

ارزیابی اندرکنش پارامترهای مؤثر بر خصوصیات مکانیکی مصالح دانه‌ی غیرچسبنده‌ی لایه‌ی اساس روسازی آسفالتی

محمد رضا احدی* (دانشیار)

پژوهشکده‌ی حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

سید فرزاد میرهاشمی (کارشناسی ارشد)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

مصطفی صادق‌نژاد (دکتری)

پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوره ۲ - ۳۶، شماره ۲/۴، ص. ۳-۱۴

در روش‌های طراحی روسازی‌های آسفالتی توجه کم‌تری به لایه‌های اساس و زیراساس شده و بیشتر تحقیقات بر نقش لایه‌ی آسفالتی متمرکز است؛ درحالی که این لایه‌ها نقش مهمی در کاهش تنش‌های وارد به بستر ایفا می‌کنند. بنابراین لزوم بررسی رفتار آن‌ها قبل از استفاده از اهمیت بالایی برخوردار است. آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌یی به منظور تعیین قدرت باربری لایه‌های غیرچسبنده‌ی روسازی استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایش دستگاه LWD بر روی بستر نمونه‌ی ساخته شده به ابعاد $150 \times 150 \times 60$ سانتی‌متر، تأثیرات هم‌زمان متغیرهایی مانند ضخامت نمونه، رطوبت، وزنه و تراکم بر مدول سطحی و افت‌وخیز لایه‌ی اساس سنجیده می‌شود. نتایج نشان داد بیشترین مقدار مدول مربوط به تراکم ۹۷٪ و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و کم‌ترین آن مربوط به وزنه ۱ کیلوگرم و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر است. هم‌چنین مطابق نتایج، افزایش تراکم و ضخامت لایه سبب کاهش و افزایش جرم وزنه سبب افزایش افت‌وخیز می‌شود و رطوبت تأثیر چندانی ندارد.

واژگان کلیدی: روسازی آسفالتی، لایه‌ی اساس، مصالح دانه‌یی، اندرکنش و افت‌وخیز، تراکم.

m.ahadi@bhrc.ac.ir
sfmh.civil.eng@gmail.com
mostafa.sadeghnejad@gmail.com

۱. مقدمه

اصولی، تعداد بارگذاری، مقدار رطوبت، تاریخچه‌ی تنش، چگالی، دانه‌بندی، مقدار ریزدانه و ویژگی‌های فیزیکی ذرات سنگ‌دانه‌هاست.^[۱] رفتار این مصالح در کوتاه‌مدت و بلندمدت متفاوت است و به سبب خاصیت الاستوپلاستیکی که دارا هستند، رفتار پیچیده‌یی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، لزوم بررسی رفتار آن‌ها قبل از به‌کار بردن در لایه‌های روسازی و هم‌چنین مقایسه‌ی رفتاری بین انواع مصالح از اهمیت بالایی برخوردار است که ماحصل این امر انتخاب بهترین نوع مصالح برای روسازی و بهترین شرایط دانه‌بندی، رطوبتی و تراکم است.^[۲] از مناسب‌ترین آزمایش‌ها به‌منظور ارزیابی رفتار مصالح دانه‌یی غیرچسبنده آزمایش تسریع شده‌ی روسازی (APT)^۱ است. در این آزمایش تمام شرایط روسازی واقعی شبیه‌سازی می‌شود؛ اما سختی تکرارپذیری آن از یک سو و هم‌چنین صرف هزینه زمان طولانی انجام آزمایش از سوی دیگر از نکات منفی این آزمایش است.^[۵] از طرفی پرکاربردترین آزمایشی که رفتار مصالح غیرچسبنده را ارزیابی می‌کند، آزمایش سه‌محوری با بارگذاری تکراری است. این آزمایش نیز با وجود این که عموماً در دسترس است (هزینه و زمان کمی برای انجام آن نیاز است و به راحتی قابلیت

مصالح دانه‌یی غیرچسبنده از اعضای جدانشدنی روسازی آسفالتی است که به طور گسترده‌یی در لایه‌های اساس و زیراساس استفاده می‌شوند. ظرفیت باربری این مصالح، مبتنی بر قفل و بست اجزای سنگ‌دانه‌یی است.^[۱] مصالح سنگ‌دانه‌یی هنگامی که تحت بار دینامیکی قرار گیرند از خود دو نوع تغییر شکل ارتجاعی و ماندگار نشان می‌دهند. تغییر شکل ارتجاعی (که ممکن است کشسانی یا غیرکشسانی باشد) می‌تواند منجر به ایجاد ترک خستگی در لایه‌های بالایی شود و تغییر شکل ماندگار (خمیری)، شیارشدگی در مسیر چرخ‌ها را به همراه داشته باشد.^[۲] رفتار ارتجاعی این مصالح می‌تواند توسط برخی پارامترها از قبیل سطح تنش، تنش همه‌جانبه، جابه‌جایی تنش‌های اصلی، روش تراکم، چگالی، مقدار آب، تاریخچه‌ی تنش و چرخه‌ی ذوب و یخ‌بندان تحت تأثیر قرار بگیرد. هم‌چنین رفتار تغییر شکل ماندگار نیز متأثر از عواملی هم‌چون سطح تنش، فشار همه‌جانبه، چرخش نسبت به تنش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۲/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۹/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۰

DOI:10.24200/J30.2020.52968.2521

تکرار دارد). قادر به شبیه‌سازی شرایط واقعی تنش نیست و هم‌چنین شرایط رطوبتی آن نیز با شرایط روسازی واقعی بسیار متفاوت است.^[۶] با توجه به مباحث ذکر شده، انتخاب شرایط آزمایشی که بتواند دقیقاً شرایط تنش واقعی وارد شده به روسازی را شبیه‌سازی کند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بین دستگاه آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌ی قابل حمل (PFWD)^۲ نمونه‌ی سبک و قابل حمل بدون نیاز به ماشین دستگاه (FWD)^۳ است که معمولاً به‌منظور تعیین قدرت باربری لایه‌های غیرجسبیده روسازی استفاده می‌شود.^[۷] با وجود تمام مزایای گفته شده، در مدل‌های توسعه داده شده به‌منظور تحلیل رفتار مصالح دانه‌ی غیرجسبیده بیشتر از آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌ی، CBR و R-Value استفاده شده است. از طرفی عدم تطابق روش بارگذاری در این آزمایش‌ها با بارگذاری در حالت واقعی روسازی^[۸]، استفاده از آزمایش PFWD را که شبیه‌سازی بیشتری با حالت واقعی بارگذاری روسازی دارد، توجیه می‌کند.

در تحقیقات گذشته به بررسی تأثیر تک به تک و جداگانه‌ی پارامترهای متغیر بر روی دستگاه پرداخته شده است؛ اما در این تحقیق اندرکنش تأثیر پارامترهای مستقل نمونه با یکدیگر بررسی می‌شود. در نتیجه هدف مورد نظر در این تحقیق اولاً انتخاب شرایط آزمایشگاهی است که بتواند دقیقاً شرایط تنش واقعی وارد شده به لایه‌ی اساس روسازی را شبیه‌سازی کند، ثانیاً بررسی اندرکنش پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت و سختی نمونه است تا با انتخاب مناسب‌ترین شرایط برای مصالح سنگی، میزان خرابی‌های مصالح دانه‌ی غیرجسبیده کاهش یابد.

۲. تحقیقات انجام شده روی مصالح غیرجسبیده

میزان مدول سختی دستگاه (LWD)^۴ تابع عوامل مختلفی است. براساس مطالعه‌ی جیتاریکول و همکاران (۲۰۱۷)^۵ این مقدار وابسته به مصالح مصرفی، رطوبت، وزن مخصوص، ضخامت لایه و تراکم آن است.^[۹] آماشانکار و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه‌ی میدانی از دستگاه LWD به عنوان جایگزینی سریع، اقتصادی و راحت برای آزمایش مخروط ماسه استفاده کردند تا مدول سختی لایه‌های مختلف روسازی را با آن بسنجند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مدول سختی LWD وابستگی بسیار بالایی به مدول سختی لایه‌ی رویه خواهد داشت.^[۱۰] براساس مطالعات استینرت^۵ (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 صفحه‌ی بارگذاری است؛ در صورتی که برای وزنه‌ی 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؛ بنابراین میزان خیز، متأثر از قسمت سخت‌تر روسازی است و در نتیجه مدول بزرگ‌تری را نتیجه می‌دهد.^[۱۱]

حسین^۶ و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی نشان دادند که اثر ارتفاع سقوط وزنه روی مدول LWD چشم‌گیر نیست، به‌گونه‌ی که ارتفاعات مختلف، مدول مشابهی را نتیجه می‌دهند. براساس این مطالعات، مهم‌ترین پارامتر در میزان مدول محاسبه شده، اندازه‌ی صفحه‌ی بارگذاری است و مدول E^۰ به دست آمده از صفحه‌ی ۱۰۰ میلی‌متری حدود ۱/۵ برابر بیشتر از مدول صفحه‌ی ۳۰۰ میلی‌متری است. هم‌چنین نتایج این تحقیق دلالت بر ارجح بودن صفحه‌ی ۳۰۰ میلی‌متری نسبت به صفحه ۱۰۰ میلی‌متری داشت.^[۱۲]

فلمینگ^۷ تأثیر دما روی ضربه‌گیر را با انجام آزمایش در سه دمای مختلف روی کف بتنی آزمایشگاه و با ارتفاع سقوط ثابت بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان داد که میزان مدول سختی با تغییر دما ثابت می‌ماند و فقط میزان طول پالس بار با بیشتر شدن دما افزایش می‌یابد.^[۱۳] رفیعی (۲۰۱۰)^۸ به‌منظور ارزیابی تأثیر وزنه‌ی بارگذاری در پروژه‌های مختلف، وزنه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرمی را با ارتفاع سقوط معین و یک صفحه‌ی ثابت بارگذاری به کار گرفت و میزان مدول سختی برای هر حالت را محاسبه کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که در کلیه‌ی پروژه‌ها با افزایش مقدار وزنه (در سه محدوده‌ی مورد بررسی)، مدول سختی افزایش می‌یابد. زیرا وقتی از وزنه‌های سنگین‌تر استفاده می‌شود، وزن دستگاه و میزان تنش‌های استاتیکی جانبی قبل از بارگذاری افزایش می‌یابد و افزوده شدن تنش‌های جانبی نیز باعث افزایش مدول سختی می‌شود.^[۱۴]

هم‌چنین رفیعی (۲۰۱۰)^۸ در تحقیقی دیگر به 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 داد. در کل آزمایش‌ها وزنه‌ی ثابت ۱۵ کیلوگرمی و با صفحه‌ی ۳۰۰ میلی‌متری به کار گرفته شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تغییر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، تأثیر مهمی در تغییر مدول سختی ندارد (بیشینه‌ی ضریب تغییرات برابر ۰/۶٪ است). علت این مسئله آن است که برای مصالح سنگ‌دانه‌ی که مقاومت آن‌ها به اصطکاک بین دانه‌ی 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.^[۱۴]

در صورتی که از دو ژئوفون اضافی علاوه بر ژئوفون مرکزی برای ثبت خیز سطحی استفاده شود، می‌توان مدول سختی لایه‌ها را براساس محاسبات معکوس به‌دست آورد. روش شارپ فواصل ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری نسبت به مرکز صفحه بارگذاری را برای آرایش شش ژئوفون جانبی دستگاه FWD پیشنهاد کرده است. در این دستورالعمل، آرایش نامنظم ژئوفون‌ها و تراکم بیشتر در ناحیه‌ی نزدیک بار برای شناسایی بهتر حوضچه‌ی افت‌وخیز و لحاظ تغییرات آن مدنظر قرار گرفته است. اما برای تعیین فواصل دو ژئوفون اضافی دستگاه LWD دستورالعملی ارائه نشده است. برای بررسی این موضوع و تعیین تأثیر این فواصل بر مدول سختی لایه‌ها، یوهانس و همکاران (۲۰۰۹)^۹ در تحقیقی ژئوفون‌های اضافی (دستگاه) به ترتیب در فواصل ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۵ و ۴۵-۳۰ سانتی‌متر قرار داده و در هریک از این فواصل، آزمایش LWD چندین بار تکرار شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان مدول‌ها برای فواصل ۲۰-۴۵ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر تا حدود زیادی به یکدیگر نزدیک است و میزان مدول‌های فواصل ۲۰-۳۰ سانتی‌متر در بیشتر نقاط با آن‌ها متفاوت است.^[۱۵]

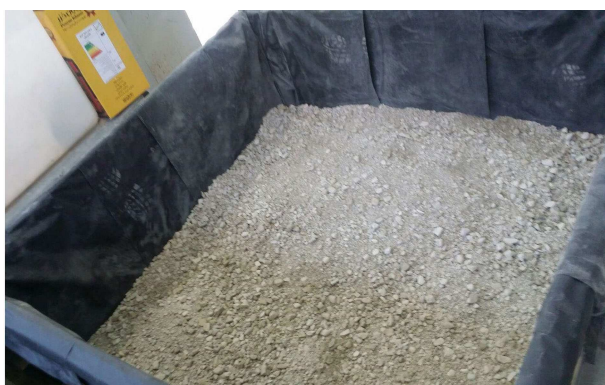
۳. مصالح و آزمایش‌ها

۱.۳. مصالح سنگی

با توجه به موضوع این تحقیق، دانه‌بندی انتخاب شده از نوع پیوسته است که برای لایه‌ی اساس استفاده می‌شود. این دانه‌بندی مطابق با منحنی دانه‌بندی شماره ۳ نشریه‌ی ۲۳۴ راه‌های آسفالتی ایران^[۱۶] و از معادن غرب تهران انتخاب شده است. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی در جدول ۱ نشان داده شده است. هم‌چنین مشخصات

جدول ۱. دانه‌بندی مورد استفاده برای مصالح سنگی لایه‌ی اساس مورد استفاده در این تحقیق.

اندازه الک	دانه‌بندی شماره ۳ نشریه ۲۳۴ راه‌های آسفالتی	
	حد پایین رد شده (%)	حد بالای رد شده (%)
۵۰ (mm)	۱۰۰	-
۲۵ (mm)	۷۵	۹۵
۹٫۵ (mm)	۴۰	۷۵
۴٫۷۵ (mm)	۳۰	۶۰
۲ (mm)	۲۰	۴۵
۰٫۴۲۵ (mm)	۱۵	۳۰
۰٫۰۷۵ (mm)	۲	۸



شکل ۱. آماده کردن نمونه‌ی مخلوط سنگ دانه‌بی.

جدول ۲. وزن مخصوص‌های مصالح سنگی مورد آزمایش.

شرح	روش آزمایش	مصالح سنگی مورد استفاده
وزن مخصوص واقعی (g/cm^3)	ASTM C ۱۲۷	۲٫۴۶۸
وزن مخصوص ظاهری (g/cm^3)	ASTM C ۱۲۷	۲٫۶۲۸
درصد جذب آب	ASTM C ۱۲۷	۱٫۵۸

مربوط به وزن مخصوص و مرغوبیت مصالح سنگی به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

۲.۳. متغیرهای تحقیق

پس از مرور تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی خصوصیات مصالح سنگ‌دانه‌یی و عوامل مؤثر بر انتخاب آن‌ها در لایه‌ی اساس و زیراساس، عوامل تأثیرگذار جمع‌بندی شد. با توجه به این تحقیقات، عواملی هم‌چون ویژگی‌های فیزیکی از قبیل شکل و اندازه و هم‌چنین میزان تراکم، دانه‌بندی، ضخامت، و درصد رطوبت مشخص شد.^[۱۷] با بررسی همه‌جانبه بر روی تحقیق و انجام مشورت با محققان مختلف و با توجه به امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری موجود و وجود محدودیت‌هایی هم‌چون محدودیت زمانی و مالی، سرانجام چهار عامل مؤثر بر انتخاب مصالح سنگ‌دانه‌یی غیرچسبیده مطابق جدول ۴ انتخاب شد.

۳.۳. مراحل ساخت قالب و نمونه

به منظور ساخت نمونه ابتدا باید قالبی به‌منظور انجام آزمایش تهیه می‌شد. پس از تعیین بیشینه‌ی وزن مخصوص نظری 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 برای انجام آزمایش به ابعاد $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر با وزن ۱۳۰ کیلوگرم ساخته شد و حسگرهای مربوط به ترازوی دیجیتال برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها به آن متصل شد.^[۱۵] این ترازو با دقت $۰٫۰۵$ کیلوگرم قادر به اندازه‌گیری وزن مصالح بود. بعد از تراز کردن محل قرارگیری قالب درون آن توسط کیسه‌های پلاستیکی ضخیم برای جلوگیری از خروج آب و عدم ایجاد تغییر در میزان رطوبت نمونه‌ها به‌طور کامل در دولا به پوشانیده شد. به منظور استحکام هر چه بیشتر قالب، اطراف و زیر آن توسط پروفیل‌های فازی کاملاً مهار شد تا ضرب‌های ناشی از دستگاه متراکم‌کننده نمونه باعث جدا شدن دیواره‌ها و کف قالب از یکدیگر نشود. با توجه به ضخامت و درصد تراکم‌های مورد نیاز در تحقیق، جرم مورد نیاز مصالح با درصد رطوبت مورد نیاز آزمایش اول یعنی ۴ درصد محاسبه شد. به

منظور بالا بردن میزان رطوبت مصالح تا درصد رطوبت مورد نظر، میزان آب مورد نیاز محاسبه و اندازه‌گیری شد. سپس آب به‌صورت تدریجی به مصالحی که در حال هم‌زدن و اختلاط با یکدیگر درون قالب بودند، اضافه شد تا ترازوی متصل به قالب عدد مورد نظر را نشان دهد. بعد از این که مصالح با یکدیگر به خوبی مخلوط شدند و رطوبت در کل نمونه به صورت یکسان تا درصد رطوبت مورد نظر بالا رفت، سطح نمونه به وسیله شمشه‌ی فلزی صاف شد؛ هم‌چنین کنترل پراکندگی درشت‌دانه‌ها نیز به‌صورت چشمی انجام گرفت تا در تمام نقاط نمونه شرایط یکسان شود. سپس با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده، نمونه به میزان تراکم مورد نظر رسید و کنترل درصد تراکم به روش مخروط ماسه انجام پذیرفت. برای حصول اطمینان از متراکم شدن نمونه و کنترل ضخامت مورد نظر در هر مرحله از آزمایش بعد از پایان تراکم نمونه، ۱۲ نقطه از سطح نمونه از نظر ارتفاع تا لبه‌ی بالایی قالب کنترل می‌شد. در مرحله‌ی اول نمونه با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۸۷ درصد آماده شد (شکل ۱). مراحل بیان شده برای تمام حالات متغیرهای این تحقیق (مجموعاً ۸۱ حالت) صورت پذیرفت.

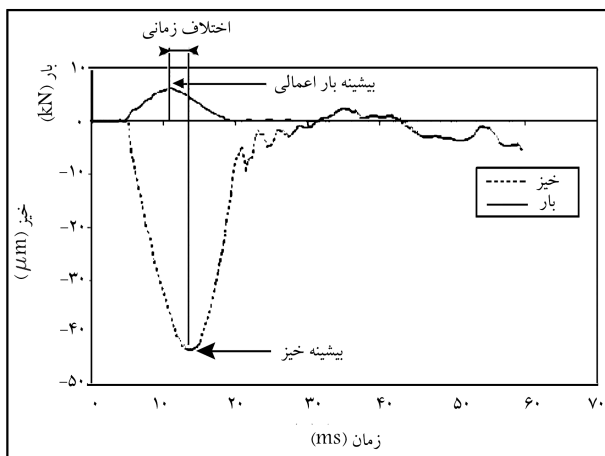
۴.۳. آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌یی سبک (LWD)

دستگاه افت‌وخیزسنج ضربه‌یی سبک مورد استفاده در این تحقیق نوع قابل حمل دستی یا به کمک چرخ PFWD ساخته شده توسط شرکت دانمارکی Dynatest است که مشخصات آن به شرح جدول ۵ است. دستگاه LWD بارهای ضربه‌یی را به منظور شبیه‌سازی بارگذاری ناشی از حرکت چرخ به سطح روسازی وارد می‌کند. بارگذاری دستگاه به شکل نیمه‌سینوسی انجام می‌شود.^[۱۸] سازوکار کلی دستگاه به این صورت است که ابتدا صفحه‌ی بارگذاری و ژئوفون‌ها بر 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 حاصل حدوداً در مدت ۲۵ میلی‌ثانیه به سطح وارد می‌شود و به میزان بیشینه‌ی خود می‌رسد و برداشته می‌شود. بعد از اعمال تنش میزان افت‌وخیز ایجاد شده در سطح روسازی توسط ژئوفون‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.^[۱۹] هم‌چنین در هنگام برخورد وزنه با ضربه‌گیرها، نیروسنج نیروی وارده را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. نرم‌افزار تحلیل داده‌های دستگاه LWD که قابلیت تعریف ۳ لایه و محاسبه‌ی مدول هر یک از آن‌ها را دارد LWD Mood نام دارد. شکل ۲ نحوه‌ی انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پیش از واسنجی حسگرهای اندازه‌گیری بار و میزان افت‌وخیز، باید بخش سخت‌افزاری دستگاه را از طریق پنج بار سقوط وزنه و کنترل تغییرات نسبی نتایج در

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده.

آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه	
		بیشینه	کمینه
سایش به روش لس آنجلس (%)	ASTM C ۱۳۱	۲۵	-
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)	ASTM C ۸۸	۸	-
شکستگی (%)	ASTM D ۵۸۲۱	-	۶۰
سنگ دانه های پهن و دراز (درصد)	ASTM D ۴۷۹۱	۱۵	-
دامنه ی خمیری	AASHTO T ۸۹	۴	-
حد روانی	AASHTO T ۹۰	۲۵	-
ارزش ماسه یی	AASHTO T ۱۷۶	-	۴۰



شکل ۳. تاریخچه ی زمانی خیز و بار اعمال شده روی صفحه ی بارگذاری.

است. نحوه ی واسنجی بر اساس دستورالعمل کارخانه ی سازنده صورت می گیرد.^[۲۱] در آزمایش LWD تاریخچه ی زمانی خیز و بار اعمال شده روی صفحه ی بارگذاری مطابق شکل ۳ ثبت می شود؛ ولی معمولاً فقط مقادیر بیشینه ی بار و خیز برای تخمین مدول سختی مصالح به کار گرفته می شود. بر اساس نظریه ی بوسینسک^۸ و با فرض بارگذاری ثابت، مقدار مدول LWD بر اساس خیز ژئوفون مرکزی مطابق رابطه ی ۱ است:^[۲۱]

$$E_s = \frac{f(1 - \nu^2)P}{\pi \cdot a \cdot D_s} \quad (1)$$

در این رابطه P بیشینه ی بار وارده روی صفحه ی بارگذاری، D_s بیشینه ی خیز ژئوفون مرکزی، ν ضریب پواسون، a شعاع صفحه ی بارگذاری و f پارامتر سختی صفحه ی بارگذاری است که به توزیع تنش زیر صفحه و صلبیت صفحه بستگی دارد. این پارامتر f برای صفحه ی صلب $\pi/2$ برای صفحه ی انعطاف پذیر ۲ است، ولی هیچ روند منطقی برای تعیین یک مقدار مناسب برای حالت بینابین وجود ندارد. در اغلب مطالعات، $f = 2$ در نظر گرفته شده است در حالی که در بررسی گیورگ^۹ (۲۰۰۶) فرض شده است که صفحه نه کاملاً صلب و نه کاملاً انعطاف پذیر است و مقدار $f = 1.79 = (\pi/2 + 2)/2$ و یا 1.8 بهترین تقریب است.^[۲۲]

هم چنین استفاده از مقادیر بیشینه ی بار و خیز در رابطه ی (۱) مسئله قابل بحثی است و ممکن است از بار بیشینه و خیز متناظر آن استفاده شود که نتایج آن نسبت به حالت اول، مدول بیشتر و تغییرات کمتری را نتیجه می دهد. با این حال هیچ کدام از این روش ها بیانگر مدول واقعی مصالح نیست؛ زیرا در این روش ها اثرات بالقوه ی بارهای دینامیکی به طور کامل دیده نشده است. یک روش برای محاسبه ی دقیق تر

جدول ۴. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق

ردیف	متغیر	مقادیر
۱	ضخامت لایه (cm)	۲۰، ۳۰ و ۴۰
۲	تراکم لایه (%)	۸۷، ۹۲ و ۹۷
۳	وزنه بارگذاری (kg)	۱۰، ۱۵ و ۲۰
۴	رطوبت (%)	۷، ۴ و ۱۰

جدول ۵. مشخصات دستگاه LWD مدل Dynatest.^[۱۸]

وزن کلی دستگاه (kg)	۲۲
تعداد ژئوفون ها	۱-۲-۳
قطر صفحه بارگذاری (m)	۰/۱-۰/۱۵-۰/۲-۰/۳
وزنه ها (kg)	۱۰-۱۵-۲۰
محدوده بارگذاری (KN)	بیشینه ۱۵
ارتفاع سقوط (cm)	بیشینه ۸۵



شکل ۴. استقرار دستگاه بر روی نمونه ی آماده شده.

بیشینه ی میزان بارگذاری بررسی کرد. بیشترین میزان بار اعمالی که توسط حسگرهای اندازه گیری بار ثبت شده می شود، نباید با یکدیگر بیش از ۳ درصد اختلاف داشته باشند.^[۲۰] اگر میزان اختلاف بیش از این بازه مجاز باشد، کنترل ارتفاع سقوطی، اطمینان از تمیز بودن سخت افزار، فشرده بندی ها و ضربه گیرهای دستگاه ضروری است. اجزایی که کارایی مناسب ندارند، قبل از انجام واسنجی باید تعمیر یا تعویض شوند تا اطمینان حاصل شود که میزان نیروهای افقی و برشی به کمترین مقدار تقلیل یافته

نسبت داد که بار وارد شده در محاسبه‌ی مدول سطحی تأثیر دارد. هم‌چنین نتایج 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 می‌شود که موجب افزایش شده است که این نتیجه در تطابق کامل با مطالعات قبلی است. از طرفی بررسی نتایج این بخش نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌ی مدول سطحی اولیه افزایش یافته و افت‌وخیز اولیه‌ی ژئوفون مرکزی کاهش یافته است.

با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه ۳۲٪ و ۳۶٪ افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه ۲۰٪ و ۱۹٪ کاهش یافته است. با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه ۳٪ و ۱۰٪ کاهش یافته است. افزایش رطوبت تأثیر بسیار اندکی بر به ترتیب افت‌وخیز ژئوفون مرکزی اولیه داشته است.

با بررسی نمودارهای این قسمت مشخص می‌شود که تراکم و ضخامت لایه تأثیر بیشتری بر روی مدول سطحی اولیه داشته است. با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب مدول سطحی اولیه ۳٪ و ۱۳٪ افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی‌متر به ترتیب مدول سطحی اولیه ۱۸٪ و ۲۳٪ افزایش یافته است. تأثیر دو پارامتر دیگر رطوبت و جرم وزنه بسیار کم بوده است.

با توجه به این که آزمون LWD در شرایط آزمایشگاهی و درون جعبه‌ی چوبی انجام شده است، دچار خطاهایی هم‌چون افزایش افت‌وخیز ناشی از لرزش جعبه و عدم یکسان بودن نتایج با شرایط میدانی خواهد بود. به منظور حذف خطاهای آزمایشگاهی، با قرار دادن ژئوفون‌های اضافی در فواصل ۷، ۸ و ۹ سانتی‌متری از مرکز بارگذاری و قرائت افت‌وخیزهای متناظر با هر کدام، می‌توان منحنی کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز^۱ را برای هر حالت بارگذاری ترسیم کرد.

با توجه به این که متغیر ضخامت لایه و جرم وزنه بر روی افت‌وخیز تأثیر بسزایی دارند، با در نظر گرفتن مقادیر متغیر برای این دو پارامتر و مقادیر ثابت حد وسط در آزمایش‌ها برای تراکم معادل ۹۲٪ و رطوبت معادل ۷٪، در ۹ حالت افت‌وخیز ژئوفون‌های مرکزی، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ سانتی‌متری از مرکز بارگذاری در جدول ۷ نشان داده شده است. تابع سیگموئید^{۱۱} به عنوان برازش نقاط منحنی کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز در ۹ حالت مختلف انتخاب شد که نمودارهای آن در اشکال ۴ تا ۱۲ نشان داده شده است. شکل ریاضی این تابع به‌طور کلی منطبق بر کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز است و بهترین تقریب را از کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز ژئوفون مرکزی خواهد داشت. نتایج زیر نشان‌دهنده‌ی افت‌وخیز ژئوفون مرکزی براساس ضخامت لایه، تراکم، رطوبت و جرم وزنه در آزمایش LWD است. به دلیل اعمال ضریب اصلاحی^{۱۲} در مرحله‌ی بعد به منظور حذف اثرات شرایط آزمایشگاهی، به نتایج افت‌وخیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی پسوند اولیه اطلاق شده است.

با توجه به نمودارهای کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز در شکل‌های بالا، مشاهده می‌شود که مقدار افت‌وخیز در فاصله‌ی بیشتر از ۹۰ سانتی‌متر از مرکز بارگذاری نیز به صفر نرسیده است و با شیب میل‌کننده به صفر ادامه می‌یابد. این مسئله با نظریه‌ی کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز تحت بار ضربه‌ی مغایرت دارد و در واقع افت‌وخیز نهایتاً باید به صفر میل کند، در صورتی که افت‌وخیز در نمودارهای بالا به عددی بزرگ‌تر از صفر میل کرده است. دلیل این مسئله را می‌توان به شرایط نمونه و افت‌وخیز خود جعبه‌ی نمونه نسبت داد، زیرا به دلیل اعمال ضربه به سیستم جعبه و نمونه‌ی

مدول، استفاده از تاریخچه‌ی زمانی خیز و بار در عوض پیشینه‌ی بار و خیز است. این راستا می‌توان در یک دوره‌ی زمانی معین بارگذاری، مدول سختی را با توجه به بار و خیز متناظر آن در زمان‌های مختلف محاسبه و بررسی کرد.^{۱۶} بر اساس خیز هر یک از ژئوفون‌های کناری نیز می‌توان مدول را مطابق رابطه‌ی (۲) محاسبه کرد:

$$E_i = \frac{(1 - \nu^2)P}{\pi \cdot r_i \cdot D_i} \quad (2)$$

که D_i پیشینه‌ی خیز ژئوفون اضافی و r_i فاصله‌ی شعاعی ژئوفون اضافی نسبت به مرکز صفحه است.^{۱۲}

۴. نتایج آزمایش‌ها

به منظور ایجاد سه سطح تنش مورد نظر در تحقیق ابتدا با وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی آزمایش شروع شد. در راستای پیدا کردن پارامترهای مربوط به کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز، ژئوفون‌های دستگاه در ۴ نقطه قرار گرفت و اعداد به دست آمده قرائت شد. ژئوفون اول که بر روی خود دستگاه و در مرکز آن قرار داشت، همواره ثابت بود و محل ژئوفون دوم در فواصل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. هر آزمایش ۵ مرتبه تکرار شد تا اطلاعات ثبت شده از صحت بیشتری برخوردار باشد و با سطح اطمینان بالایی بتوان از آن‌ها استفاده کرد. بعد از انجام تمام مراحل آزمایش با وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی، میزان وزنه به مقدار ۵ کیلوگرم اضافه و مراحل فوق برای وزنه‌ی ۱۵ کیلوگرمی تکرار شد. سپس وزنه تا ۲۰ کیلوگرم افزایش و مراحل یک‌بار دیگر تکرار شد. به این صورت آزمایش بر روی نمونه با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۸۷ درصد پایان یافت و پس از آن درصد تراکم بعدی برای انجام آزمایش آماده شد. به منظور بالا بردن تراکم ابتدا باید مقداری مصالح به آن اضافه می‌شد. پیش از اضافه کردن مصالح، ابتدا باید نمونه‌ی قبلی از حالت متراکم خارج می‌شد و بعد از اضافه کردن مصالح، یک‌بار دیگر مصالح موجود در قالب مخلوط می‌شدند و رطوبت آن‌ها به میزان رطوبت مورد نظر می‌رسید. آب مورد نیاز برای رسانیدن به درصد رطوبت مورد نیاز، به صورت تدریجی و در حین اختلاط مصالح به آن‌ها اضافه شد. سپس سطح مصالح صاف و یکدست شد و مصالح باید کوبیده می‌شد تا این بار به تراکم بعدی یعنی ۹۲ درصد برسد. سپس تمام مراحل انجام آزمایش بر روی آن صورت گرفت و اطلاعات ثبت شد. تکرار این مراحل برای درصد تراکم بعدی یعنی ۹۷ درصد، نیز همانند مراحل قبلی انجام شد.

بعد از اتمام کلیه‌ی مراحل آزمایش بر روی نمونه با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر این بار به منظور افزایش ضخامت نمونه تا ۳۰ سانتی‌متر، مابه‌التفاوت جرم مورد نیاز سنگ‌دانه‌ها محاسبه و به مخلوطی که از حالت متراکم درآمده است، اضافه شد. مصالح اضافه شده به همراه مصالح قبلی به خوبی مخلوط شدند و تا رسیدن به درصد رطوبت مورد نظر به آن آب اضافه شد. سپس تمام مراحل فوق برای این نمونه نیز تکرار شد تا تمام اطلاعات مورد نظر ثبت شود و در نهایت تمام عملیات فوق برای لایه‌ی نهایی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، انجام پذیرفت. جدول ۶ نتایج مربوط به میانگین داده‌های ثبت شده‌ی نمونه بعد از ۵ مرتبه تکرار آزمایش را در درصد رطوبت‌های مختلف نشان می‌دهد.

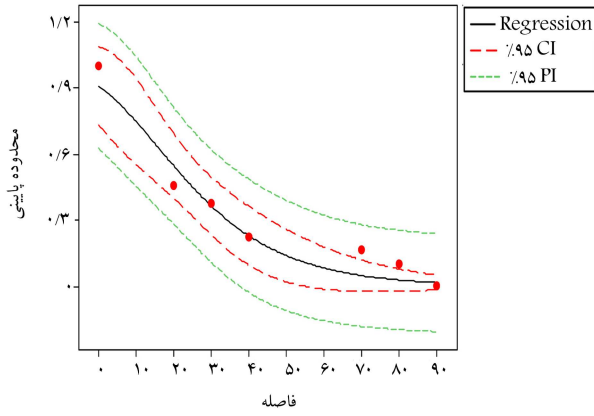
همان‌طور که نتایج اولیه نشان می‌دهد مقادیر افت‌وخیز ژئوفون مرکزی ناشی از افزایش جرم وزنه به‌طور کلی افزایش می‌یابد، اما مدول سطحی اولیه در اثر افزایش جرم وزنه افزایش چندانی ندارد. دلیل را می‌توان به رابطه‌ی محاسبه‌ی مدول سطحی

جدول ۶. میانگین داده‌های ثبت شده در آزمایش LWD برای نمونه‌های مختلف.

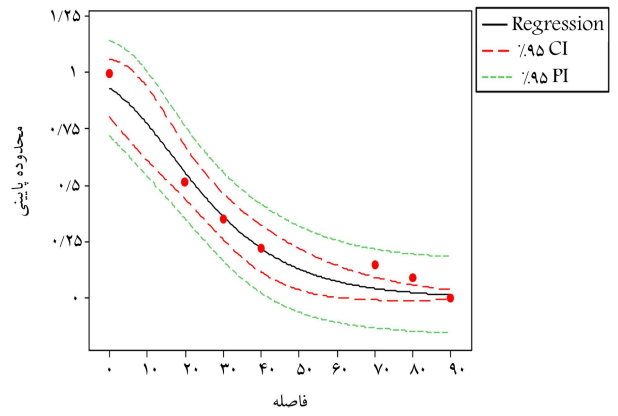
رطوبت ۱۰٪		رطوبت ۷٪		رطوبت ۴٪		وزنه (kg)	تراکم (%)	ضخامت (cm)
مدول (MPa)	افت و خیز (میکرومتر)	مدول (MPa)	افت و خیز (میکرومتر)	مدول (MPa)	افت و خیز (میکرومتر)			
۲۰۵,۲۵	۷۲۷,۹۷	۱۹۵,۸۱	۷۵۱,۳۲	۲۱۰,۱۹	۷۵۵,۹۹	۱۰		
۲۴۴,۰۲	۸۲۷,۹۹	۲۳۵,۶۱	۸۵۲,۷۳	۲۵۳,۶۶	۷۹۰,۸۳	۱۵	۸۷	
۲۷۶,۳۸	۹۸۹,۵۳	۲۳۲,۲۱	۱۱۹۹,۶۱	۲۸۰,۱۴	۹۸۱,۷۶	۲۰		
۲۱۰,۲۵	۷۰۶,۷۸	۱۹۴,۵۱	۷۵۶,۴۳	۱۶۴,۷۵	۹۰۰,۶۶	۱۰		
۲۶۲,۷۷	۷۶۵,۴۷	۲۳۰,۴۳	۸۵۶,۲۷	۲۰۸,۲۶	۹۸۰,۰۲	۱۵	۹۲	۲۰
۳۰۸,۹	۸۹۰,۱۵	۲۳۷,۵۵۱	۱۱۵۲,۱۱	۲۱۸,۷۳	۱۲۶۵,۲۵	۲۰		
۲۲۸,۶۴	۶۵۱,۱۸	۲۴۹,۲۹	۶۰۶,۶۸	۲۴۷,۶۱	۶۰۸,۵۳	۱۰		
۲۷۵,۰۵	۷۳۷,۰۱	۲۹۵,۲۹	۶۹۱,۱۷	۳۰۷,۵۸	۶۵۵,۴۶	۱۵	۹۷	
۳۰۳,۷۹	۹۲۰,۵۲	۳۲۲,۲۹	۸۷۲,۸۳	۳۳۹,۵۴	۸۳۲,۴۳	۲۰		
۲۱۹,۲۶	۷۱۹,۱۸	۲۰۹,۵۳	۷۳۹,۷۹	۲۳۲,۸۵	۶۸۷,۳۴	۱۰		
۲۳۳,۸۸	۹۱۳,۱۸	۲۶۴,۸۳	۷۹۸,۰۲	۲۱۷,۱۰	۹۶۲,۸۸	۱۵	۸۷	
۲۷۲,۱۶	۱۰۵۸,۸۷	۲۷۲,۷۳	۱۰۸۶,۰۹	۲۹۱,۵۶	۹۹۱,۸۹	۲۰		
۲۵۱,۵۲	۶۳۰,۱۱	۲۵۰,۲۷	۶۳۵,۴۴	۲۵۰,۲۷	۶۳۵,۴۴	۱۰		
۲۶۷,۵۷	۸۱۴,۷۳	۲۸۲,۴۴	۷۴۲,۶	۲۸۲,۴۴	۷۴۲,۶	۱۵	۹۲	۳۰
۳۰۲,۸	۹۴۵,۵۹	۲۹۱,۲۵	۹۹۴,۶۵	۲۹۱,۲۵	۹۹۴,۶۵	۲۰		
۲۳۰,۶۷	۶۷۹,۰۱	۲۸۶,۹۱	۵۸۴,۸۹	۳۶۴,۵۳	۴۶۶,۸۴	۱۰		
۲۹۹,۷۱	۷۲۸,۷	۳۵۲,۰۲	۶۲۸,۸۹	۳۸۶,۸۵	۵۷۸,۹۳	۱۵	۹۷	
۳۸۰,۰۲	۸۲۸,۰۳	۴۰۸,۵۹	۷۹۵,۵۸	۳۸۸,۷۰	۸۰۹,۰۱	۲۰		
۲۹۹,۸۱	۵۲۹,۶۸	۲۵۷,۴۴	۶۰۴,۳۴	۲۷۲,۶۳	۵۶۱,۶۷	۱۰		
۳۰۴,۶۱	۶۷۶,۶۹	۲۶۶,۴۹	۷۷۵,۵۶	۲۶۳,۸	۷۹۴,۲۲	۱۵	۸۷	
۲۸۷,۵۳	۹۹۲,۲۳	۲۶۴,۲۶	۱۰۹۵,۸۲	۲۵۱,۷	۱۱۳۰	۲۰		
۳۲۳,۶۳	۴۷۷,۶۸	۳۷۷,۱۷	۴۱۳,۰۶	۳۱۴,۱۴	۴۷۹,۴۴	۱۰		
۳۱۲,۶۷	۶۵۷,۳۱	۳۷۱,۴۹	۵۵۹,۱	۳۰۴,۲۷	۶۷۱,۹۵	۱۵	۹۲	۴۰
۳۲۲,۲۵	۸۸۹,۳۳	۳۴۱,۴۹	۸۴۵,۹۷	۲۷۵,۳	۱۰۲۸,۱۷	۲۰		
۳۲۱,۳۴	۴۷۵,۳۴	۴۰۰,۷	۳۸۱,۸۱	۵۳۲,۷۵	۵۳۵	۱۰		
۳۵۹,۹۲	۵۶۰,۳۲	۴۱۲,۳۲	۴۹۰,۰۷	۶۵۳,۶۱	۳۱۰,۶۳	۱۵	۹۷	
۳۴۳,۳۶	۸۳۶,۴۶	۳۴۲,۵۲	۸۳۴,۳۷	۶۶۹,۱	۲۳۱,۸۳	۲۰		

جدول ۷. افت و خیز ژئوفون در فواصل منظم از مرکز بارگذاری به‌ازای ضخامت لایه و جرم وزنه‌های متغیر.

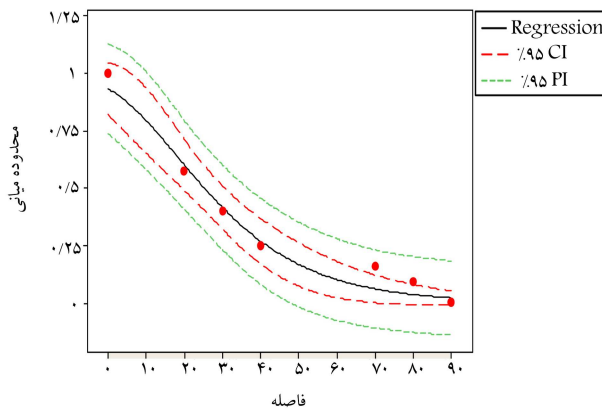
ضخامت لایه (cm)									جرم وزنه (kg)	فاصله ژئوفون از مرکز بارگذاری
۴۰			۳۰			۲۰				
۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰		
۲۰۳,۴	۱۴۸,۲	۱۰۵	۲۲۳,۵	۱۵۸,۹	۱۲۳,۹	۲۷۶,۲	۱۹۲,۲	۱۳۳,۷	۰	
۱۵۸,۱	۱۰۹,۴	۷۵,۳	۱۸۰,۲	۱۲۴,۸	۸۴,۲	۲۲۱	۱۴۶,۱	۱۰۰	۲۰	
۱۳۱,۴	۹۲,۹	۶۲	۱۵۸,۹	۱۱۰,۸	۷۸,۴	۲۰۴,۷	۱۳۲,۵	۸۸,۴	۳۰	
۱۱۴,۴	۸۶,۷	۵۹,۷	۱۴۶,۲	۹۸,۹	۶۷,۴	۱۸۰,۶	۱۲۵,۸	۷۹,۴	۴۰	
۹۸,۲	۷۴,۵	۵۵,۶	۱۳۵	۹۱,۵	۶۳,۱	۱۶۹,۷	۱۲۰,۸	۷۴,۱	۷۰	
۹۳,۷	۷۱,۲	۴۹,۶	۱۳۰,۵	۸۶,۴	۵۸,۴	۱۶۰,۵	۱۱۶,۸	۷۰,۱	۸۰	
۹۰,۱	۶۹,۳	۴۸	۱۲۰,۱	۷۸,۹	۵۰,۹	۱۵۲,۴	۱۰۸,۷	۶۴,۱	۹۰	



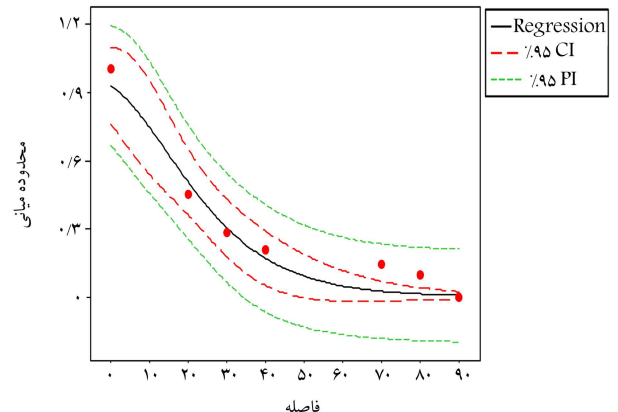
شکل ۷. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۳° سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی.



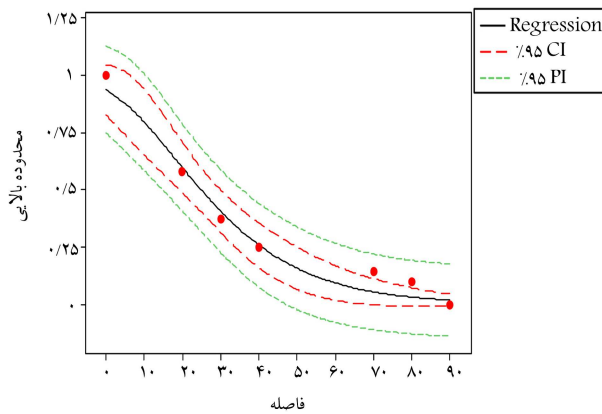
شکل ۴. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۱۰ سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۱۵ کیلوگرمی.



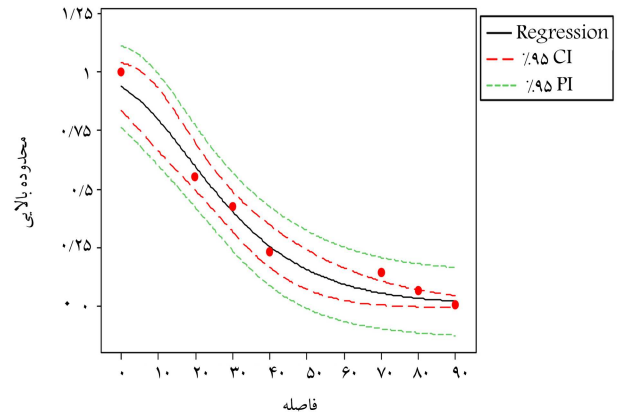
شکل ۸. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۳° سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۱۵ کیلوگرمی.



شکل ۵. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۲° سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۲° کیلوگرمی.



شکل ۹. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۳° سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۲° کیلوگرمی.



شکل ۶. کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز نرمال شده ضخامت ۲° سانتی متر در حالت جرم وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی.

به منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از تحلیل کاسه‌ی انحنای افت‌وخیز، تعدادی آزمایش LWD در یک شرایط روسازی واقعی انجام شد تا نتایج آن با نتایج به‌دست آمده از تابع سیگموئید برازش شده 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 گیلوند در حاشیه‌ی بزرگراه

داخل آن، سیستم دچار افت‌وخیز اندکی می‌شود که ناشی از کرنش نمونه‌ی مصالح نیست و باید از مقدار افت‌وخیز نمونه کم شود. به مقدار افت‌وخیز ثابتی که در هر یک از ۹ حالت مختلف ضخامت و جرم وزنه‌ی متغیر در نمودارها مشخص است، ضریب اصلاحی گفته می‌شود و مقادیر آن در هر حالت در جدول ۸ نشان داده شده است.

می دهد استفاده از ضریب اصلاحی مدول های آزمایشگاهی را به حالت میدانی با شرایط نسبتاً مشابه نزدیک تر می سازد.

۱.۴. نتایج مدول سطحی اصلاح شده

با در نظر گرفتن مقدار ضریب اصلاحی و کم کردن آن از مقادیر افت و خیز تمام ژئوفون ها به ازای ضخامت و جرم وزنه ی متغیر، نتایج افت و خیز و مدول سطحی اصلاح شده مطابق نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۱۳ تا ۱۶ است. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود تأثیرات جرم وزنه و ضخامت لایه که قبل از اعمال ضریب اصلاحی بر روی مدول سطحی تأثیرگذار بود و در نمودارهای مربوط واضح بود، پس از اعمال آن تأثیرگذاری کمتری از خود نشان می دهد. در واقعیت هم مقدار مدول سطحی نمونه های آزمایشگاهی باید مستقل از ضخامت لایه و جرم وزنه باشد.

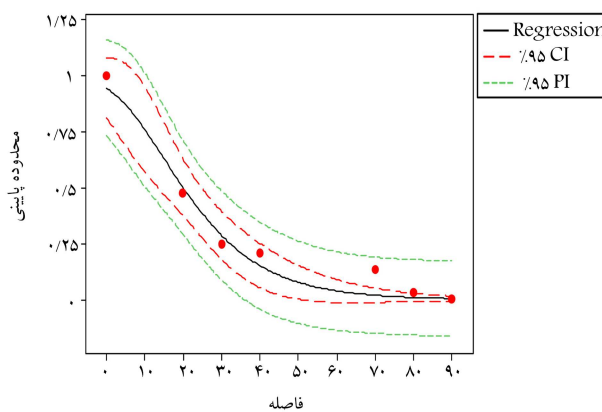
نتایج مدول سطحی پس از اصلاح نشان داد با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵٪ و ۲۱٪ کاهش یافته است. همچنین با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵٪ و ۱۷٪ افزایش یافته است. با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۱۶٪ و ۳۳٪ افزایش یافته است. رطوبت نیز تأثیر چندانی بر افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده نداشته است.

همچنین با توجه به نتایج افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۸٪ و ۳۴٪ افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۱۶٪ و ۲۰٪ افزایش یافته است. با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۱۱٪ و ۶٪ افزایش یافته است. با افزایش رطوبت از ۴ به ۷ و از ۷ به ۱۰ درصد به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۶٪ و ۳٪ کاهش یافته است. همان طور که از نتایج قابل مشاهده است، محدوده ی مدول سطحی اصلاح شده بین ۱۷۵ تا ۵۰۰ مگاپاسکال بوده است که بیشترین آن مربوط به حالت تراکم ۹۷٪ و ضخامت لایه ی ۴۰ سانتی متر و کمترین آن مربوط به حالت جرم وزنه ی ۱۰ کیلوگرم و ضخامت لایه ی ۲۰ سانتی متر است.

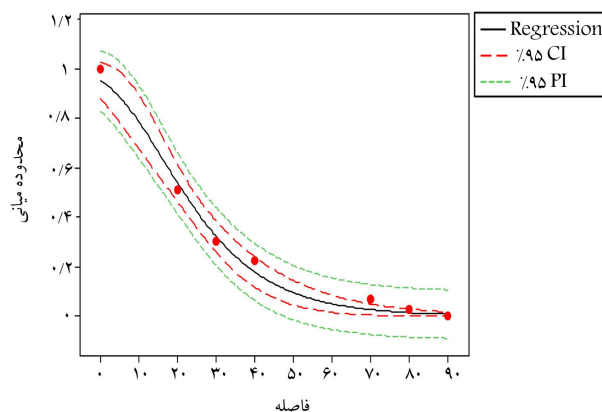
۵. نتیجه گیری

در این تحقیق پس از مطالعه و بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه ی عوامل مؤثر بر خصوصیات رفتاری مخلوط های دانه ای غیرچسبیده در لایه ی اساس روسازی آسفالتی، پارامترهای رطوبت، تراکم، وزنه ی اعمالی و ضخامت نمونه حائز بیشترین اهمیت شناخته شدند. همچنین با بررسی روش های آزمایش این نوع مصالح، استفاده از دستگاه افت و خیزسنج ضربه یی سبک (LWD) به دلیل سرعت بالا، هزینه ی کم و سازگاری بیشتر با نحوه ی اعمال تنش در روسازی انتخاب شد. همچنین به منظور صحت سنجی آزمایش ها، آزمایش LWD در پروژه ی محور کمر بندی گیلوند در حاشیه ی بزرگراه پردیس - فیروزکوه با توجه به شرایط اجرایی و استفاده از مصالح مشابه برای این مقایسه استفاده شد. عمده نتایج این تحقیق عبارت اند از:

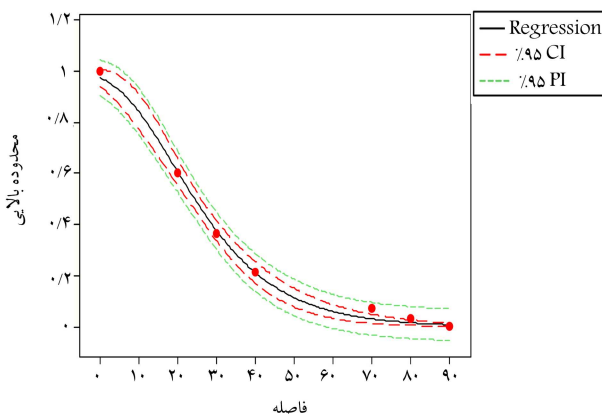
- مقادیر افت و خیز ژئوفون مرکزی ناشی از افزایش جرم وزنه به طور کلی افزایش می یابد، اما مدول سطحی اولیه در اثر افزایش جرم وزنه افزایش چندانی ندارد. دلیل را می توان به رابطه ی محاسبه ی مدول سطحی نسبت داده که بار وارد شده در محاسبه ی مدول سطحی تأثیر دارد.



شکل ۱۰. کاسه ی انحنای افت و خیز نرمال شده ضخامت ۴۰ سانتی متر در حالت جرم وزنه ۱۰ کیلوگرمی.



شکل ۱۱. کاسه ی انحنای افت و خیز نرمال شده ضخامت ۴۰ سانتی متر در حالت جرم وزنه ی ۱۵ کیلوگرمی.



شکل ۱۲. کاسه ی انحنای افت و خیز نرمال شده ضخامت ۴۰ سانتی متر در حالت جرم وزنه ی ۲۰ کیلوگرمی.

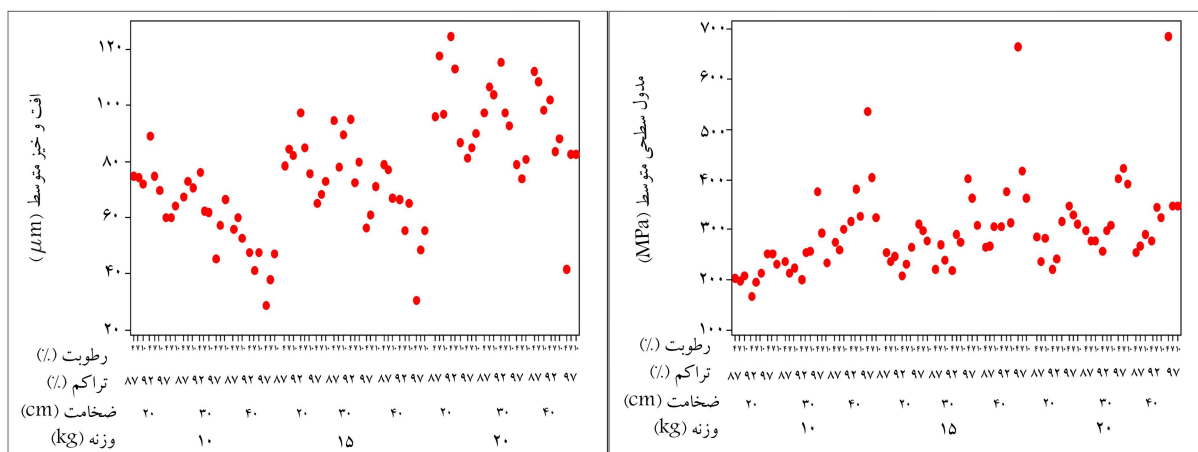
پردیس - فیروزکوه با توجه به شرایط اجرایی و استفاده از مصالح مشابه برای این منظور انتخاب شد. لایه های روسازی در محور مورد نظر شامل لایه ی زیراساس به ضخامت ۳۰ سانتی متر، لایه ی اساس به ضخامت ۲۰ سانتی متر و ۱۰ سانتی متر رویه ی آسفالتی بود که در زمان انجام آزمایش ها، تا لایه ی اساس اجرا شده بود. نتایج این آزمایش صحرائی در جدول ۹ نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان

جدول ۸. مقادیر شیفیت فاکتور افت و خیز به ازای ضخامت لایه و وزنه‌های متغیر.

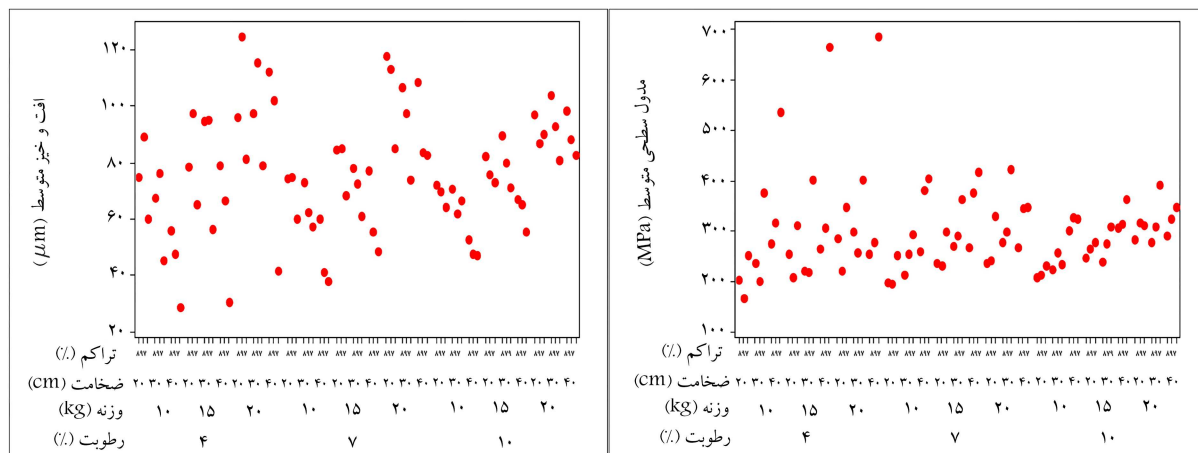
ضخامت لایه (cm)			۳۰			۲۰		
۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰
جرم وزنه (Kg)			۸۰٫۶			۵۲٫۱		
مقدار ضریب اصلاحی			۱۲۲			۱۵۴٫۵		
۴۰	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۱۰۹٫۳	۶۴٫۹	۹۱

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج آزمایش آزمایشگاهی و میدانی LWD.

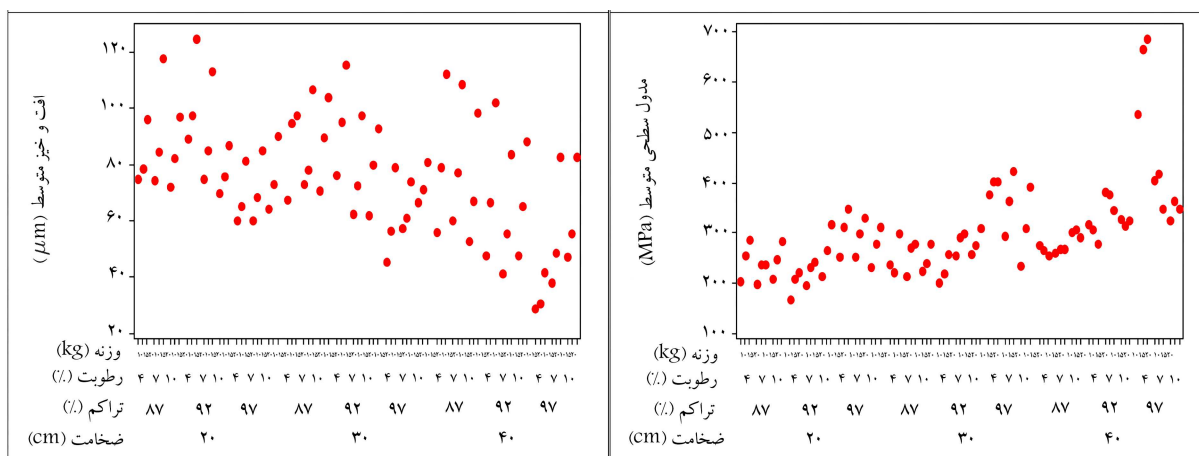
تراکم (%)	رطوبت (%)	مدول سطحی (mp)		
		وزنه ۱۰kg	وزنه ۱۵kg	وزنه ۲۰kg
۱	۹۷٫۲	۲۲۷	۲۵۸	۲۸۱
۲	۹۷٫۵	۲۲۹	۲۵۶	۲۷۸
۳	۹۶٫۸	۲۱۵	۲۴۸	۲۶۹
۴	۹۷٫۱	۲۲۰	۲۵۱	۲۷۳
۵	۹۷٫۲	۲۲۶	۲۵۲	۲۷۴
۶	۹۶٫۷	۲۱۲	۲۴۷	۲۶۵
۷	۹۷٫۰	۲۲۱	۲۵۴	۲۷۵
۸	۹۶٫۹	۲۱۵	۲۴۴	۲۶۸
اولیه	۹۷٫۰	۱۰۸	۱۰۴	۱۰۷
اصلاح شده	۹۷٫۰	۲۰۳	۲۳۹	۲۶۳



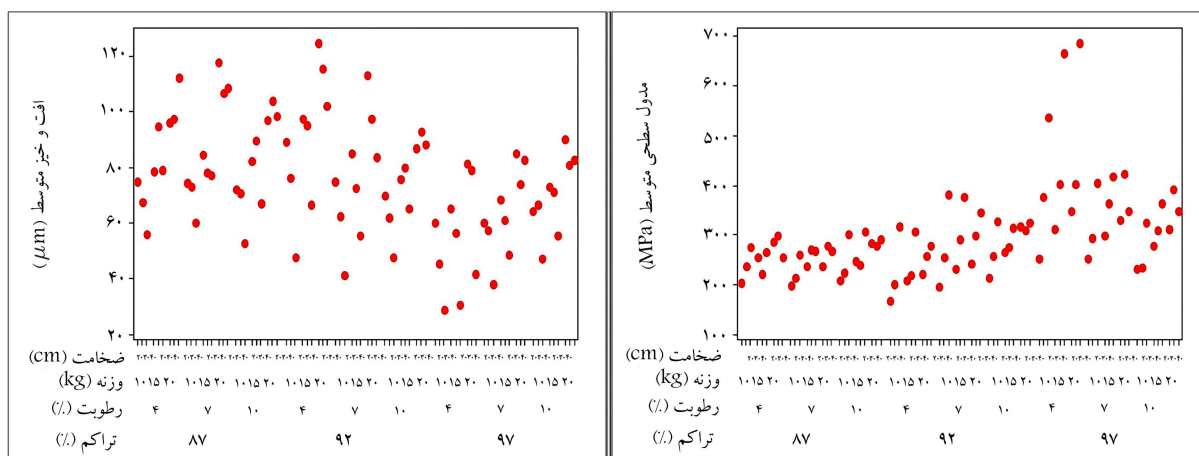
شکل ۱۳. نتایج افت و خیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی اصلاح شده به تفکیک جرم وزنه.



شکل ۱۴. نتایج افت و خیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی اصلاح شده به تفکیک رطوبت.



شکل ۱۵. نتایج افت و خیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی اصلاح شده به تفکیک ضخامت لایه.



شکل ۱۶. نتایج افت و خیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی اصلاح شده به تفکیک تراکم.

کاهش یافته است. افزایش رطوبت تأثیر بسیار اندکی بر افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه داشته است.

با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب مدول سطحی اولیه ۳٪ و ۱۳٪ افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب مدول سطحی اولیه ۱۸٪ و ۲۳٪ افزایش یافته است. تأثیر دو پارامتر دیگر یعنی رطوبت و جرم وزنه بسیار کم بوده است.

با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵٪ و ۲۱٪ کاهش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۵٪ و ۱۷٪ افزایش یافته است. با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده ۱۶٪ و ۳۳٪ افزایش یافته است. رطوبت نیز تأثیر چندانی بر افت و خیز ژئوفون مرکزی اصلاح شده نداشته است.

افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۸٪ و ۳۴٪ افزایش یافته است. با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۱۶٪ و ۲۰٪ افزایش یافته است. با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب

مقدار مدول سطحی اولیه با افزایش تراکم مصالح به صورت نسبی افزایش و افت و خیز ژئوفون مرکزی کاهش یافته است. به عبارت دیگر افزایش تراکم باعث افزایش تنش جانبی شده است که موجب افزایش مدول مطابق مطالعات قبلی می شود.

با افزایش ضخامت لایه مدول سطحی اولیه افزایش یافته و افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه کاهش یافته است. هم چنین نتایج نشان داد که پارامتر درصد رطوبت تأثیر چندانی در نتایج مدول سطحی و افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه ندارد.

نتایج افت و خیز ژئوفون مرکزی و مدول سطحی پس از اعمال ضریب اصلاحی به نتایج آزمایش ها تعدیل شود. تأثیرات جرم وزنه و ضخامت لایه که قبل از این اقدام بر روی مدول سطحی تأثیرگذار بود و در نمودارهای مربوط نیز واضح بود، پس از آن تأثیرگذاری کمتری از خود نشان داد. در واقعیت هم مقدار مدول سطحی نمونه های آزمایشگاهی باید مستقل از ضخامت لایه و جرم وزنه باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش جرم وزنه از ۱۰ به ۱۵ و از ۱۵ به ۲۰ کیلوگرم به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه ۳۲٪ و ۳۶٪ افزایش یافته است. هم چنین با افزایش ضخامت لایه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ سانتی متر به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه ۲۰٪ و ۱۹٪ کاهش یافته است. با افزایش تراکم از ۸۷ به ۹۲ و از ۹۲ به ۹۷ درصد به ترتیب افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه ۳٪ و ۱۰٪

بیشترین افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه مربوط به حالت‌های با ضخامت لایه ۲۰ سانتی‌متر و جرم وزنه ۲۰ کیلوگرم بوده است.

- محدوده‌ی مدول سطحی اولیه بین ۹۰ تا ۱۸۰ مگاپاسکال بوده است 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 است.

مدول سطحی اصلاح شده ۱۱٪ و ۶٪ افزایش یافته است. با افزایش رطوبت از ۴ به ۷ و از ۷ به ۱۰ درصد به ترتیب مدول سطحی اصلاح شده ۶٪ و ۳٪ کاهش یافته است.

- محدوده‌ی افت و خیز ژئوفون مرکزی اولیه بین ۹۰ تا ۲۴۰ میکرون بوده است.

پانویس‌ها

1. Accelerated Pavement testing (APT)
2. Portable Falling weight Deflectometer (PFWD)
3. Falling weight Deflectometer (FWD)
4. Light weight Deflectometer (LWD)
5. Steinert
6. Hussain
7. Fleming
8. Biussinesq
9. George
10. deflection basin
11. sigmoid
12. shift factor

منابع (References)

1. Araya, A.A. "Characterization of unbound granular materials for pavements", M.S. Thesis, Road and Railway Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology (2011).
2. Lekarp, F. "Permanent deformation behavior of unbound granular materials", Licentiate Thesis, Kungl Tekniska Hogskolan (1997).
3. European Committee for Standardization (ECS), EN 12697-33 Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 33: Specimen Prepared by Roller Compactor (2007).
4. Brito, L.A.T. "Design methods for low volume roads", PhD Thesis, University of Nottingham, (2011).
5. Sigardur, E., Shafiqur, R. and Salour, R. "Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi stage RLT testing", *Transportation Geotechnics*, **13**, pp. 28-42 (2017).
6. Freire, A., Neves, J. and Pestana, R. "Analysis of recycled aggregates properties for unbound granular asphalt pavement layers", *International Conference on Asphalt Pavements*, Japan (2010).
7. Siripun, K., Jitsangiam, P. and Nikraz, H. "The design model of unbound granular materials for flexible pavement", *Australian Journal of Civil Engineering*, **10**(1), pp. 122-129 (2012).

8. Fakhri, M. and Brazvan, S. "Correlation of LWD, CBR and cyclic-triaxial tests", *Modares Civil Engineering Journal*, **14**(2), pp. (In Persian) (2014).
9. Jitareekul, P., Sawangsuriya, A. and Singhatiraj, P. "Integration of pavement layer evaluation using LWD for road safety control", *Procedia Engineering*, **189**, pp. 111-117 (2017).
10. Umashankar, B., Hariprasad, C.h. and Kumar, G. "Compaction quality control of pavement layers using LWD", *Procedia Engineering*, **189**, pp. 111-117 (2017).
11. Steinert, B.C., Humphrey, D.N. and Kestler M.A. "Portable falling weight deflectometers study", University of Maine, NETC Project No. 00-4 (2005).
12. Hussain, J and et al. "Comparing results between the repeated load triaxial test and accelerated pavement test on unbound aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, *ASCE*, **26**(3), pp. 476-483, (2014).
13. Fleming P.R., Frost W. and et al. "A Review of the light weight deflectometer (LWD) for routine insitu assessment of pavement material stiffness", Transportation Research Board Meeting, National Research Council, CD-ROM, Washington DC, USA (2007).
14. Rafiei, K. and Kavussi, A. "Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers", *Journal of Civil Engineering and Management*, **16**(1), pp. 123-129 (2010).
15. Yohannes, B., Hill, K., Khazanovich, L. "Mechanistic Modeling of Unbound Granular Materials", *Material Science* (2009).
16. Iran Highway Asphalt Paving Code, No. 234, Asphalt Institute of Iran, (In Persian) (2013).
17. Cemi, J. and Camilli, S. "Comparative analysis of gyratory and proctor compaction processes of unbound granular materials", *Road Materials and Pavement Design*, **12**(2), pp. 397-421 (2011).
18. ASTM E2583, *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*, Book of Standards Volume 04.03, ASTM International (2007).

19. Khavandi, A. and Khaksar, M. "Correlation of LWD, CBR and Cyclic-Triaxial Tests", *1st Road and Transportation national Conference Gilan-Iran*, (In Persian) (2017).

20. Brazvan, S., Ziksari, A., Ghorbani M. and et al. "The comparison between LWD and FWD test results and simulation with finite element ABAQUS software", *Transportation Research Journal*, **10**(2), pp. (In persian) (2014).

21. George, K.P. "Portable FWD (PRIMA 100) for In-Situ subgrade evaluation", Final Report, Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-06-179 (2006).

22. EN 13286-7, Unbound and Hydraulically Bound Mixtures-Part 7: Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures, European Committee for Standardization (2004).