

بررسی همبستگی نتایج آزمایشهای CBR، DCP و سه محوری سیکلی (در محور قم-سمنان)

سینا برازوان، کارشناس ارشد، دفتر مهندسين مشاور، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران
منصور فخری (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

E-mail: fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۹۰/۰۴/۲۰ پذیرش: ۹۰/۰۸/۰۱

چکیده

مقاومت سازه‌ای مصالح غیرچسبنده روسازی که با مدول برجهندگی بیان می‌شود شباهت بیشتری با شرایط واقعی دارد. مدول برجهندگی^۱ از تقسیم تنش انحرافی به کرنش برگشت‌پذیر به دست می‌آید که برای تعیین آن نیاز به تجهیزات پیچیده، گران (دستگاه سه محوری سیکلی^۲) و افراد متخصص بوده و انجام این آزمایش در کارگاه‌های مختلف امکان‌پذیر نیست. آزمایش DCP به علت تخریب بسیار کم، جزو آزمایش‌های میدانی نیمه مخرب به شمار می‌آید. در این روش، مقدار نفوذ مخروط در لایه‌های غیرچسبنده روسازی به ازای تعداد ضربات وارده، اندازه‌گیری و میزان مقاومت آنها مشخص می‌شود. این دستگاه ساده و ارزان است. آزمایش آن در محل انجام می‌شود و در مدت زمان نسبتاً کوتاهی مقاومت سازه‌ای تمام لایه‌های غیرچسبنده روسازی را ارزیابی می‌کند. در این تحقیق ضمن معرفی دستگاه DCP^۳ و آشنایی با عملکرد آن، روش انجام آزمایش با این دستگاه بررسی شد. همچنین با انجام آزمایش CBR^۴ و سه محوری سیکلی در کنار این آزمایش، روابط همبستگی نتایج آزمایش DCP با CBR و مدول برجهندگی ارائه شده است. به این منظور، این آزمایشها بر روی ۱۵ نقطه از مصالح بستر قطعه سوم پروژه راهسازی قم- سمنان انجام و پس از تحلیل مشخص شد که همبستگی قوی بین نتایج آزمایش DCP با نتایج آزمایش CBR و سه محوری سیکلی به خصوص با مدول برجهندگی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: CBR، DCP، سه محوری سیکلی، مدول برجهندگی، مصالح غیرچسبنده روسازی.

۱. مقدمه

در سال ۱۹۵۶ اسکالا [Scala,1956] استفاده از DCP را برای تخمین CBR خاکهای چسبنده در محل، بنیان نهاد. استفاده از DCP با طراحی کلین در سال ۱۹۷۵ افزایش یافت [Kleyn,1975]. از آن زمان تحقیقات بسیاری برای بهینه‌سازی این دستگاه انجام شده است [Gabr et al, 2000].

DCP وسیله‌ای موثر برای ارزیابی مقاومت در محل اساس، زیراساس و بستر روسازی است. آزمایش مذکور بسیار ساده، اقتصادی و سریع است که از این لحاظ بر بسیاری آزمایشهای رایج ارجحیت پیدا می‌کند [Hasan and Alshibli, 2010]. دستگاه DCP از یک چکش ۸ کیلوگرمی تشکیل یافته که از فاصله ۵۷۵ میلی‌متری بر یک کفشک متصل به میله فرو رونده می‌افتد، یک مخروط فولادی فشرده با زاویه ۶۰ درجه در انتهای این میله فولادی قرار دارد. قطر قاعده مخروط ۲۰ و قطر میله ۱۶ میلی‌متر است. تعداد دفعات افتادن چکش در برابر نفوذ مخروط برای هر آزمایش ثبت می‌شود تا نرخ نفوذ یا DPI° بر حسب (میلی‌متر بر ضربه) یا (mm/blow) محاسبه شود.

با تحلیل داده‌های این آزمایش می‌توان به نتایج مفیدی از وضعیت روسازی موجود از قبیل ضخامت و مقاومت لایه‌های غیرچسبنده روسازی دست یافت [Alramahi et al, 2010]. این آزمایش نسبتاً سریع انجام می‌شود و پس از اتمام می‌توان محل آزمایش را راحت و سریع به حالت اولیه برگرداند. ضخامت لایه با تغییر مقاومت در عمق قابل تشخیص است.

انجام این آزمایش توسط دو یا سه نفر صورت می‌پذیرد. یک نفر سقوط چکش DCP و دیگری اندازه‌گیری و ثبت عمق نفوذ را انجام می‌دهد.

دستگاه DCP در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲ آزمایش CBR

آزمایش CBR به منظور تعیین مقاومت مصالح غیرچسبنده روسازی بکار گرفته می‌شود. در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راههای ایران (نشریه ۲۳۴)، از آزمایش CBR برای تخمین مدول برجهنگی استفاده می‌شود.

حفظ وضعیت رویه راهها در حد مطلوب و قابل قبول به علت جایگاه شبکه راهها در سیستم حمل و نقل کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای ایجاد چنین مجموعه‌ای نیاز به سیستم مناسب مدیریت و نگهداری راه است. به طور کلی پایه و اساس هر نوع سیستم تصمیم‌گیری مدیریتی، ارزیابی صحیح از وضعیت موجود، پیش‌بینی آینده و در نهایت تصمیم‌گیری بهینه است. زمانی که نیاز به مشخصات مقاومت سازه‌ای روسازی برای طراحی یا بهسازی باشد، لزوم شناخت دقیق ضخامت و وضعیت سازه‌ای روسازی ضروری است [Kavussi et al, 2010]. روشهای میدانی مختلفی برای ارزیابی روسازی راهها وجود دارد که میتوان به روشهای مخرب و غیرمخرب اشاره کرد. یکی از روشهای مخرب، آزمایش DCP است.

همچنین می‌توان با دستگاه DCP مقاومت لایه‌های غیرچسبنده اجرا شده روسازی را به عنوان آزمون کنترل کیفیت، بررسی کرد. در هر صورت، برای استفاده از این تجهیزات لازم است تا نتایج آن را با نتایج آزمایشهای رایج و پرکاربرد سنجیده و روابط آنها بررسی شوند.

۲. معرفی آزمایشهای تحقیق

۱-۲ آزمایش DCP

دستگاه مقاومت سنج دینامیکی (مخروط نفوذسنج دینامیکی) یا DCP وسیله‌ای برای تخمین مدول در محل است که خرابی اندکی در سطح ایجاد می‌کند. از این رو به آن آزمایش نیمه مخرب نیز گفته می‌شود [George et al, 2009]. در این آزمایش مقدار نفوذ مخروط در لایه‌های غیرچسبنده روسازی به ازای تعداد ضربات وارده، اندازه‌گیری شده و از این طریق میزان مقاومت لایه‌های غیرچسبنده روسازی مشخص می‌شود.

این دستگاه وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری سریع مقاومت و اندازه‌گیری مدول الاستیسیته لایه‌های غیرچسبنده روسازی و مدول برجهنگی بستر روسازی طراحی شده است [Chen et al, 2005].

می‌آید. اساس این آزمایش اندازه‌گیری کرنش کاملاً برگشت‌پذیر مصالح در برابر بار وارده است. به این منظور آزمایش در چند گام بارگذاری انجام می‌شود که هر یک از گامهای مختلف بارگذاری چندین بار تکرار شده تا کرنش پلاستیک به صفر رسیده و تمام کرنش برگشت‌پذیر شود. به این منظور تجهیزات و ابزار دقیق متنوع جهت کنترل آزمایش و ثبت نتایج مورد نیاز است که از پیچیدگیهای این آزمایش به شمار می‌آید.

همان طور که در شکل ۲ مشاهده میشود، در ابتدای بارگذاری، تغییر شکل قابل توجهی وجود دارد که به صورت کرنش پلاستیک نشان داده شده است. با افزایش تعداد تکرار، کرنش پلاستیک در هر مرتبه تکرار بارگذاری کاهش می‌یابد. بعد از حدود ۵۰ تا ۲۰۰ تکرار، تغییر شکلها تقریباً بازگشت پذیر میشوند که در شکل با ϵ_p نشان داده شده است.

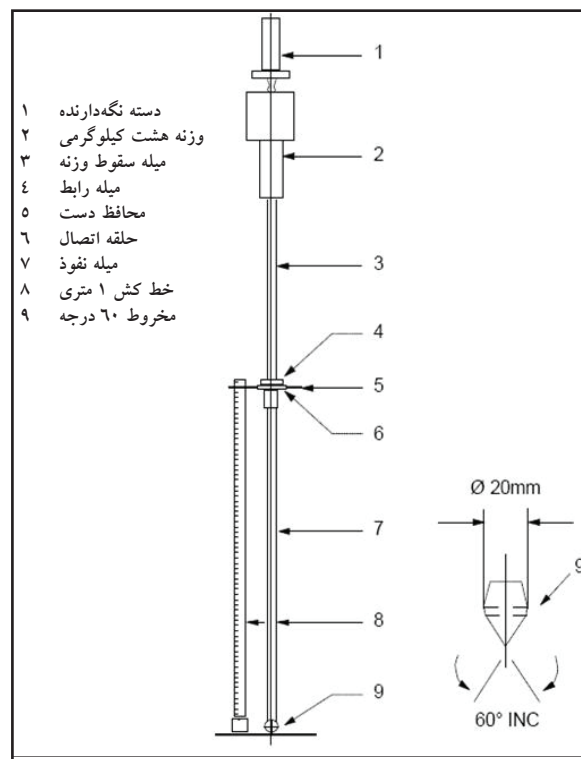
مدول الاستیک بر مبنای کرنش قابل بازگشت تحت تکرار بارگذاری، مدول برجهنگی نامیده میشود و به صورت رابطه (۱)

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_p} \quad (1)$$

که در آن:

σ_d تنش انحرافی وارده به نمونه، ϵ_p کرنش ارتجاعی و M_R مدول برجهنگی است.

برای طرح ضخامت لایه‌های روسازی از جمله خاک بستر لازم است که پارامتر مدول برجهنگی (M_R) مصالح اندازه‌گیری شود. مدول برجهنگی مستقیماً از آزمایش سه محوری سیکلی

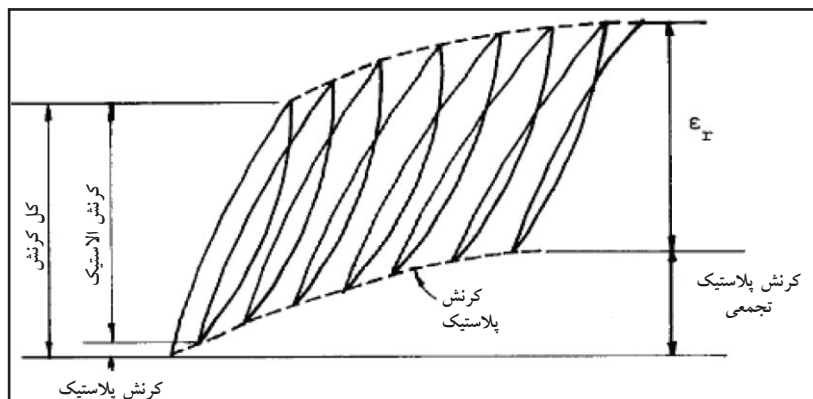


شکل ۱. دستگاه DCP برای تخمین مدول در محل

برای مقایسه نتایج CBR با آزمایشهای میدانی لازم است آزمایش CBR سه نقطه‌ای با رطوبت محل و به صورت غیراشباع انجام شود. سپس CBR معادل با دانسیته خشک محل از نمودار CBR - دانسیته خشک استخراج می‌شود.

۲-۳ آزمایش سه محوری سیکلی

آزمایش سه محوری سیکلی تنها روش مستقیم محاسبه مدول برجهنگی است که آزمایش پرهزینه و نسبتاً پیچیده‌ای به شمار



شکل ۲. کرنش مصالح تحت تکرار بارگذاری [Huang, 1993]

می‌شود. علاوه بر آن با ایجاد تغییر محسوس در اندازه نرخ نفوذ، قرائت انجام می‌شود. هرچه تعداد قرائتها بیشتر باشد، تحلیل نتایج و تعیین ضخامت لایه‌ها دقیق‌تر می‌شود [Mohammad et al., 2009].

آزمایش DCP طبق استاندارد ASTM D۶۹۵۱ انجام می‌شود. دستگاه DCP قدرت لازم برای نفوذ در لایه آسفالتی روسازی را ندارد. در این صورت لازم است حفراهی در لایه آسفالتی ایجاد شود تا مخروط دستگاه DCP را بتوان درون آن قرار داد. این کار بسته به عمق لایه‌های غیرچسبنده تا نفوذ ۹۰۰ میلی‌متر ادامه می‌یابد. در صورتی که به هر دلیل، نفوذ مخروط متوقف گردد بایستی آزمایش در نقطه جدید با فاصله حداقل ۳۰ سانتیمتر تکرار شود.

۴. شرایط انجام آزمایشها

در این مطالعه، تعداد ۱۵ نقطه با فواصل کم بر روی بستر روسازی به منظور انجام آزمایشهای تحقیق انتخاب شد. همگن و یکسان بودن مصالح، علت انتخاب لایه بستر جهت انجام آزمایشهای تحقیق بود. حداقل ضخامت این لایه ۵۰ سانتی‌متر است.

این تحقیق شامل آزمایشهای میدانی و آزمایشگاهی است. روند انجام آزمایشها به این صورت بود که در هر نقطه ابتدا دستگاه DCP روی سطح بستر قرار گرفته و مصالح روسازی تا عمق ۵۰ سانتیمتر ارزیابی می‌شد و میزان نفوذ مخروط DCP به ازای تعداد ضربات نواخته شده ثبت می‌گردید. سپس آزمایش دانسیته و رطوبت در همان نقطه انجام شده و نمونه‌برداری جهت انجام آزمایشهای آزمایشگاهی صورت می‌گرفت.

در آزمایشگاه نیز با توجه به یکسان بودن مصالح، طبقه‌بندی مصالح انجام شده و طبق دانسیته و رطوبت اندازه‌گیری شده، نمونه‌های آزمایشگاهی CBR و سه محوری سیکلی بازسازی و تحت آزمایش قرار گرفتند.

برای انجام آزمایش CBR، نمونه‌های هر ایستگاه در سه قالب با ۱۰-۳۰-۶۵ ضربه در هر لایه با رطوبت محل کوبیده شده و مورد آزمایش قرار گرفت. نسبت باربری کالیفرنیا عبارتست از فشار

(دینامیکی) به دست می‌آید ولی به علت پرهزینه بودن و سختی آزمایش کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مفهوم مدول برجهندگی مصالح ابتدا در سال ۱۹۶۲ تشریح شد [Seed et al, 1962]. مدول برجهندگی پارامتر استاندارد برای تعیین مشخصات مصالح غیرچسبنده محسوب می‌شود، زیرا شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد قسمت ارتجاعی (برجهندگی) خیز نسبت به کل خیز روسازی همبستگی بهتری با خصوصیات عملکردی روسازی دارد [Witczak, 1995].

۳. روش انجام آزمایش DCP

به طور معمول انجام آزمایش توسط سه نفر صورت می‌گیرد. یک نفر برای ثابت نگه داشتن میله اصلی دستگاه، نفر دوم برای ضربه زدن و نفر سوم نتایج را قرائت و ثبت می‌کند [Nazzal et al, 2007].

در زمان انجام آزمایش لازم است میله ثابت و به صورت عمودی نگه داشته شود. سپس وزنه ۸ کیلوگرمی تا ارتفاع ۵۷۵ میلی‌متر (چسبیده به دسته نگهدارنده) بالا برده می‌شود و به صورت سقوط آزاد رها می‌گردد. در بالا بردن وزنه باید دقت شود تا ضربه به دسته نگهدارنده وارد نشود، زیرا این عمل باعث بالا آمدن مخروط در لایه شده و آزمایش را از شرایط استاندارد خارج می‌کند.

با اعمال هر ضربه میزان نفوذ مخروط کنترل می‌شود. اگر نرخ نفوذ بیشتر از ۲۰ میلی‌متر بر ضربه باشد، بعد از اعمال هر ضربه قرائت صورت می‌گیرد. در غیر این صورت مطابق ذیل عمل می‌شود.

- یک قرائت به ازای هر دو ضربه با نفوذ ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر
- یک قرائت به ازای هر پنج ضربه با نفوذ ۵ تا ۹ میلی‌متر
- یک قرائت به ازای هر ده ضربه با نفوذ ۲ تا ۴ میلی‌متر
- برای عمق نفوذ کمتر از ۱ میلی‌متر، به ازای هر ۲۰ ضربه قرائت انجام می‌شود.

به طور مختصر با اعمال ۱ ضربه در مصالح نرم، ۵ ضربه در مصالح متوسط و ۱۰ ضربه در مصالح مقاوم، میزان نفوذ قرائت

بررسی همبستگی نتایج آزمایشهای CBR، DCP و سه محوری سیکلی ...

همان طور که مشاهده می‌شود عدد CBR اکثر نمونه‌ها بسیار بزرگ است و علت آن جنس بسیار مرغوب مصالح و رطوبت پایین نمونه‌ها (کمتر از ۵ درصد) است. نتایج سه محوری سیکلی نیز مربوط به مرحله اول بارگذاری است که بیشترین تنش انحرافی همراه با بیشترین تنش همه‌جانبه به نمونه وارد می‌شود و بیشترین شبیه‌سازی با آزمایش مستقیم میدانی را دارد [Chen et.al, 2005].

لازم به ذکر است که آزمایش میدانی DCP ظرف چند ساعت انجام شد، در صورتی که انجام آزمایشهای آزمایشگاهی CBR و سه محوری سیکلی بیش از یک ماه به طول انجامید. بنابراین استفاده از آزمایش DCP در جهت تسریع پروژه‌های راهسازی بسیار موثر است.

نمودارهای یک آزمایش کامل سه محوری سیکلی مطابق با استاندارد AASHTO T307 برای مصالح بستر روسازی ترسیم شده است (شکل‌های ۵ و ۶). شکل ۵، اندازه مدول برجهنگی در

جدول ۲. نتایج آزمایشهای مقدماتی

N.A	حد روانی %
N.P	گام خمیری %
۱۹	هم‌ارز ماسه‌ای %
SW-SM	طبقه‌بندی Unified
۶/۷	رطوبت بهینه %
۲/۱۸	حداکثر دانسیته خشک (gr/cm^3)

اصلاح شده در ۰/۱ یا ۰/۲ اینچ به ترتیب بر فشار استاندارد ۱۰۰۰ یا ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع که به صورت درصد طبق رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$CBR = \frac{\text{فشار اصلاح شده در 0.1 و 0.2 اینچ}}{\text{فشار استاندارد}} \times 100 \quad (۲)$$

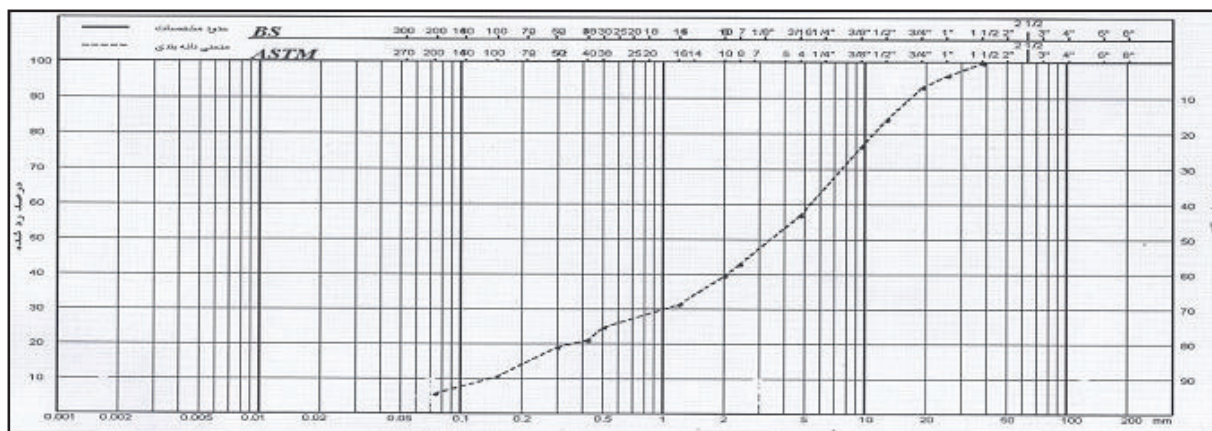
سپس با استفاده از نمودار CBR- دانسیته خشک، مقدار CBR معادل با دانسیته محل استخراج شد.

با توجه به هزینه زیاد و سختی آزمایش سه محوری سیکلی، در ۵ نقطه از ۱۵ نقطه، آزمایش سه محوری سیکلی انجام شد. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T307 و با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح آزمایش، در قالبهای بزرگ (۶ اینچی) انجام شد.

۵. نتایج آزمایشها

با توجه به یکنواخت بودن مصالح تحقیق، آزمایشهای دانه‌بندی، حدود اتربرگ و هم‌ارز ماسه‌ای به منظور طبقه‌بندی خاک و آزمایش پراکتور اصلاح شده طبق استاندارد AASHTO T180 جهت تعیین حداکثر دانسیته خشک خاک، رطوبت بهینه و درصد تراکم لایه بستر انجام شد. شکل ۴ نمودار دانه‌بندی مصالح تحقیق را نشان می‌دهد. نتایج آزمایشهای مقدماتی در جدول ۲ آمده است.

نتایج کامل آزمایشهای این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی مصالح تحقیق

جدول ۳. نتایج کلی آزمایشها

شماره ایستگاه	دانسیته خشک (gr/cm ³)	درصد تراکم	درصد رطوبت	DPI (mm/blow)	CBR %	مدول برجهدگی (Mpa)
۱	۱/۹۱	۸۸	۳/۶	۳/۴	۴۹	-
۲	۱/۸۶	۸۵	۳/۷	۳/۴	۳۷	۲۷۳
۳	۲/۰۴	۹۴	۴/۳	۲/۳	۹۳	-
۴	۱/۹۳	۸۸	۴	۲/۶	۵۱	-
۵	۱/۹۹	۹۱	۵/۲	۲/۹	۷۸	۲۴۸
۶	۲/۱۳	۹۶	۳	۳	۱۰۵	۲۶۰
۷	۲/۱	۹۵	۳/۶	۲/۳	۹۴	-
۸	۲/۱۹	۹۹	۴/۶	۲/۱	۱۲۳	-
۹	۲/۲۳	۱۰۰	۳/۲	۱	۱۱۲	۳۱۰
۱۰	۲/۰۹	۹۴	۲/۷	۱/۸	۱۰۳	-
۱۱	۲/۱	۹۵	۱/۷	۱/۵	۸۹	-
۱۲	۲/۰۴	۹۲	۲/۷	۱/۸	۹۷	۲۹۵
۱۳	۲/۰۴	۹۲	۴	۱	۱۰۴	-
۱۴	۱/۹۸	۸۹	۳/۵	۱	۸۳	-
۱۵	۱/۹۶	۸۸	۵	۱/۶	۴۸	-

می‌کند. در نتیجه ۱۵ مدول برجهدگی مختلف به ازای تنش‌های حجمی $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \theta)$ مختلف به دست می‌آید که بسته به شرایط بارگذاری و عمق قرارگیری لایه مربوطه و غیره، یکی از ۱۵ حالت انتخاب می‌شود. در شکل ۶ نیز مدول برجهدگی برای تنشهای مختلف رسم شده است.

۶. تکرارپذیری آزمایشهای تحقیق

تکرارپذیری از مهم‌ترین پارامترهای هر آزمایش محسوب می‌شود. هر چه تکرارپذیری یک آزمایش بیشتر باشد می‌توان به نتایج آن اطمینان بیشتری نمود. در این تحقیق، تکرارپذیری هر یک از آزمایشها بررسی شده است. به این منظور هر کدام از آزمایشها جداگانه ارزیابی شد. لازم است هر آزمایش بر روی تعدادی نمونه که شرایط کاملاً یکسان دارند انجام شود و انحراف معیار نتایج تعیین گردد. هرچه درصد انحراف معیار کوچک‌تر باشد به معنی

مراحل مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد AASHTO T307، در مرحله اول بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ بارگذاری انجام می‌شود تا تغییرشکل‌های دائمی یا پلاستیک نمونه صورت گیرد. در این مرحله مدول برجهدگی محاسبه نمی‌شود. سپس در ۱۵ مرحله بعدی با تغییر تنش همه‌جانبه و تنش انحرافی، مدول برجهدگی در هر مرحله محاسبه می‌شود. ۱۰۰ بارگذاری در هر یک از این ۱۵ مرحله انجام می‌شود که مدول برجهدگی برای پنج بارگذاری نهایی محاسبه و میانگین آنها در نظر گرفته شده است. ۱۵ مرحله بارگذاری آزمایش سه محوری سیکلی حاصل ترکیب سه تنش همه‌جانبه ۶، ۴ و ۲ psi و پنج تنش انحرافی ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ psi است. از مرحله ۱ تا ۵ تنش همه‌جانبه ثابت بوده (۶ psi) و تنش انحرافی از مقدار حداقل به حداکثر می‌رسد. در مراحل ۶ الی ۱۰ و ۱۱ الی ۱۵ نیز به ترتیب با تنشهای همه‌جانبه ۴ و ۲ psi، تنش انحرافی مانند مراحل ۱ تا ۵ تغییر

این آزمایش است و بخصوص در خاکهای درشت‌دانه و با توجه به مساحت سه اینچ مربعی سنبه استاندارد، در صورتی که سنگ درشت دانه زیر سنبه قرار گیرد، مقاومت بیشتری ثبت می‌شود. جابجایی مصالح بزرگ تر از ۰/۷۵ اینچ در آزمایش CBR به همین دلیل است.

۷. همبستگی نتایج

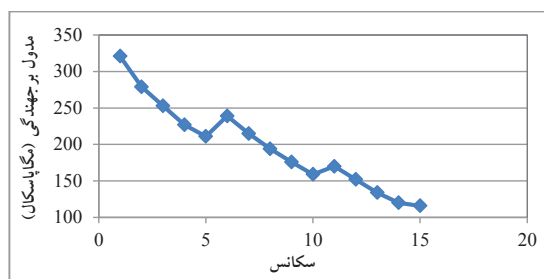
روابط همبستگی حاصل از آزمایشهای این تحقیق توسط نرم‌افزار SPSS تحلیل و ارایه شده است.

۷-۱ ارتباط شاخص CBR و DPI

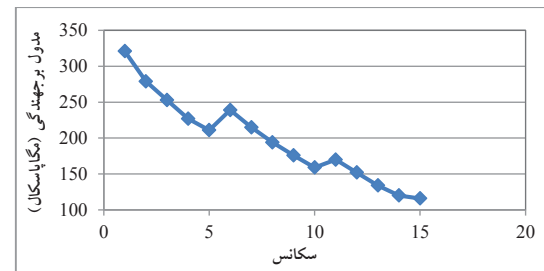
همان طور که گفته شد تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای به منظور بررسی همبستگی شاخص DPI حاصل از آزمایش DCP و نتایج CBR صورت گرفته است. در اینجا مدل‌های ریاضی همبستگی این دو شاخص ارایه شده است. جدول ۴ روابط همبستگی دو شاخص CBR و DPI را نشان می‌دهد. در این روابط DPI بر حسب (mm/blow) و CBR بر حسب درصد است. در این روابط به علت خارج محدوده بودن نتایج، سه نقطه آزمایش از فرایند تحلیل کنار گذاشته شده‌اند. شکل ۷ نمودار روابط همبستگی درصد CBR و نرخ نفوذ DCP را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود رابطه نمایی بهترین رابطه همبستگی برای این دو شاخص است.

جدول ۳. بررسی تکرارپذیری آزمایشهای تحقیق

شماره آزمایش	DPI (mm/blow)	CBR (%)	مدول برجهنگی (Mpa)
۱	۳	۱۰۵	۲۶۰
۲	۲/۵	۹۰	۲۵۲
۳	۳	۷۸	۲۶۸
۴	۲/۹	۱۲۰	۲۷۱
۵	۳/۲	۸۲	۲۴۱
انحراف معیار (%)	۷/۹۳	۱۶/۳۶	۴/۲۳



شکل ۴. نتایج آزمایش سه محوری سیکلی (نمونه ۹)



شکل ۵. نمودار مدول برجهنگی بر حسب تنش انحرافی (نمونه ۹)

تکرارپذیری زیاد و هر چه بزرگ تر باشد به معنی تکرارپذیری کم است. انحراف معیار از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (۳)$$

جهت بررسی تکرارپذیری آزمایش DCP، در ایستگاه ۶ بر روی رئوس یک پنج ضلعی منتظم به ضلع ۲۰ سانتیمتر، ۵ مرتبه آزمایش DCP انجام شد. همچنین تعداد ۵ نمونه از مصالح ایستگاه ۶ همزمان با رطوبت یکسان و در ۵ قالب در شرایط کاملاً مشابه مطابق محل آماده شد و ضمن ایجاد پوشش روی نمونه‌ها به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت، آزمایش CBR یکی پس از دیگری روی نمونه‌ها صورت گرفت. در انتها ۵ نمونه سه محوری سیکلی کاملاً مشابه شرایط محل در ایستگاه ۶ ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایشها و درصد انحراف معیار هر یک از این آزمایشها در جدول ۳ آورده شده است.

مطابق جدول ۳ آزمایش سه محوری سیکلی بیشترین تکرارپذیری و CBR کمترین تکرارپذیری را دارد. همچنین آزمایش CBR با درصد انحراف معیار کم ۷/۹۳٪، تکرارپذیری خوبی دارد و انحراف معیار آن نصف CBR است. این نتیجه به این معنی است که آزمایش DCP قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به CBR دارد. علت پراکندگی زیاد نتایج CBR مربوط به مکانیزم انجام

۲-۷ ارتباط شاخص DPI و مدول برجهنگی

از سه رابطه همبستگی به منظور ارایه مدل پیش‌بینی مدول برجهنگی بر اساس نتایج آزمایش DCP استفاده شد. این روابط بالاترین ضریب همبستگی میان سایر روابط را داشتند. شکل ۸ این سه رابطه را نمایش می‌دهد. در جدول ۵ روابط و ضرایب همبستگی آنها ارایه شده است.

همان طور که رابطه نمایی نشان می‌دهد همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایش DCP و مدول برجهنگی حاصل از آزمایش سه محوری سیکلی با ضریب همبستگی ۸۴٪ وجود دارد. از این رو می‌توان با آزمایش کم‌هزینه و ساده DCP، مدول برجهنگی مصالح غیرچسبنده دانه‌ای روسازی را تعیین و روسازی را به روش مکانیستیک طراحی کرد.

۳-۷ ارتباط شاخص CBR و مدول برجهنگی

در زمینه ارتباط این دو پارامتر نیز تحقیقات گسترده‌ای صورت

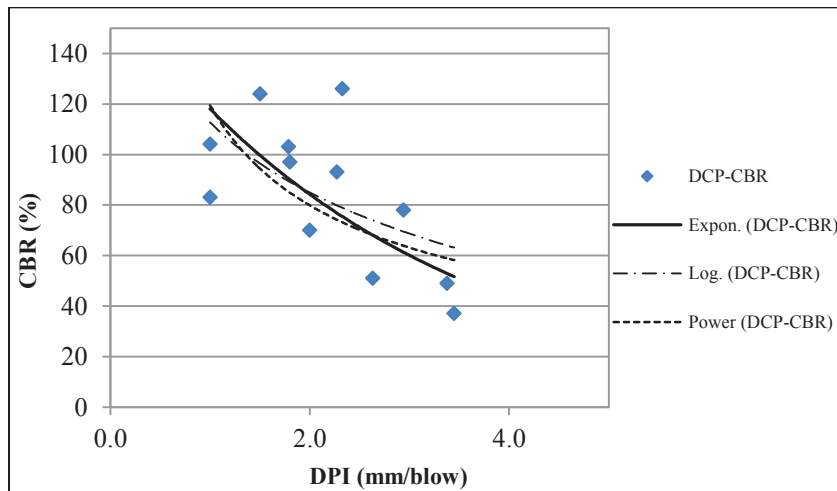
گرفته است. رابطه نمایی (۱۰) بهترین رابطه همبستگی مدول برجهنگی با CBR در تحقیق حاضر شناخته شد. مدول برجهنگی بر حسب مگاپاسکال است.

$$Mr = 304/08e^{-0.0009CBR} \quad R^2 = 0/68 \quad (10)$$

همبستگی نسبتاً قابل قبولی بین مدول برجهنگی و درصد CBR وجود دارد. علت آن پراکندگی داده‌های CBR است.

۴-۷ ارتباط شاخص DPI و درصد تراکم

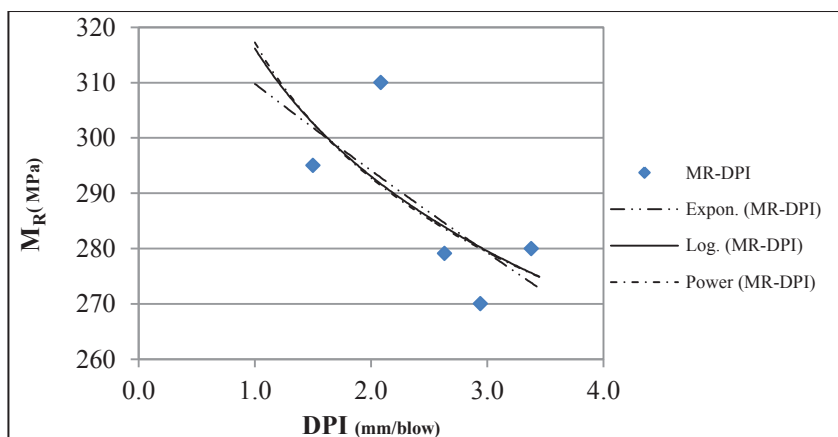
ارتباط نتایج آزمایش DCP و تراکم لایه در نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و روابط ریاضی خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی توسعه داده شد. جدول ۶ روابط مذکور را نشان می‌دهد. تعداد ۳ نقطه از ۱۵ نقطه در محاسبات همبستگی کنار گذاشته شده و تراکم بر حسب درصد و DPI بر حسب (mm/blow) بیان شده است. روابط خطی و نمایی ضرایب همبستگی بالاتری نسبت به روابط لگاریتمی و توانی دارند. می‌توان با تقریب نسبتاً خوبی تراکم



شکل ۶. نمودار روابط همبستگی درصد CBR و نرخ نفوذ DPI

جدول ۴. روابط همبستگی DPI و CBR

شماره رابطه	نوع رابطه	فرمول رابطه	ضریب همبستگی
(۴)	نمایی	$CBR = 169.95e^{-0.342DPI}$	$R^2 = 0/68$
(۵)	توانی	$CBR = 121DPI^{-0.582}$	$R^2 = 0/59$
(۶)	لگاریتمی	$CBR = 114.13 - 40.11 \ln(DPI)$	$R^2 = 0/52$



شکل ۷. نمودار روابط همبستگی DPI و مدول برجهندگی
جدول ۵. روابط همبستگی DPI و مدول برجهندگی

شماره رابطه	نوع رابطه	فرمول رابطه	ضریب همبستگی
(۷)	نمایی	$M_r = 318.93e^{-0.045DPI}$	$R^2 = 0.84$
(۸)	توانی	$M_r = 311.92DPI^{-0.104}$	$R^2 = 0.59$
(۹)	لگاریتمی	$M_r = 311.01 - 29.74 \ln(DPI)$	$R^2 = 0.63$

جدول ۶. روابط همبستگی DPI و تراکم

شماره رابطه	نوع رابطه	فرمول رابطه	ضریب همبستگی
(۱۱)	خطی	تراکم = $-5.4169DPI + 104.9$	$R^2 = 0.72$
(۱۲)	نمایی	تراکم = $105.68e^{-0.059DPI}$	$R^2 = 0.72$
(۱۳)	لگاریتمی	تراکم = $-11.08 \ln(DPI) + 101.14$	$R^2 = 0.69$
(۱۴)	توانی	تراکم = $101.42DPI^{-0.12}$	$R^2 = 0.68$

آورد. از دیگر نقاط قوت این آزمایش، تعیین مقاومت واقعی با در نظر گرفتن شرایط محل و نحوه اجرای لایه‌های روسازی است. - آزمایش DCP در مدت زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شود، در صورتی که آزمایشهای آزمایشگاهی چنین نیست. بنابراین می‌توان با DCP، تعداد نقاط بیشتری در سطح پروژه ارزیابی کرده و ضمن تعیین مقاومت روسازی، نقاط ضعف را مشخص نمود.

- پراکندگی نتایج آزمایش CBR بیشتر از نتایج آزمایش DCP است و سه محوری سیکلی است. علت این امر را می‌توان در مکانیزم آزمایش CBR جستجو کرد.

لایه‌های دانه‌ای را با دستگاه DCP تعیین کرد. لازم به ذکر است که درصد رطوبت نیز تاثیر زیادی در نتایج دارد، ولی با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح و رطوبت پایین، از این پارامتر در روابط همبستگی چشم‌پوشی شده و ثابت در نظر گرفته شده است.

۸ نتایج

- آزمایش DCP در محل انجام می‌شود، کار با آن دستگاه ساده است و ضمن صرف هزینه کمی می‌توان اطلاعات مفیدی از مقاومت و حتی ضخامت لایه‌های غیرچسبنده روسازی به دست

04.03, ASTM International, USA.

-Chen, D. H., Lin, D.F., Liao, P. H. and Bilyeu, J. (2005) "A correlation between dynamic cone penetrometer values and pavement layer moduli", *Geotechnical Testing Journal*, 38 (1).

-Gabr, M. A., Hopkins, K., Coons, J. and Hearne, T. (2000) "DCP criteria for performance evaluation of pavement layers", *ASCE Journal of Performance and Constructed Facilities*, 14 (4), 141-148.

-George, V., Rao, N. H. and Shivashankar, R. (2009) "PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades", *International Journal of Pavement Engineering*, 10-3pp.189-199.

-Hasan, A. and Alshibli, K. A. (2010) "Discrete element simulation of strength properties of Johnson Space Center (JSC-1A) Lunar Regolith Simulant", *ASCE, Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 157-165.

-Huang, Yang H. (1993) "Pavement analysis and design", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

-Kavussi, A. and Rafiei, K. (2010) "Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers", *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(1), pp. 123-129.

-Kleyn, E.G. (1975) "The use of the dynamic cone penetrometer (DCP)", Report No. 2/74 Transvaal Roads Department, South Africa.

-Mohammad, L., Nazzal, M., Abu-Farsakh, M. and Alshibli, K. (2009). "Estimation of subgrade soil resilient modulus from in Situ devices test results", *ASTM, Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37, No. 3, pp. 245-253.

-Nazzal, M. D., Abu-Farsakh, M., Alshibli, K. A. and Mohammad, L. (2007) "Evaluating the LFWD device for in situ measurement of elastic modulus of pavement layers", *Journal of Transportation Research Board*, No. 2016, pp.13-22.

-Scala, A.J. (1956) "Simple methods of flexible pavement design using cone penetrometers" New Zealand

- در حال حاضر با توجه به هزینه زیاد و مشکلات آزمایش سه محوری سیکلی، از آزمایش CBR جهت تخمین مدول برجهندگی استفاده می‌شود در صورتیکه پراکندگی نتایج آزمایش CBR زیاد است. بنابراین با توجه به تکرارپذیری خوب آزمایش DCP، با تعیین روابط همبستگی می‌توان از این آزمایش ساده و کم‌هزینه جهت تعیین مدول برجهندگی خاک بستر استفاده نمود.

- نتایج آزمایش DCP همبستگی خوبی با نتایج آزمون پرکاربرد CBR دارد. بهترین رابطه بین این آزمایشها رابطه نمایی شناخته شد.

- با استفاده از روابط توسعه داده‌شده در این تحقیق می‌توان مدول برجهندگی خاک بستر را توسط آزمایش ساده و ارزان DCP در محل تعیین و به کمک آن با روش مکانیستیک طراحی روسازی نمود.

- بهترین ارتباط بین DPI و مدول برجهندگی با ضریب همبستگی ۸۴٪ به دست آمد که نشان دهنده همبستگی قوی و معنادار DPI و مدول برجهندگی حاصل از آزمایش سه محوری سیکلی است.

- می‌توان درصد تراکم لایه خاکی را به کمک آزمایش DCP با همبستگی نسبتاً خوبی تخمین زد. لازم به ذکر است روابط ارائه شده در این تحقیق برای مصالح درشت دانه غیر چسبنده پیشنهاد شده است.

۹. پی‌نوشتها

- 1- Resilient Modulus
- 2- Dynamic Triaxial
- 3- Cyclic Cone Penetrometer
- 4- California Bearing Ratio
- 5- DCP Penetration Index
- 6- Bulk Stress
- 7- Statistical Package for the Social Sciences

۱۰. منابع

-Alramahi, B. A., Alshibli, K. A. and Fratta, D. (2010) "Effect of fine particle migration on the small-strain stiffness of unsaturated soils", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 4, pp. 620-628.

-ASTM D6951 (2003) "Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications1", *Book of Standards*, Volume

Engineering, 2 (2).

-Seed, H. B., Chan, C. K. and Lee, C. E. (1962) "Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements". Proc., 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

-Witczak, M., Qi, X. and Mirza, M.W. (1995) "Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure", ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 12, No.3.