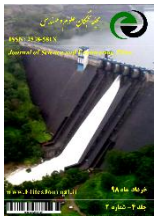
مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۴- شماره ۲- سال ۱۳۹۸
www.ElitesJournal.ir



مقایسه بین نتایج آزمون های ژئوگیج وVSS در پروژه های راه سازی

یونس بهاروند ایران نیا[۱]، سارا اقبالی[۲*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مدیریت ساخت دانشگاه آزاد بروجرد
۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه های آبی دانشگاه لرستان

*sarasaze68@Gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۸ پذیرش: خرداد ماه ۹۸

چکیده

یکی از وسایلی که در سالهای اخیر برای اندازه گیری میدانی سختی برجا و مدول الاستیک بستر و لایهای روسازی راه مورد استفاده قرار می گیرد دستگاه ژئوگیج است. بررسی تحقیقات قبلی بر روی همبستگی نتایج دستگاه ژئوگیج با آزمون بارگزاری صفحه نشان داده شده است که می توان با تقریب خوبی نتایج این دو را با هم همبست کرد. هدف تحقیق حاضر یافتن همبستگی بین آزمون های VSS (موسوم به آزمون بارگزاری صفحه سوئیسی) و نتایج حاصل از دستگاه ژئوگیج به جای VSS به ویژه در کنترل کیفیت لایه های روسازی است. در جهت برقراری همبستگی بین آزمون های ژئوگیج و VSS ، آزمون های برجا بر روی قطعاتی از پروژه آزاد راه خرم آباد-پل زال و برای لایه های خرده سنگی و لایه های بستر، زیراساس و اساس درشت دانه انجام گرفت. در هر نقطه ، آزمون های ژئوگیج و VSS و آزمایش های تکمیلی دانه بندی، تعین حدود ابرترگ، تعیین وزن مخصوص برجا، تعیین وزن مخصوص آزمایشگاهی و هم ارز ماسه انجام شد. براساس آزمون های بدست آمده از دستگاه ژئوگیج و آزمون های VSS مشخص گردید همبستگی های مناسبی بین این دو آزمون وجود دارد.

کلمات کلیدی: دستگاه ژئوگیج ، آزمون VSS، آزمون بارگذاری صفحه، لایه های خاک

۱- مقدمه

کشور پهناور ایران، یکی از کشورهای دارای مرکزیت در ترانزیت کالا بین شرق و غرب آسیا و بین قاره های آسیا و اروپا می باشد کشور ایران با وسعت زیاد خود دارای راههای مواصلاتی بین شهری بسیاری بوده که این امر به خودی خود نشان دهنده اهمیت و نقش راهها در توسعه اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی بین نقاط مختلف کشور می باشد.

متدها و قوانین کنترل کیفیت لایه‌های خاکی روسازی شامل بستر، زیر اساس و اساس به طور عمده بر اساس کنترل تراکم در محل است. این ضوابط فرض می‌کنند که لایه‌های روسازی در طول عمر طراحی، اگر به اندازه کافی متراکم باشند، به خوبی عمل خواهند کرد. به دلیل سهولت تعیین وزن مخصوص خاک از طریق اندازه‌گیری وزن و حجم، این روش به عنوان روشی متداول برای کنترل کیفیت راه انتخاب شده است.

راه ها و روش‌های کنترل کیفیت بر اساس وزن مخصوص، کند، وابسته به نیروی کار و فاقد دقت کافی بوده و با این حال دلیل اصلی برای استفاده از این روش‌ها، سادگی و هزینه نسبتا کم در مقایسه با روش‌های مبتنی بر سختی و مدول است. هر چند که

هدف از متراکم‌کردن خاک، کمک به پایدارسازی و بهبود خواص مهندسی خاک است، ولی دانسیته خشک و درصد رطوبت، خواص و شاخص‌های مطلوب مهندسی برای خاک بشمار نمی‌روند.

واقعیت این است که پارامترهای طراحی و کیفیت مصالح لایه‌های روسازی مقادیر وزن مخصوص یا درصد رطوبت نیستند زیرا این معیارها با خواص مهندسی خاک‌ها بگونه‌ای غیر مستقیم ارتباط دارند. در واقع مشخصه کلیدی لایه‌های روسازی مقادیر سختی یا مقاومت مصالح مانند مدول برجهندگی است که به عنوان معیاری از کیفیت بستر در نظر گرفته می‌شود.

از طرفی به دلیل برخی مسائل مانند محدودیت در حداکثر اندازه دانه‌ها در برخی از مصالح مانند مصالح خرده سنگی و مصالح خرد شونده، آزمون تعیین وزن مخصوص خاک در محل مناسب نیست. در حال حاضر در ایران برای کنترل کیفیت این مصالح بایستی از آزمون‌هایی مانند VSS[۱] استفاده شود. اما در اغلب موارد با توجه به تجهیزات سنگین و احتیاج به یک وسیله با وزن زیاد (اعم از کامیون دارای بار، لودر و یا گریدر) جهت بارگذاری، اغلب از انجام این آزمایش امتناع کرده و با حفر چاله دانسیته در مکان (های) مناسب دیگری بدنبال انجام آزمایش مخروط ماسه می‌گردند.

بطور کلی مدول برجهندگی، معیار مناسبی از سختی مصالح در روسازی است. در طراحی روسازی به روش مکانیستی-تجربی (M-E) مدول برجهندگی (مدول ارتجاعی در بارگزاری تکراری با کرنش های کم) بعنوان پارامتر طراحی اصلی مصالح روسازی معرفی شده است، لذا می‌بایست در هنگام اجرا به عنوان فاکتوری برای کنترل کیفیت لحاظ گردد. ولی کنترل کیفیت در حال حاضر بر اساس اندازه‌گیری وزن مخصوص با آزمایش مخروط ماسه (ASTM D1556) و یا تراکم‌سنج هسته‌ای (ASTM D6938) صورت می‌گیرد. علت اصلی این کار، فقدان وسیله یا فناوری مناسب قابل اعتماد برای اندازه‌گیری مدول برجهندگی در محل و سابقه طولانی روش‌های کنترل مبتنی بر تراکم می باشد. آزمونVSS نوعی آزمون بارگذاری صفحه (PLT[۲]) است که در ایران و برخی از کشورهای اروپایی متداول است و برای تعیین نشانه‌ای از سختی بستر روسازی و لایه‌های اساس و زیر اساس غیرآسفالتی به کار می‌رود. این آزمون نسبتا پرهزینه و زمان‌بر است[۱].

در سالهای اخیر دستگاه‌های متعددی از جمله LFWD[۳]، نفوذسنج مخروطی دینامیکی (DCP)[۴] ژئوگیج[۵] و تحلیل‌گر لرزه‌ای روسازی قابل حمل[۶] (PSPA) برای اندازه‌گیری سریع مشخصات فیزیکی و مکانیکی بستر و لایه‌های روسازی راه، از جمله سختی و مدول، ابداع شده و در دسترس مهندسان قرار گرفته است. این آزمون‌های غیرمخرب اغلب براساس اندازه‌گیری پاسخ توده خاک در مقابل ضربه و یا نوسان مداوم انجام می‌شوند. امتیاز اصلی این آزمون‌ها در مقایسه با آزمون‌های رایج قبلی مانند آزمون VSS و یا تعیین وزن مخصوص در محل، سهولت، ارزانی و امکان انجام این آزمون‌ها به تعداد زیاد است.

مقادیری که از دستگاه‌های فوق بدست می آید می‌توانند مقادیر قابل اطمینانی از "مدول[۷]" لایه‌های روسازی را بدست بدهند لکن مدولی که به دست می‌دهند لزوما برابر مدول برجهندگی مورد استفاده در طراحی روسازی نمی‌باشد زیرا در اغلب آنها میزان تنش‌های اعمال شده و اندازه سطح بارگذاری با آنچه در روسازی در زیر چرخ رخ می‌دهد برابر نیستند. علاوه بر این بعضی از این دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری مستقیم "سختی[۸]" یا "مدول" لایه‌های روسازی طراحی نشده‌اند. این مساله را می‌توان با همبسته‌کردن مدول به دست آمده در آزمون‌های برجا با مدول طراحی تعیین‌شده در آزمایشگاه برطرف کرد.

---

۱ Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute

۲ Plate Load Test

۳ Light Falling Weight Deflectometer

۴ Dynamic Cone Penetrometer

۵ Geogauge

۶ Portable Seismic Pavemrnt Analyser

۷ Module

۸ Stiffness

دستگاه ژئوگیج است که استاندارد آن از سال ۲۰۰۲ تحت عنوان " اندازه‌گیری برجای سختی و مدول ظاهری خاک و مخلوط خاک-سنگدانه‌ها به وسیله یک روش الکترومکانیکی[۱]" در ASTM وارد شده است یکی از دستگاههای آزمون برجا می باشد. این دستگاه که تنها حدود ۱۰ کیلوگرم وزن دارد، به راحتی با دست قابل حمل بوده و برای اندازه‌گیری میدانی دو متغیر "سختی برجا" و "مدول" مصالح به کار برده می‌شود.

دستگاه ژئوگیج با اعمال نیرویی کوچک به خاک و اندازه‌گیری تغییر مکان ناشی از این نیرو در فرکانس‌های مختلف لرزش مداوم و میانگین‌گیری از نتایج، سختی خاک را اندازه‌گیری می‌کند. کل زمان این اندازه‌گیری‌ها در حدود ۷۵ ثانیه می‌باشد. در این آزمون، با فرض ضریب پواسون، مدول الاستیک مصالح در محدوده کرنش‌های کوچک قابل محاسبه می‌باشد. از آزمون ژئوگیج همچنین می‌توان به منظور کنترل غیر مستقیم تراکم برجا و یا به عنوان آزمون تکمیلی همراه با آزمون تعیین وزن مخصوص در محل استفاده نمود.

هدف ژئوگیج برآوردن نیازیست که از زمان مهم بودن کیفیت در سازه‌های خاکی وجود داشته است. این نیاز عبارتست از کنترل فرایند ساخت بوسیله همان مشخصه‌های فیزیکی که طراحی بر اساس آنها صورت می‌گیرد به عنوان مثال:

- سختی به منظور تضمین یکنواختی و انتقال موثر بار از لایه آسفالت به اساس، زیر اساس و از آنجا به بستر .
- مدول مصالح بدین سبب که آیا مصالح شرایط عملکرد سازه‌ای مورد انتظار روسازی را دارند، حائز اهمیت می باشند.

در سال‌های اخیر در برخی از کشورهایی که در آنها از آزمون‌های برجا، مانند آزمون‌های بارگذاری صفحه، استفاده می‌کنند، روابط همبستگی خوبی میان این آزمون‌ها و آزمون ژئوگیج برقرار شده و سعی شده است تا با بدست آوردن روابط همبستگی قابل اطمینان، به سمت جایگزین‌کردن این آزمون به عنوان آزمون مکمل کنترل کیفیت روسازی پیش روند. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات نزل[۲] و سیمن[۳] اشاره کرد که به بررسی همبستگی بین مدول بدست آمده از ابزار مختلف از جمله ژئوگیج و آزمون بارگذاری صفحه پرداخته‌اند.

۲- تعاریف

۲-۱- ژئوگیج

دستگاه ژئوگیج در ابتدا توسط صنایع دفاع آمریکا به منظور یافتن مین‌های غیرفلزی مورد استفاده قرار گرفت. سپس در واکنش به نیاز به دستگاه آزمایش تعیین وزن مخصوص در محل با عملکرد سریع‌تر و ارزان‌تر، اداره کل راه‌ها (FHWA[۴]) و اداره برنامه‌های پژوهشی پیشرفته وزارت دفاع آمریکا (ARPA[۵]) به منظور بررسی امکان استفاده از این فن‌آوری نظامی همکاری کردند. محصول این تحقیقات گیج سختی خاک(SSG[۶]) یا ژئوگیج نامیده شد که توسط شرکت هامبولت[۷] تولید شده است.

از سال ۱۹۹۴، SSG به طور وسیعی در مینسوتا به همراه تحقیقات انجام شده توسط دپارتمان حمل و نقل ایالت مینسوتا (MnDOT[۸]) برای بهبود و کنترل مراحل ساخت سازه‌های زیرزمینی به کار گرفته شد. هدف اولیه آزمون‌ها، اعتبارسنجی

---

۱ Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by an Electro-Mechanical Method

۲ Nazzal

۳ Seyman

۴ Federal Highway Administration

۵ U.S. Department of Defense's Advanced Research Programs Administration

۶ Soil Stiffness Gauge

۷ Humboldt

۸ Minnesota Department Of Transportation

تکنولوژی SSG بود ولی در طول استفاده از آن، نکات بسیاری در مورد عدم یکنواختی در تراکم در روش‌های فعلی به دست آمد. این نتایج باعث درخواست استفاده بیشتر از مدل‌های ژئوگیج گردید.

در سال‌های ۹۷-۱۹۹۶ در مرحله پیش از تولید، دستگاه توسط شرکت هامبولت و MnDOT مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعات نشان داد که سختی و مدول خاک نقشی مهم‌تر از وزن مخصوص در عملکرد عملیات خاکی دارند. در سال ۱۹۹۸، SSG با نام گیج سختی هامبولت (HSG[1]) یا ژئوگیج تولید شد و توسط مراکز تحقیقاتی بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفتدستگاه ژئوگیج مقاومت مصالح در سطح زمین را اندازه می‌گیرد. این دستگاه نیروی کوچکی را به خاک اعمال کرده و تغییر مکان ایجاد شده در سطح را به عنوان تابعی از فرکانس‌های مختلف لرزش مداوم اندازه‌گیری می‌کند. به این ترتیب سختی، یعنی نسبت نیرو بر جابجایی، به دست می‌آید. به عبارت دیگر این دستگاه با اعمال نوسان با دامنه کوچک، تغییرمکان بسیارکوچکی(کوچکتراز $۱۰^{-۳}*۱/۲۷$میلی‌متر) را در ۲۵ فرکانس جداگانه بین ۱۹۶-۱۰۰ هرتز (با فاصله ۴ هرتز) به زمین وارد می‌کند. سختی در هر فرکانس محاسبه می‌شود و میانگین سختی‌ها در ۲۵ فرکانس نمایش داده می‌شود. کل مراحل حدود ۷۵ ثانیه طول می‌کشد. در این فرکانس‌ها، مقاومت سطح متناسب با مدول برشی خاک است. با فرض ضریب پواسون، مدول برشی و مدول الاستیک (مدول یانگ) را می‌توان به دست آورد[۲].

۲-۲- آزمون VSS

این روش ، اطلاعاتی را برای کنترل ظرفیت باربری عناصر مختلف ساختمان راه که شامل پوشش کامل شده راه (بدون روسازی) می باشد را با استفاده از آزمایشهای بارگزاری صفحه ای فراهم می سازد.

۳- مشخصات کلی پروژه

آزمون‌های برجا در این تحقیق در استان لرستان و در پروژه تعریض جاده کمربندی خرم آباد- قطعه دوم انجام شده است.

۳-۱- آزمون‌های انجام‌شده در استان لرستان

به منظور بررسی همبستگی بین نتایج ژئوگیج و VSS، پروژه کمربندی خرم آباد-قطعه دوم انتخاب گردید و نهایتاً ۲۰ مورد آزمون در این پروژه بر روی لایه سابگرید انجام گرفت برای این منظور آزمون ژئوگیج و مخروط ماسه بر روی یک مقطع از پروژه انجام گرفت.

۳-۲- روند کلی انجام آزمون‌ها

آزمون‌های انجام شده در تحقیق حاضر شامل آزمون‌های VSS ، ژئوگیج، تعیین وزن مخصوص در محل و همچنین آزمایش‌های تکمیلی شامل آزمایش‌های دانه‌بندی، تعیین حدود اتربرگ و هم‌ارز ماسه‌ای در هر نقطه می‌باشد. آزمون تعیین وزن مخصوص در محل برای لایه سابگرید در فواصل ۱۰۰ متری و برای لایه زیراساس در فواصل ۵۰ متری صورت می‌گیرد. در کنار این چاله همچنین آزمون VSS انجام شده است. در ۵ نقطه پیرامون در شعاع تقریبی ۵۰ الی ۸۰ سانتیمتر، سختی و مدول الاستیک توسط ژئوگیج اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها تعیین گردید.

۴- بررسی همبستگی بین نتایج ژئوگیج و VSS

دانه‌بندی مصالح و مراحل انجام آزمون‌ها:

همانگونه که در بخش پیش بدان اشاره گردید برای رسیدن به هدف فوق، مجموعاً ۲۵ مورد آزمون در پروژه تعریض جاده کمربندی خرم آباد-قطعه دوم انجام گردید. در جدول ۱خلاصه وضعیت کارهای انجام شده در این پروژه آورده شده است. در

---

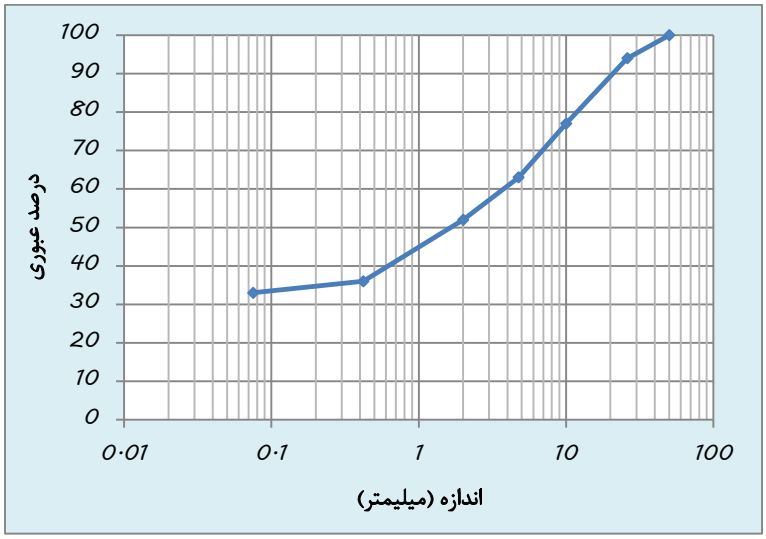
۱ The Humboldt Stiffness Gauge

شکل ۱ تا شکل ۳ منحنی دانه‌بندی لایه‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. برای اجرای لایه‌های مختلف راه، سابگرید در دو لایه، زیراساس در دو لایه و اساس در یک لایه ریخته و متراکم می‌شود.

جدول ۱- وضعیت کلی مقاطع تست شده

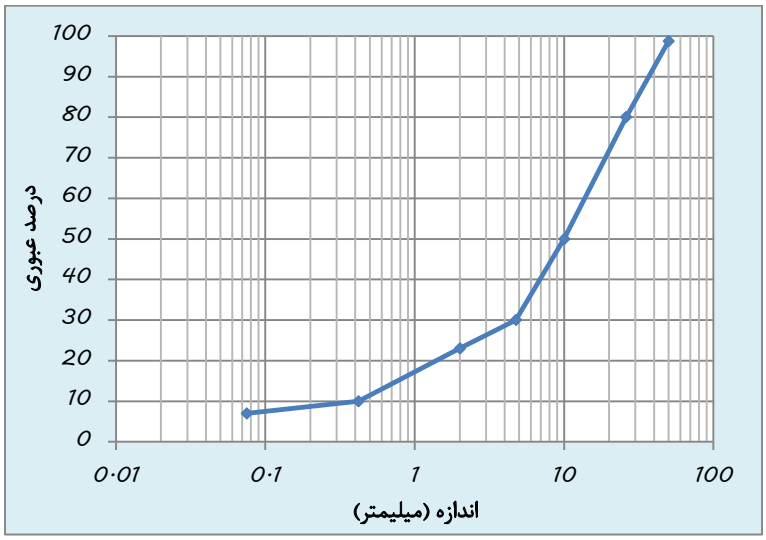
محل اجرا	لایه مورد تست	طبقه بندی خاک		تعداد آزمون
		آشتو	متحد[1]	
پروژه تعریضی جاده- کمربندی خرم آباد	خاکریز	-	-	۲
	سابگرید	A-2-7	SC	۱۳
	زیر اساس	A-1-a	GP	۹
مجموع				۲۴

- **A-2-7: ماسه و شن رس‌دار و یا لای‌دار**
- **SC: ماسه رس‌دار**
- **A-1-a: ماسه و شن با قلوه‌سنگ**
- **GP: شن بد دانه‌بندی شده**

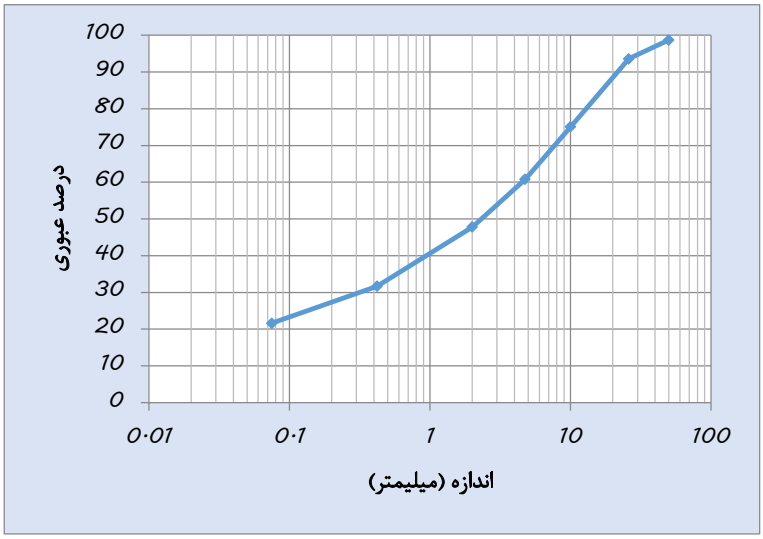


شکل ۱- منحنی دانه‌بندی لایه سابگرید پروژه جاده کمربندی خرم آباد

۱ -Unified

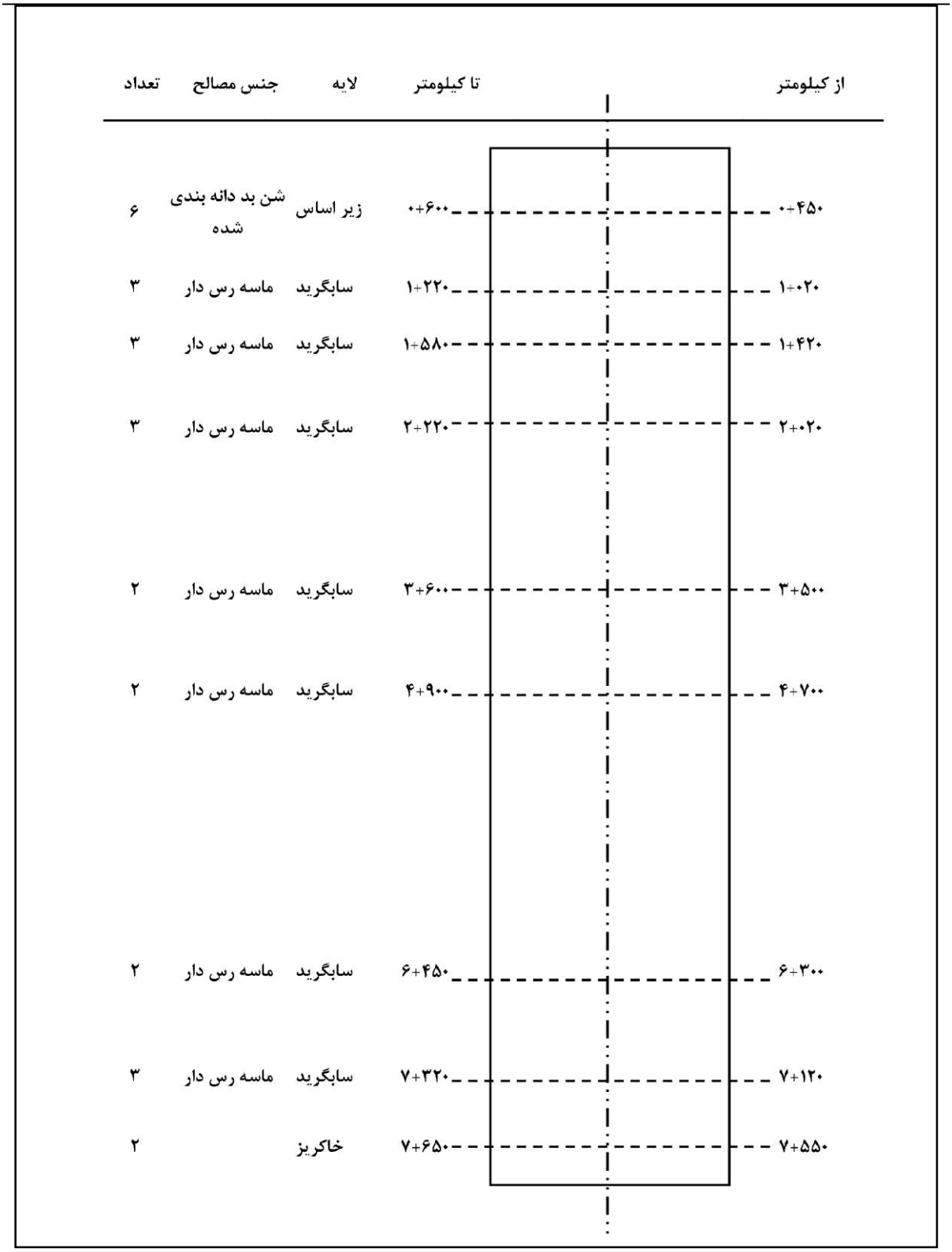


شکل۲ – منحنی دانه‌بندی لایه زیراساس در پروژه جاده کمربندی خرم آباد



شکل ۳– منحنی دانه‌بندی لایه سابگرید پروژه جاده کمربندی خرم آباد

شمای کلی آزمون‌های انجام شده در این پروژه در شکل۴ آورده شده است. در این شکل اطلاعات مکانی آزمون‌های انجام شده، لایه مورد آزمون، جنس مصالح هر لایه و تعداد آزمون ژئوگیج و VSS نشان داده شده است. در هر مقطع آزمون‌های ژئوگیج، VSS صورت گرفته است. برای تراکم هر کدام از لایه‌ها از غلتک‌های چرخ فولادی لرزنده استفاده شده است. در خصوص تعداد گذر غلتک اطلاعاتی در دسترس نمی‌باشد.

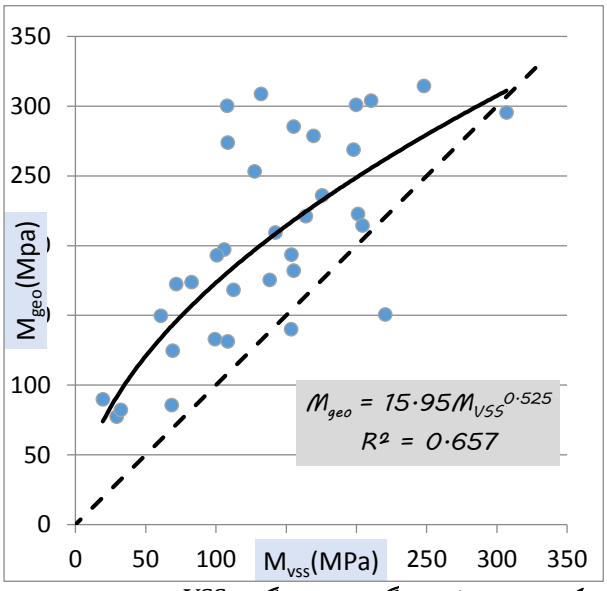


شکل ۴- شمای آزمون‌های انجام شده در پروژه جاده کمربندی خرم آباد

Error! Reference source not found. **نتایج اولیه آزمون‌های انجام شده بر روی لایه‌های مختلف در پروژه را نشان می‌دهد**

ردیف	نوع و شماره لایه	ضخامت (cm)	نتایج آزمونهای برجا				نتایج آزمونهای آزمایشگاهی		درصد تراکم
			مدول‌ژئوگیج (Mpa)	VSSمدول (Mpa)	وزن‌مخصوص (gr/cm^3)	رطوبت (٪)	وزن‌مخصوص بهینه(gr/cm^3)	رطوبت بهینه (٪)	
۱	سابگرید-۲	۱۵	۱۴۳/۴	۵۸	۲/۲۵	۸/۷	۲/۳	۹/۷	۹۹
۲	زیراساس-۱	۱۹	۲۰۹/۶	۱۳۸/۲	۲/۱	۴/۲	۲/۱	۵/۱	۹۸
۳	زیراساس-۱	۱۸	۲۵۲/۸	۱۳۰/۱	۲/۱۷	۴/۹	۲/۱۲	۴/۹	۹۹
۴	زیراساس-۱	۱۸	۲۷۱/۵	۱۹۵/۲	۲/۱۶	۴/۸	۲/۴	۵/۳	۹۶
۵	زیراساس-۱	۱۷	۲۷۴/۲	۱۰۵/۲	۲/۳	۴/۸	۲/۲	۴/۵	۹۷
۶	زیراساس-۱	۲۰	۲۲۲/۴	۲۰۰/۴	۲/۳۲	۴/۲	۲/۴	۵/۱	۹۸
۷	زیراساس-۱	۲۱	۲۹۵/۵	۳۱۰/۲	۲/۳۰	۴/۹	۲/۱	۵/۳	۱۰۰
۸	زیراساس-۱	۱۶	۸۵/۸	۷۰/۲	۲/۲۹	۵/۵	۲/۴	۵	۹۶
۹	زیراساس-۱	۱۵	۲۸۶/۱	۱۴۰	۲/۱۱	۴/۵	۲/۱۲	۴/۶	۹۴
۱۰	زیراساس-۱	۲۲	۳۱۸/۲	۲۵۱/۲	۲/۴	۴/۳	۲/۱۷	۵	۹۸
۱۱	سابگرید-۲	۱۲	۱۳۲/۹	۱۵۰/۹	۲/۰۲	۱۰/۴	۲/۰۲	۱۰/۵	۹۹
۱۲	سابگرید-۲	۱۵	۱۵۲/۱	۲۲۲/۲	۱/۹۸	۶/۰۵	۱/۹۹	۱۰/۸	۱۰۰
۱۳	سابگرید-۱	۱۵	۱۹۶/۱	۱۵۱/۲	۲/۲۵	۳/۷	۲/۱	۵	۱۰۰
۱۴	سابگرید-۱	۲۲	۱۸۱/۲	۱۸۶	۲/۱۹	۴/۹	۲/۲۱	۵/۱	۹۸
۱۵	سابگرید-۱	۱۵	۹۰	۳۹/۴	۲/۳۲	۴/۸	۲/۳۵	۴/۵	۱۰۰
۱۶	سابگرید-۱	۲۵	۸۳	۳۲/۷	۲/۳۰	۳/۷	۲/۳۲	۴/۲	۹۸
۱۷	خاکریز	۱۸	۱۷۶/۵	۶۸/۹	۲/۱۷	۷/۱	۱/۹۸	۷/۳	۹۶
۱۸	خاکریز	۱۲	۲۲۰/۳	۲۰۹/۶	۱/۹۸	۸/۱	۲/۲۷	۷/۵	۹۶
۱۹	سابگرید-۲	۱۵	۱۷۵/۸	۷۸/۲	۲/۰۱	۸/۹	۲/۲	۱۰/۱	۹۹
۲۰	سابگرید-۲	۱۶	۱۷۶/۵	۱۴۰/۲	۱/۹۹	۱۰/۲	۲/۰۱	۹/۲	۹۹
۲۱	سابگرید-۲	۱۴	۱۶۹/۴	۱۱۴/۹	۱/۹۶	۹/۲	۱/۹۸	۹/۸	۱۰۰
۲۲	سابگرید-۱	۲۲	۱۳۵/۳	۱۰۰/۵	۱/۹۲	۱۰/۵	۲/۰۱	۹/۱	۹۸
۲۳	سابگرید-۱	۱۴	۱۳۵	۱۱۰/۲	۱/۹۸	۱۱/۱	۱/۹۵	۱۰/۳	۹۸
۲۴	سابگرید-۱	۱۲	۱۲۷/۱	۷۲/۱	۱/۹۴	۵/۸	۲/۱	۹/۷	۹۹

در این جدول مدول ژئوگیج، میانگین مدول محاسبه شده از چندین آزمون ژئوگیج (بین ۳ تا ۵ آزمون) است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، همبستگی اولیه بین نتایج ژئوگیج و VSS و قبل از انجام هر گونه تصحیح نتایج منتج به ضریب همبستگی ۰/۶۱۶می‌شود.



شکل ۵- بررسی اولیه همبستگی بین نتایج ژئوگیج و VSS قبل از انجام تصحیحات

بر اساس شکل۵ نتایج اولیه ژئوگیج و VSS با رابطه ۱ همبسته می گردند.

$$M_{Geo} = 15.92\ M_{VSS}^{0.525} \qquad R^2 = 0.657 \qquad (۱)$$

در رابطه فوق

MGeo: مدول ژئوگیج بر حسب مگاپاسکال و

MVSS: مدول دستگاه VSS بر حسب مگاپاسکال می‌باشند.

۵- تصحیح نتایج VSS

با توجه به اینکه میدان کرنش‌های ایجاد شده توسط ژئوگیج به مراتب کمتر از VSS می‌باشد، انتظار می‌رود که مدول بدست آمده از دستگاه ژئوگیج بزرگتر از مقادیر مشابه VSS باشد. در جدول۲ مقادیری که با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند، مربوط به نتایجی می‌باشد که این انتظار را برآورده نکرده‌اند و صحت آنها مورد سوال می‌باشد. از اینرو نتایج این سه آزمون حذف می گردند. با حذف این سه مورد، مطابق با آنچه در شکل۵ آمده است، مدول ژئوگیج و VSS با R2=0.70 به هم همبسته می گردند[۳].

۶- تصحیح نتایج آزمون ژئوگیج

در اغلب مسائل مهندسی ژئوتکنیک و روسازی، خاک به عنوان یک محیط همگن و همسان در نظر گرفته می‌شود. این فرض در اکثر مراحل اجرا صحیح نمی‌باشد و ممکن است خواص مصالح از یک نقطه به نقطه دیگر، بسیار متفاوت باشد. برای اینکه

مشخص گردد که در یک مجموعه داده، هر یک از مقادیر مطابق با سایر نتایج است یا اینکه به دلیل وقوع یک خطای فاحش[۱] و یا تغییر اساسی مصالح[۲] خارج از محدوده[۳] است، می‌توان از آزمون زیر استفاده کرد.

$$T_0 = \frac{|X_0 - \bar{X}|}{\sigma} \qquad (۲)$$

که در آن X0 هر یک از مقادیر خارج از محدوده مفروض می‌باشد. مقدار T0 حاصل از رابطه () با مقادیر حدی خارج از محدوده (T) موجود در جدول ۳ مقایسه می‌گردد. اگر T0>T باشد، آنگاه مقدار X0 یک مقدار خارج از محدوده تلقی می‌گردد و بایستی از مجموعه نتایج حذف گردد. این فرآیند برای سایر داده‌های موجود در هر مجموعه داده بایستی تکرار گردد[۲۴].

جدول ۳- مقادیر حدی خارج از محدوده (T)

تعداد نمونه	T در سطح اعتمادپذیری[۴]		تعداد نمونه	T در سطح اعتمادپذیری	
	٪۹۵	٪۹۹		٪۹۵	٪۹۹
۳	۱.۱۵	۱.۱۵	۱۲	۲.۲۹	۲.۵۵
۴	۱.۴۶	۱.۴۹	۱۳	۲.۳۳	۲.۶۱
۵	۱.۶۷	۱.۷۵	۱۴	۲.۳۷	۲.۶۶
۶	۱.۸۲	۱.۹۴	۱۵	۲.۴۱	۲.۷۱
۷	۱.۹۴	۲.۱۰	۲۰	۲.۵۶	۲.۸۸
۸	۲.۰۳	۲.۲۲	۲۵	۲.۶۶	۳.۰۱
۹	۲.۱۱	۲.۳۲	۳۰	۲.۷۵	ــــ
۱۰	۲.۱۸	۲.۴۱	۴۰	۲.۸۷	ــــ
۱۱	۲.۲۳	۲.۴۸	۶۰	۳.۰۳	ــــ

بعنوان مثال، مدول‌های اندازه‌گیری شده ژئوگیج در یکی از آزمون‌ها بترتیب برابر ۳۰۶.۸، ۲۱۵.۵، ۲۴۸.۶ و ۲۴۱.۲ مگاپاسکال می‌باشد. میانگین و انحراف معیار این قرائت‌ها بترتیب ۲۵۳ و ۳۳.۴ می‌باشد. برای X0=306.8 ، مقدار T0 بر اساس رابطه ۲ برابر ۱.۶۱ می‌شود. با توجه به اینکه در سطح اعتمادپذیری ۹۵٪ مقدار T برابر ۱.۴۶ می‌باشد؛ و این مقدار کمتر از T0 است، بنابراین X0 مورد نظر در این مثال خارج از محدوده می‌باشد و بایستی از مجموعه داده‌ها حذف گردد. مقدار T0 برای سایر داده‌ها بترتیب برابر ۱.۱۲، ۰.۱۳ و ۰.۳۵ است و همگی کمتر از T می‌باشند. روند ارائه‌شده در مثال فوق، برای ۳۱ آزمون تکرار گردید و بر اساس رابطه ۲ و با در نظر گرفتن سطح اعتمادپذیری ۹۵٪، داده‌های خارج از محدوده شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف شدند[۴].

۷- جمع بندی

۱ Gross Error

۲ Different Origin

۳ Outlier

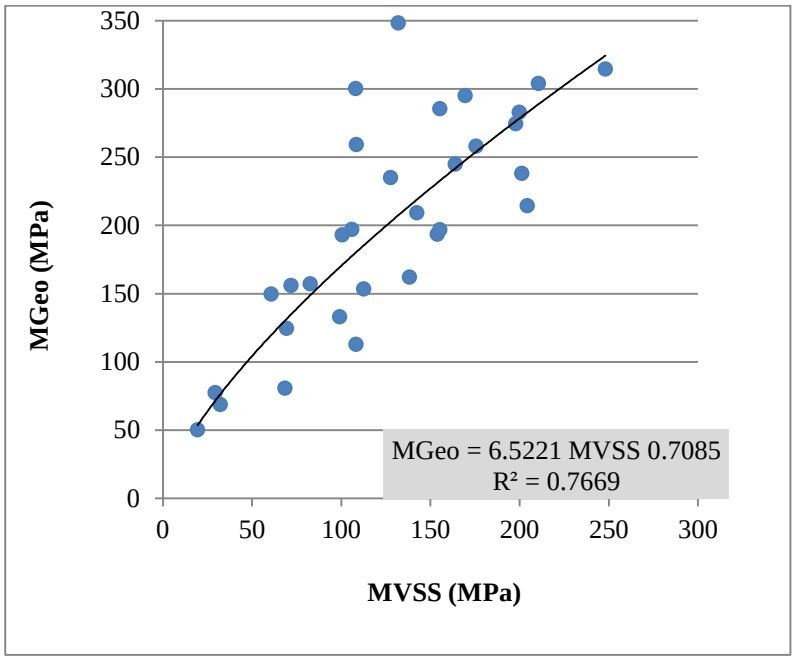
۴ Confidence level

پس از بررسی نتایج آزمون‌ها و انجام تصحیحات براساس موارد گفته شده، نتایج نهایی به صورت زیر به دست آمده است. جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر مدول VSS و میانگین مدول ژئوگیج نهایی پس از اعمال تصحیحات برحسب مگاپاسکال (MPa) می-باشد.

جدول ۴- مقادیر نهایی نتایج پس از اعمال تصحیحات

ردیف	مدول ژئوگیج (*Mpa*)	مدول *VSS* (*Mpa*)		ردیف	مدول ژئوگیج (*Mpa*)	مدول *VSS* (*Mpa*)
۱	۱۴۳/۴	۶۱		۱۲	۱۲۷/۶	۷۹/۶
۲	۲۰۹/۶	۱۴۲		۱۳	۱۶۹/۶	۱۳۶/۲
۳	۲۲۲/۴	۱۳۰		۱۴	۱۷۴/۵	۱۱۰/۱
۴	۲۵۲/۸	۱۱۰/۱		۱۵	۱۳۵/۳	۱۰۱/۴
۵	۲۲۰/۳	۲۰۲/۱		۱۶	۱۲۷/۱	۱۰۷
۶	۸۳	۷۰/۲		۱۷	۱۳۵	۷۰/۵
۷	۲۸۶/۱	۲۵۰/۵		۱۸	۱۹۸/۲	۱۰۷/۷

به منظور بررسی نتایج، داده‌های نهایی در قالب نمودار مدول ژئوگیج برحسب مدول VSS ترسیم شده است. سپس منحنی همبستگی با توجه به بیشترین مقدار ضریب همبستگی، که در حالت غیرخطی مشاهده شده است، رسم گردیده است. شکل ۶ مقادیر مدول ژئوگیج برحسب مدول VSS و منحنی همبستگی بین این مقادیر را نشان می‌دهد.

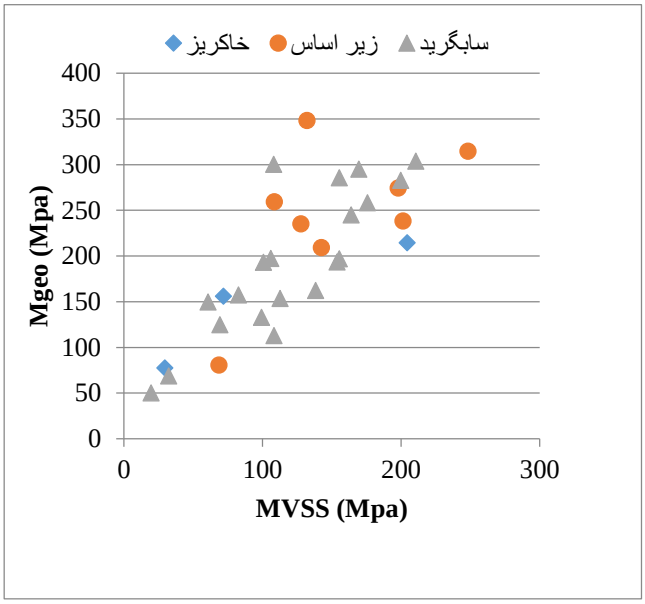


شکل ۶- مدول ژئوگیج برحسب مدول VSS

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود محدوده تغییرات مدول ژئوگیج در تحقیق حاضر ۷۹/۳-۲۹۴/۱ MPa و محدوده تغییرات مدول VSS ، ۳۱/۱-۲۰۲/۶ MPa می‌باشد. رابطه همبستگی بر اساس منحنی همبستگی به دست آمده به صورت رابطه (۳) بوده و نتایج ژئوگیج و آزمون VSS با ضریب همبستگی ۰/۷۵ با هم همبسته می گردند :

$$M_{Geo} = 6.82\, M_{VSS}^{0.752} \qquad R^2 = 0.752 \qquad (۳)$$

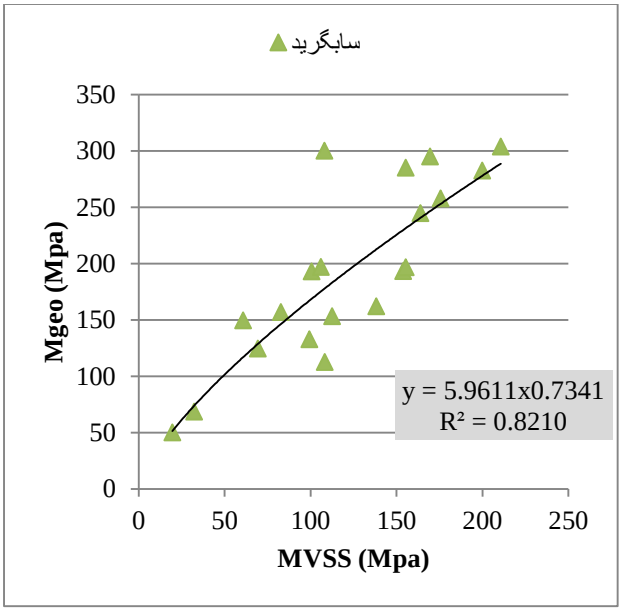
به منظور بررسی بیشتر، نتایج را به تفکیک نوع مصالح مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل ۷ مقادیر مدول ژئوگیج برحسب مدول VSS را به تفکیک برای مصالح زیراساس، سابگرید و خاکریز مورد آزمایش در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. با توجه به تعداد کم آزمون‌های انجام شده در لایه خاکریز، درباره آن اظهار نظر خاصی را نمی‌توان ارائه کرد. آزمون‌های انجام شده بر روی لایه زیر اساس، علیرغم کم بودن تعداد، حاکی از پراکندگی ضمنی نتایج بین دو دستگاه می‌باشد. اما نتایج مربوط به لایه سابگرید نشان‌دهنده همبستگی معناداری بین این دو آزمون می‌باشد[۵].



شکل ۷- بررسی نتایج آزمون ژئوگیج و VSS به تفکیک لایه مورد تست

بر این اساس همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، ضریب همبستگی بین نتایج آزمون ژئوگیج و VSS برای لایه سابگرید که جنس مصالح آن بر اساس طبقه‌بندی آشتو A-2-7 (SC در سیستم طبقه‌بندی متحد) می‌باشد، برابر ۰/۸۰می‌باشد. همبستگی بین دو آزمون بر اساس رابطه(۴) قابل بیان می‌باشد.

$$M_{Geo} = 5.96\, M_{VSS}^{0.734} \qquad R^2 = 0.821 \qquad (۴)$$



شکل ۸- نتایج آزمون ژئوگیج و VSS در لایه سابگرید

همانطور که درشکل ۸ مشاهده می‌شود محدوده تغییرات مدول ژئوگیج در تحقیق حاضر ۲۹۴/۱-۷۹/۳ MPa و محدوده تغییرات مدول VSS ، ۲۰۲/۶-۳۱/۱ MPa می‌باشد.

۸-نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی همبستگی بین آزمون‌های VSS و ژئوگیج در مصالح مورد استفاده و راهسازی با هدف جایگزینی آزمون ژئوگیج به جای VSS به ویژه در کنترل کیفیت لایه‌های راه است.

ژئوگیج دستگاهی الکترومکانیکی است که برای اندازه‌گیری میدانی سختی برجا و مدول الاستیک مصالح به کار برده می‌شود. این دستگاه نسبتا ساده که به راحتی با دست قابل حمل می‌باشد (با وزن حدود ۱۰ کیلوگرم)، با اعمال نیرویی با دامنه کوچک به خاک و اندازه‌گیری تغییرمکان ناشی از این نیرو در فرکانس‌های مختلف لرزش مداوم، "سختی" و "مدول الاستیک خاک" را اندازه‌گیری می‌کند. کل زمان اندازه‌گیری در حدود ۱ دقیقه می‌باشد.

با انجام آزمون ها و بررسی تحقیقات انجام شده بر روی موضوع همبستگی آزمون ژئوگیج با آزمون VSS در پروژه کمربندی خرم آباد (قطعه دوم) ملاحظه گردید که نتایج حاصل از آزمون های ژئوگیج را می توان با تقریب خوبی –بخصوص در لایه های سابگرید و زیراساس- با نتایج آزمون VSS همبسته نمود.

این آزمون‌ها بر روی لایه های اساس، زیراساس و سابگرید در سیستم آشتو (SC در سیستم متحد) انجام گرفت. پس از اعمال تصحیحات و حذف قرائت‌هایی که ناهنجار تلقی شدند، به ترتیب تعداد ۲ داده برای مصالح خاکریز، ۱۱ داده برای مصالح سابگرید و ۹ داده برای مصالح زیراساس حاصل شد. از آنجا که محدوده تغییرات نتایج مدول‌های ژئوگیج و VSS برای هر کدام از لایه‌های سابگرید و زیراساس از پراکندگی مناسبی برخوردار است، در صورتی که تمام داده‌ها به صورت یک مجموعه فرض شوند، مناسب‌ترین همبستگی برای این داده‌ها با ضریب همبستگی برابر ۰/۷۵۲ به دست می‌آید.

همچنین با توجه به تعداد و پراکندگی مناسب مصالح سابگرید، نتایج برای این لایه بصورت مجزا نیز بررسی گردید که منجر به ضریب همبستگی ۰/۸۰ گردید. از اینرو دستگاه ژئوگیج می‌تواند جایگزین مناسبی برای VSS در این لایه و با طبقه‌بندی خاک مشابه، باشد. بررسی پراکندگی سختی در دو مقطع اساس و سابگرید موضوع نهایی این تحقیق بود، که مشخص گردید مصالح این لایه‌ها دارای پراکندگی یکنواخت سختی نمی‌باشند. این عدم یکنواختی سختی مخصوصا در لبه‌های کناری راه می‌تواند نقش مهمی در شکل‌گیری خرابی و گسترش آن به میانه راه داشته باشد. نهایتاً اینکه استفاده از ژئوگیج باعث صرفه جویی قابل ملاحظه ای در زمان و هزینه های صرف شده برای تراکم مطلوب و بهینه لایه های سابگرید، زیراساس و اساس در راهسازی خواهد شد.

۹- مراجع

۱. آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی (۱۳۸۵)، استانداردها و دستورالعمل های آزمایشگاه مکانیک خاک.

۲. طاحونی شاپور (۱۳۸۳)، اصول مهندسی ژئوتکنیک، انتشارات موسسه پارس آیین

3. K. A. Alshibli, M. Abu-Farsakh, and E. Seyman, "Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools," Journal of materials in civil engineering, vol. 17, p. 560, 2005.

4. I. K. Lee, W. White, and O. G. Ingles, Geotechnical Engineering. Pitmans Books Limited, 1983.

۵. شرفی داوودی، عبدالرضا (۱۳۹۲) بررسی همبستگی بین نتایج آزمون ژئوگیج و تراکم صحرایی در پروژه های راهسازی.