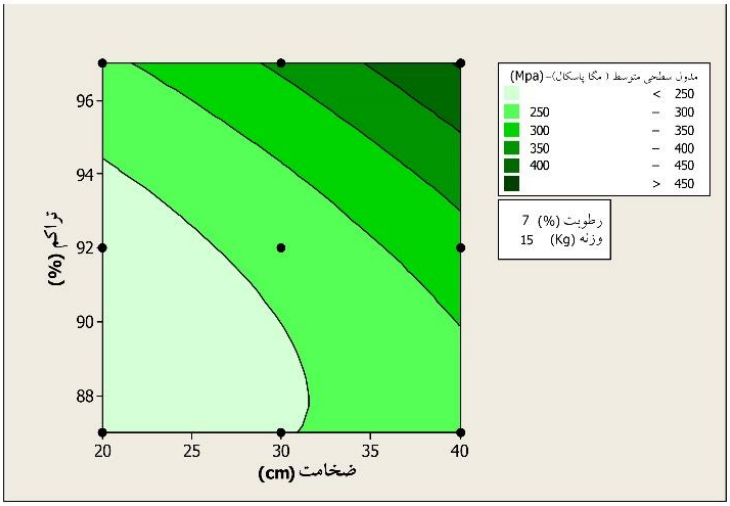
شکل ۱۱. نمودارهای هم‌تراز افت‌وخیز ژئوفون مرکزی بر حسب ضخامت لایه و تراکم



شکل ۱۲. نمودارهای هم‌تراز مدول سطحی بر حسب رطوبت و تراکم



شکل ۱۳. نمودارهای هم‌تراز مدول سطحی بر حسب رطوبت و ضخامت لایه



شکل ۱۴. نمودارهای هم‌تراز مدول سطحی بر حسب ضخامت لایه و تراکم

۵. نتیجه‌گیری

عمده نتایج حاصل از این تحقیق به‌صورت موارد زیر می باشد:

- نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر، افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه به ترتیب ۲۰ و ۱۹ درصد کاهش یافته است. همچنین، با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد، افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه به ترتیب ۳ و ۱۰ درصد کاهش یافته است. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش رطوبت تأثیر بسیار اندکی بر افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه داشته است.
- با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد، مدول سطحی اولیه به ترتیب ۳ و ۱۳ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر، مدول سطحی اولیه به ترتیب ۱۸ و ۲۳ درصد افزایش یافته است. تأثیر پارامتر دیگر یعنی رطوبت نیز بسیار کم بوده است.
- نتایج پس از اعمال ضرایب Shift Factor نشان داد که افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد، افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده را به ترتیب ۵ و ۲۱ درصد کاهش داده است. همچنین، افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر سبب افزایش افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده به میزان ۵ و ۱۷ درصد گردیده است. رطوبت نیز تأثیر چندانی بر افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده نداشته است.
- با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد، مدول سطحی اصلاح شده به ترتیب ۸ و ۳۴ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر، مدول سطحی اصلاح شده به ترتیب ۱۶ و ۲۰ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش رطوبت از ۴ به ۷ و از ۷ به ۱۰ درصد، مدول سطحی اصلاح شده به ترتیب ۶ و ۳ درصد کاهش یافته است.
- محدوده افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده بین ۴۰ تا ۱۱۰ میکرون بوده است. همچنین، محدوده مدول سطحی اصلاح شده بین ۱۷۵ تا ۵۰۰ مگاپاسکال بوده که بیشترین آن مربوط به حالت تراکم ۹۷٪ و ضخامت لایه ۴۰ سانتی‌متر و کمترین آن مربوط به حالت تراکم ۸۷٪ و ضخامت لایه ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.
- مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تأثیرپذیری مدول سطحی و افت‌وخیز ژئوفون مرکزی لایه اساس از متغیر درصد تراکم بسیار بیشتر از دو متغیر دیگر بوده و لازم است تا در حین اجرای لایه به تراکم لایه توجه حداکثری گردد، زیرا کم و یا زیاد شدن آن تأثیر تا ۳۴ درصدی بر مقدار مدول سطحی لایه و ۲۱ درصدی بر افت‌وخیز آن خواهد داشت.

۶. مراجع

ASTM E2583. 2007. “Standard test method for measuring deflections with a light weight deflectometer (LWD)”. Book of Standards, Volume 04.03, ASTM International.

Brazvan, S., Ziksari, A., Ghorbani, M. and Shourmij, A. 2014. “The comparison between LWD and FWD test results and simulation with finite element ABAQUS software”. Transport. Res. J., 10(2). (In Persian).

Fakhri, M. and Brazvan, S. 2014. “Correlation of LWD, CBR and cyclic-triaxial tests”. Modares Civ. Eng. J., 14(2): 95-103. (In Persian).

Freire, A., Neves, J. and Pestana, R. 2010. “Analysis of recycled aggregates properties for unbound granular asphalt pavement layers”. International Conference on Asphalt Pavements, Japan.

Hussain, J., Wilson, D. J., Henning, T. F. P. and Alabaster, D. 2014. “Comparing results between the repeated load triaxial test and accelerated pavement test on unbound aggregate”. J. Mater. Civ. Eng., 26(3): 476-483

Iran Highway Asphalt Paving Code, No. 234. 2013. Asphalt Institute of Iran. (In Persian).

Khavandi, A. and Khaksar, M. 2017. “Correlation of LWD, CBR and cyclic-triaxial tests”. 1st National Conference on Road and Transportation, Guilan, Iran. (In Persian).

Rafiei, K. and Kavussi, A. 2010. “Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers”. J. Civ. Eng. Manage., 16(1): 123-129.

Sigardur, E., Shafiqur, R. and Salour, R. 2017. “Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi stage RLT testing”. Transport. Geotech., 13: 28-42.

Siripun, K., Jitsangiam, P. and Nikraz, H. 2012. “The design model of unbound granular materials for flexible pavement”. Austral. J. Civ. Eng., 10(1): 122-129.

Steinert, B. C., Humphrey, D. N. and Kestler M. A. 2005. “Portable falling weight deflectometers study”. University of Maine, NETC Project No. 00-4.

Yohannes, B., Hill, K. M. and Khazanovich, L. 2009. “Mechanistic modeling of unbound granular materials”. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, USA.