

بررسی همبستگی نتایج آزمایش‌های CBR، LWD و سه محوری سیکلی

منصور فخری^{۱*}، سینا برازوان^۲

۱- دانشیار گروه راه و ترابری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، گروه ژئوتکنیک، همدان

fakhri@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۱

چکیده- مدول برجهندگی خاک بستر یکی از پارامترهای مهم در طراحی روسازی است که با انجام آزمایش سه محوری سیکلی روی نمونه‌های استوانه‌ای به دست می‌آید. با توجه به پیچیدگی و مشکلات این آزمایش، انجام آزمایش‌های میدانی به شرط وجود همبستگی مناسب بسیار مفید خواهد بود. امروزه کاربرد آزمایش‌های غیرمخرب روسازی در جهان رو به گسترش است. سرعت بالای انجام آزمایش، دقت زیاد تجهیزات اندازه‌گیری، غیرمخرب بودن و پوشش نقاط بیشتر در سطح راه، عمده دلایل استقبال از آزمایش‌های غیرمخرب است. در سال‌های اخیر کاربرد دستگاه غیرمخرب و قابل حمل LWD توسعه پیدا کرده است. این دستگاه قادر است در زمانی اندک و با دقت بالا، نقاط مختلف لایه اجرا شده را از نظر سازه‌ای ارزیابی کند. هدف اصلی این پژوهش امکان‌سنجی انجام آزمایش میدانی با دستگاه LWD به منظور تخمین مدول برجهندگی بستر روسازی و کنترل کیفیت اجرای آن است. بدین منظور یک محور در مرحله اجرای بستر روسازی برای انجام آزمایش‌های پژوهش انتخاب شد و آزمایش‌های CBR، LWD و سه محوری سیکلی بر روی مصالح انجام شد. همچنین تراکم هر نقطه اندازه‌گیری شد تا با نتایج LWD مقایسه شود. پس از بررسی نتایج مشخص شد ارتباط خوبی بین نتایج آزمایش‌های پژوهش به خصوص LWD و سه محوری سیکلی وجود دارد. همچنین پراکندگی داده‌های آزمایش LWD کمتر از نتایج آزمایش CBR است و دستگاه LWD به منظور کنترل کیفیت لایه بستر بسیار مناسب است.

واژگان کلیدی: CBR، LWD، سه محوری سیکلی، مدول برجهندگی

۱- مقدمه

از دستگاه FWD انجام گرفته است. این پژوهش‌ها منجر به ایجاد روش‌های تجربی- مکانیستیک و مکانیستیک کالبره شده در طراحی روسازی شد [۱] و [۲]. پس از استقبال از دستگاه FWD، نمونه کوچک و قابل حمل آن با نام LWD^۳ توسعه پیدا کرد. معرفی دستگاه LWD در سال‌های اخیر

دستگاه‌های FWD^۱ و HWD^۲ به عنوان ابزار غیرمخرب برای ارزیابی سازه‌ای روسازی‌های راه و فرودگاه استفاده می‌شوند. تلاش‌های زیادی برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی به کمک مقادیر افت‌وخیز به دست آمده

3- Light Weight Deflectometer

1- Falling Weight Deflectometer
2- Heavy Weight Deflectometer

منجر به ایجاد سوال درباره صحت پارامترهای اندازه‌گیری شده و همبستگی نتایج آن با آزمایش‌های دیگر شده است [۳].

۲- معرفی آزمایش‌های پژوهش

۱-۲- آزمایش LWD

دستگاه LWD نمونه کوچک شده FWD با همان ساز و کار است. از این رو به آن ^۱PFWD (FWD قابل حمل) می‌گویند. در سال‌های اخیر این دستگاه توسعه یافته و می‌تواند به صورت آبی مدول الاستیسیته مصالح غیرچسبنده روسازی را مشخص کند [۴].

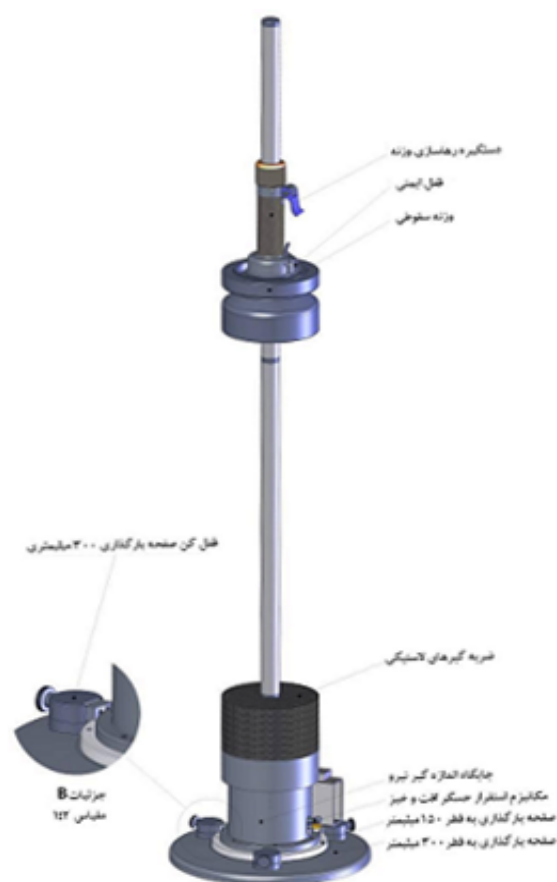
دستگاه LWD قادر به تولید تنش‌های کوچک است. پس کاربرد اصلی آن به مصالح غیرچسبنده روسازی (اساس، زیراساس، بستر) محدود می‌شود [۵]. هرچند که تاکنون پژوهش‌هایی برای کاربرد LWD در لایه آسفالتی روسازی صورت گرفته و در دست بررسی است [۶]. این دستگاه سبک بوده (حدود ۲۲ کیلوگرم) و قابل حمل به وسیله‌ی یک نفر است. از دیگر ویژگی‌های LWD قیمت پایین دستگاه نسبت به FWD (کمتر از یک دهم) [۷] و دستگاه دارای استاندارد ASTM به شماره E2583 است. دستگاه LWD در شکل ۱ نشان داده شده است.

براساس تئوری بوسینسک و با فرض بارگذاری ثابت، مقدار مدول LWD براساس خیز ژئوفون مرکزی به دست می‌آید.

$$E_0 = \frac{f(1 - \nu^2)P}{\pi \cdot a \cdot D_0} \quad (1)$$

در این رابطه، P بیشینه بار وارده روی صفحه بارگذاری، D_0 بیشینه خیز ژئوفون مرکزی، ν ضریب پواسون، a شعاع صفحه بارگذاری و f پارامتر سختی صفحه بارگذاری است

که به توزیع تنش زیر صفحه و صلبیت صفحه بستگی دارد.



شکل (۱) دستگاه LWD

۲-۲- آزمایش CBR

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

برای مقایسه نتایج CBR با آزمایش‌های میدانی لازم است آزمایش CBR سه نقطه‌ای با رطوبت محل و به صورت غیراشباع انجام شود [۸]. سپس CBR معادل با دانسیته خشک محل از نمودار CBR - دانسیته خشک استخراج می‌شود. ASTM D1883 و AASHTO T193 استانداردهای آزمایش

1- Portable Falling Weight Deflectometer

شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد قسمت ارتجاعی (برجهندگی) خیز نسبت به کل خیز روسازی همبستگی بهتری با خصوصیات عملکردی روسازی دارد [۱۱].

همان‌گونه که در شکل ۳ 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 پیدا می‌کند. در خاک‌ها بعد از حدود ۵۰ تا ۲۰۰ تکرار بارگذاری، تمامی تغییرشکل‌ها بازگشت پذیر می‌شوند که در شکل با ϵ_r نشان داده شده است.

مدول الاستیک بر مبنای کرنش قابل بازگشت تحت تکرار بارگذاری، مدول برجهندگی نامیده می‌شود و به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

که در آن، σ_d تنش انحرافی وارده به نمونه، ϵ_r کرنش ارتجاعی و M_R مدول برجهندگی است.

CBR است که با توجه به کاربرد بیشتر آیین‌نامه AASHTO در آزمایش‌های مربوط به شاخه راه، استاندارد AASHTO T193 استفاده شده است. استاندارد AASHTO T193 در آخرین ویرایش خود بسیار شبیه به ASTM D1883 است و تنها اختلاف بارز آن در تعداد ضربات وارده در هر لایه به منظور تراکم است. شکل ۲ مراحل آماده‌سازی نمونه‌های CBR این پژوهش را نشان می‌دهد.

۲-۳- آزمایش سه محوری سیکلی

برای طرح ضخامت لایه‌های روسازی از جمله خاک بستر لازم است که پارامتر مدول برجهندگی (M_R) مصالح اندازه‌گیری شود. مدول برجهندگی از آزمایش سه محوری سیکلی (دینامیکی) به دست می‌آید ولی به علت پرهزینه بودن و سختی آزمایش استفاده نمی‌شود [۹].

مفهوم مدول برجهندگی مصالح ابتدا در سال ۱۹۶۲ تشریح شد [۱۰]. مدول برجهندگی پارامتر استاندارد برای تعیین مشخصات مصالح غیرچسبنده محسوب می‌شود. زیرا



شکل (۲) مراحل آماده‌سازی نمونه‌های CBR

بارگذاری.

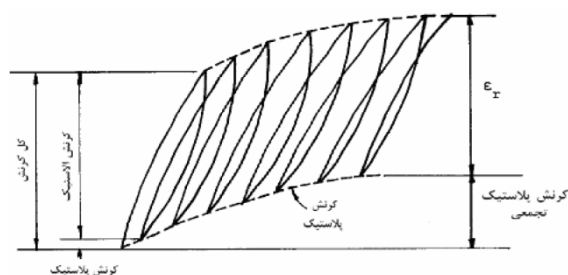
با تغییر وزنه‌ها، ارتفاع سقوط و صفحه بارگذاری می‌توان به تنش مورد نظر دست یافت. تنش بزرگتر با افزودن وزنه، زیاد کردن ارتفاع سقوط و کاهش قطر صفحه بارگذاری ایجاد می‌شود [۱۴]. تعداد ژئوفون نیز بستگی به تعداد لایه‌های روسازی دارد، برای لایه همگن با یک ژئوفون می‌توان مدول الاستیسیته لایه را تعیین کرد ولی برای سیستم چند لایه (بستر - زیراساس - اساس) نیاز به ژئوفون‌های بیشتر برای تعیین مدول هر لایه است و با یک ژئوفون مدول کلی لایه‌ها به دست می‌آید. زمان بارگذاری نیز با تغییر تعداد یا جنس فنرهای ضربه‌گیر تغییر می‌کند. استاندارد، مدت زمان بارگذاری را ۲۰ الی ۴۰ میلی‌ثانیه تعیین کرده است.

تجهیزات و شرایط انتخاب شده دستگاه LWD در جدول ۱ ارائه شده است. با این شرایط تنشی برابر با ۱۲۰ کیلوپاسکال به سطح بستر اعمال شده که با توجه به درشت دانه بودن مصالح بستر تنش مناسبی است.

جدول (۱) تجهیزات و شرایط انتخاب شده برای LWD

۱۰	وزنه (کیلوگرم)
۰/۳	قطر صفحه بارگذاری (متر)
۷۰	ارتفاع سقوط وزنه (سانتی‌متر)
red pad + ۲ black pad	بافر (ضربه‌گیر)
۲۵	زمان بارگذاری (میلی ثانیه)
۱	تعداد ژئوفون

برای انجام آزمایش CBR، نمونه‌های هر نقطه در سه قالب با ۱۰-۳۰-۶۵ ضربه در هر لایه با رطوبت محل کوبیده شده و آزمایش شد. نسبت باربری کالیفرنیا عبارتست از فشار 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 بیان می‌شود.



شکل (۳) کرش مصالح تحت تکرار بارگذاری [۱۰]

۳- روش انجام کارهای میدانی و آزمایشگاهی

در این مطالعه، تعداد ۱۵ نقطه با فواصل کم بر روی بستر روسازی به منظور انجام آزمایش‌های پژوهش انتخاب شد. عدم نیاز به انجام محاسبات بازگشتی و یکسان بودن مصالح در عمق، علت انتخاب لایه بستر برای انجام آزمایش‌های پژوهش بود. کمینه ضخامت این لایه ۵۰ سانتی‌متر است.

این پژوهش شامل آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی است. روند انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که در هر نقطه ابتدا دستگاه LWD روی سطح بستر قرار گرفته و طی ۶ الی ۷ مرتبه آزمایش و میانگین‌گیری ۳ آزمون آخر، مدول سطحی بستر به وسیله‌ی این دستگاه مشخص می‌شد. سپس آزمایش دانسیته و رطوبت در آن نقطه زیر صفحه بارگذاری LWD انجام و در ادامه نمونه‌برداری برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی صورت می‌گرفت.

در آزمایشگاه نیز با توجه به یکسان بودن مصالح، طبقه‌بندی مصالح انجام شده و بر اساس دانسیته و رطوبت اندازه‌گیری شده، نمونه‌های آزمایشگاهی CBR و سه محوری سیکلی بازسازی و آزمایش شد. لازم به ذکر است که نوع مصالح، SW-SM تعیین شده است.

قبل از انجام آزمایش LWD، باید شرایط انجام آزمایش و تجهیزات لازم آزمایش را مشخص کرد [۱۳]. فاکتورهای اصلی که برای انجام آزمایش LWD باید مشخص شوند عبارت است از: تنش، تعداد و فاصله ژئوفون‌ها و زمان

طبقه‌بندی خاک و آزمایش پراکتور اصلاح شده طبق استاندارد AASHTO T180 D برای تعیین بیشینه دانسیته خشک خاک، رطوبت بهینه و درصد تراکم لایه بستر در یک نقطه انجام شد. شکل ۴ نمودار دانه‌بندی مصالح مورد بررسی را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های مقدماتی در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های مقدماتی

N.A	حد روانی %
N.P	گام خمیری %
19	هم‌ارز ماسه‌ای %
SW-SM	طبقه‌بندی Unified
6.7	رطوبت بهینه %
2.18	حداکثر دانسیته خشک (gr/cm ³)

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

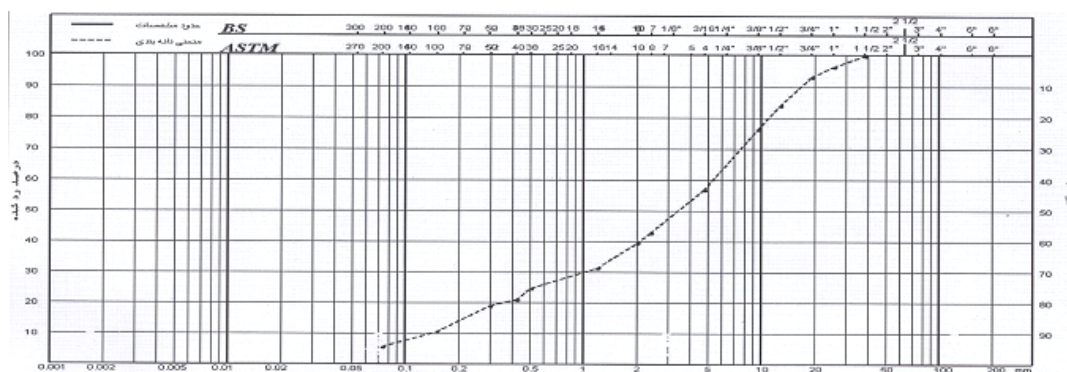
$$CBR = \frac{\text{فشار اصلاح شده در } 0.1 \text{ و } 0.2 \text{ اینچ}}{\text{فشار استاندارد}} \times 100 \quad (3)$$

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

با توجه به هزینه زیاد و پیچیدگی آزمایش سه محوری سیکلی، در ۵ نقطه از ۱۵ نقطه، انجام آزمایش سه محوری سیکلی در دستور کار قرار گرفت. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T307 و با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح آزمایش در قالب‌های بزرگ ۶ اینچی انجام شد.

۴- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به یکنواخت بودن مصالح پژوهش، آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ و هم‌ارز ماسه‌ای به منظور

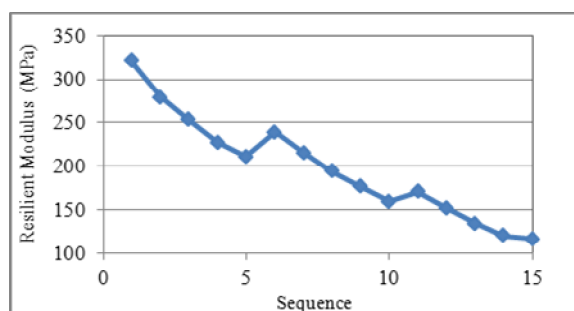


شکل (۴) نمودار دانه‌بندی مصالح پژوهش

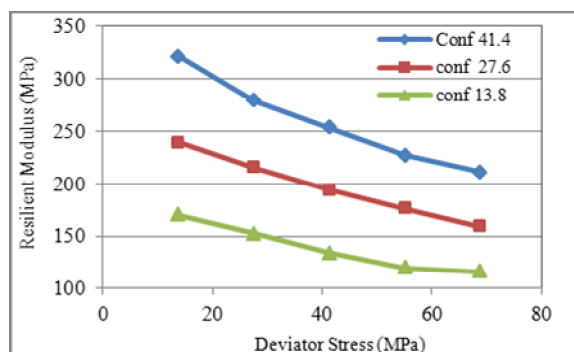
جدول (۳) نتایج کلی آزمایش‌ها

شماره ایستگاه	دانسیته خشک (gr/cm ³)	درصد تراکم	درصد رطوبت	مدول LWD (Mpa)	CBR %	مدول برجهنگی (Mpa)
1	1.91	88	3.6	235	49	-
2	1.86	85	3.7	217	37	273
3	2.04	94	4.3	292	93	-
4	1.93	88	4	222	51	-
5	1.99	91	5.2	198	78	248
6	2.13	96	3	248	105	260
7	2.1	95	3.6	254	94	-
8	2.19	99	4.6	307	123	-
9	2.23	100	3.2	291	112	310
10	2.09	94	2.7	198	103	-
11	2.1	95	1.7	218	89	-
12	2.04	92	2.7	261	97	295
13	2.04	92	4	244	104	-
14	1.98	89	3.5	322	83	-
15	1.96	88	5	246	48	-

۱۰ و ۱۱ الی ۱۵ نیز به ترتیب با تنش‌های همه‌جانبه ۴ و ۲ psi، تنش انحرافی مانند مراحل ۱ تا ۵ تغییر می‌کند. در نتیجه ۱۵ مدول برجهندگی مختلف به ازای تنش‌های حجمی $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ مختلف بدست می‌آید که بسته به شرایط بارگذاری و عمق قرارگیری لایه مربوطه و غیره، یکی از ۱۵ حالت انتخاب می‌شود. در شکل ۶ نیز مدول برجهندگی برای تنش‌های مختلف رسم شده است.



شکل (۵) نتایج آزمایش سه محوری سیکلی (نمونه ۹)



شکل (۶) نمودار مدول برجهندگی بر حسب تنش انحرافی (نمونه ۹)

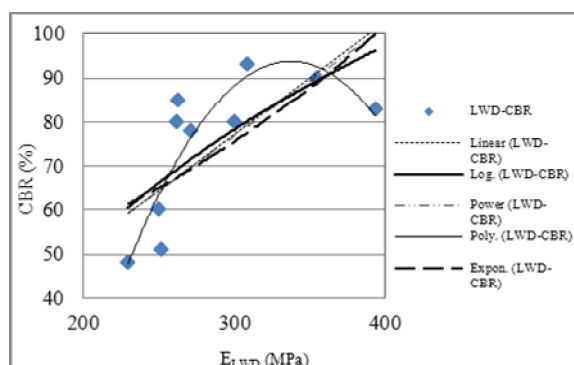
با رسم نمودار شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان به صحت آزمایش پی برد. اگر مشکلی در نمونه مصالح، تجهیزات دستگاه، خروج از محوری امتداد میله بارگذاری و نمونه یا هر جزء دیگر آزمایش وجود داشته باشد، شکل منظم این نمودارها حاصل نمی‌شود. شکل‌های منظم ۵ و ۶ یک آزمایش سالم سه محوری سیکلی را نشان می‌دهد.

علاوه بر این می‌توان الگوی رفتار مصالح تحت

همان‌گونه که مشاهده می‌شود عدد CBR بیشتر نمونه‌ها بسیار زیاد است و علت آن جنس بسیار مرغوب مصالح و رطوبت پایین نمونه‌ها (کمتر از ۵ درصد) است. نتایج آزمایش سه محوری سیکلی نیز مربوط به مرحله اول بارگذاری است که بیشترین تنش انحرافی همراه با بیشترین تنش همه‌جانبه به نمونه وارد می‌شود و مطابق پژوهش به عمل آمده به وسیله جورج، بیشترین شباهت با آزمایش LWD بر روی بستر را دارد [۳].

نکته قابل توجه در مورد مدت زمان انجام آزمایش‌ها این بود که تمامی فعالیت‌های میدانی ظرف چند ساعت صورت پذیرفت در صورتی که انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بالغ بر یک ماه زمان برد.

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 برجهندگی در مراحل مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد AASHTO T307، در مرحله اول^۱ بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ بارگذاری انجام می‌شود تا تغییرشکل‌های دائمی یا پلاستیک نمونه صورت بگیرد. در این مرحله مدول برجهندگی محاسبه نمی‌شود. سپس در ۱۵ مرحله بعدی با تغییر تنش همه‌جانبه و تنش انحرافی، مدول برجهندگی در هر مرحله محاسبه می‌شود. ۱۰۰ بارگذاری در هر یک از این ۱۵ مرحله انجام شده که مدول برجهندگی برای پنج بارگذاری نهایی محاسبه و میانگین آنها لحاظ می‌شود. 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 می‌باشد. از مرحله ۱ تا ۵ تنش همه‌جانبه ثابت بوده (۶ psi) و تنش انحرافی از مقدار کمینه به بیشینه می‌رسد. در مراحل ۶ الی



شکل (۷) گراف روابط همبستگی LWD و CBR

جدول (۴) روابط همبستگی مدول LWD و CBR

شماره رابطه	نوع رابطه	فرمول رابطه	ضریب همبستگی
(۴)	خطی	$CBR = 0.26E_{LWD}$	$R^2 = 0.43$
(۵)	لگاریتمی	$CBR = 66.42 \ln(E_{LWD}) - 300.6$	$R^2 = 0.49$
(۶)	توانی	$CBR = 0.295 E_{LWD}^{0.974}$	$R^2 = 0.48$
(۷)	نمایی	$CBR = 30.82 e^{0.003 E_{LWD}}$	$R^2 = 0.42$
(۸)	چندجمله‌ای درجه ۲	$CBR = -0.004 E_{LWD}^2 + 2.683 E_{LWD} - 359.0$	$R^2 = 0.77$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود همبستگی مدل چندجمله‌ای درجه ۲ ضریب همبستگی بالاتری نسبت به سایر روابط دارد. البته در مدل‌های خطی، نمائی، لگاریتمی و توانی، ضرایب پایین همبستگی حکایت از غیر قابل اطمینان بودن این روابط دارند. همچنین در این مورد، رابطه همبستگی چندجمله‌ای معمول و مرسوم نیست. علت همبستگی ضعیف این دو آزمایش، ماهیت آزمایش CBR و نتایج متفاوت آن بر روی مصالح یکسان به‌خصوص در خاک‌های درشت‌دانه است. ضریب رگرسیون خطی با عرض از مبدا صفر در این پژوهش ۰/۲۶ است. این مقادیر برای سه پژوهش دیگر که بر روی مصالح ریزدانه، متوسط و درشت‌دانه انجام شده است به ترتیب ۰/۵۲، ۰/۴۳ و ۰/۳۲ است [۵]. می‌توان نتیجه گرفت هرچه مقاومت خاک بیشتر می‌شود این ضریب کاهش می‌یابد و رابطه خطی، رگرسیون مناسبی برای این دو پارامتر نیست. یا باید برای طیف

بارگذاری‌های مختلف را مشخص کرد. همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود مدول برجهندگی مصالحی که الگوی رفتار درشت‌دانه دارند با افزایش تنش همه‌جانبه افزایش می‌یابد ولی در خاک‌های ریزدانه که به وسیله‌ی جورج بررسی شده این چنین نیست [۳].

۵- همبستگی نتایج

روابط همبستگی حاصل از آزمایش‌های این پژوهش به وسیله‌ی نرم‌افزار SPSS^۱ تحلیل و ارائه شده است.

۵-۱- ارتباط مدول LWD و شاخص CBR

با توجه به ماهیت این دو متغیر و پتانسیل آنها در ارزیابی خصوصیات سازه‌ای خاک انتظار می‌رود همبستگی مناسبی به دست آید. باید توجه داشت که لازمه این همبستگی کنترل شرایط آزمایش و حذف داده‌های غیرمنطقی و خارج محدوده است.

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) آزمایش شناخته شده‌ای برای ارزیابی کیفیت ساخت لایه‌های غیرچسبده روسازی محسوب می‌شود. ولی یکی از عیوب این آزمایش زمان‌بر بودن انجام آن است. لذا تخمین CBR مصالح از طریق آزمایش‌های سریعتر مانند LWD اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه براساس تحلیل رگرسیون توابع مختلف که بین CBR و مدول دستگاه LWD روی ۱۵ نمونه میدانی صورت گرفت، مدل‌های رگرسیونی مطابق شکل ۷ به دست آمد. لازم به ذکر است ۵ نقطه در تحلیل کنار گذاشته شد. روابط همبستگی این دو آزمایش نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

در این روابط، مدول دستگاه LWD برحسب مگاپاسکال و CBR برحسب درصد است.

1- Statistical Package for the Social Sciences

مختلف مصالح، روابط خطی مختلفی ارائه شود.

$$R^2 = 0.66 \quad (13)$$

$$Mr = 304.08e^{-0.0009CBR}$$

۵-۲- ارتباط مدول LWD و مدول برجهندگی حاصل از آزمایش سه محوری

آزمایش سه محوری سیکلی روی پنج نمونه مصالح گرفته شده از محل انجام شد. مدول برجهندگی حاصل از این آزمایش با مدول سختی به دست آمده از آزمایش LWD در محل مقایسه شد و روابط مختلف بین آنها برقرار شد. روابط همبستگی مدول LWD و مدول برجهندگی در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول مدولها بر حسب مگاپاسکال هستند.

جدول (۵) روابط همبستگی مدول LWD و مدول برجهندگی حاصل از آزمایش سه محوری سیکلی

شماره رابطه	نوع رابطه	فرمول رابطه	ضریب همبستگی
(۹)	خطی	$Mr = 1.15E_{LWD}$	$R^2 = 0.35$
(۱۰)	نمایی	$Mr = 194.47e^{0.0015E_{LWD}}$	$R^2 = 0.69$
(۱۱)	توانی	$Mr = 32.116E_{LWD}^{0.395}$	$R^2 = 0.70$
(۱۲)	لگاریتمی	$Mr = 112.99\ln(E_{LWD}) - 339.01$	$R^2 = 0.79$

رابطه خطی برای این دو پارامتر توصیه نمی شود [۳]. همان گونه که مشاهده می شود ضرایب همبستگی نشان دهنده ارتباط معنی دار آزمایش مشکل و پرهزینه سه محوری سیکلی با نتایج آزمایش ساده، ارزان و سریع LWD است.

۵-۳- ارتباط شاخص CBR و مدول برجهندگی حاصل از آزمایش سه محوری

در زمینه ارتباط این دو پارامتر نیز پژوهش های گسترده ای صورت گرفته است. رابطه نمایی (۱۳) بهترین رابطه در پژوهش حاضر شناخته شد. مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال است.

۵-۴- ارتباط مدول LWD و درصد تراکم

خاک بستر روسازی در این پروژه درشت دانه بوده و از جنس ماسه است. با توجه به درشت دانه بودن مصالح و پایین بودن درصد رطوبت بهینه، از عامل رطوبت برای کاهش فاکتورهای مؤثر در ارتباط بین نتایج تراکم با LWD چشم پوشی شده است. رابطه (۱۴) همبستگی درصد تراکم لایه و مدول الاستیسیته دستگاه LWD را نشان می دهد.

$$Compaction = 0.2838E_{LWD} + 20.08 \quad R^2 = 0.83 \quad (14)$$

ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.83$ به دست آمده است که نشان دهنده همبستگی بسیار خوب درصد تراکم لایه و مدول الاستیسیته میانگین دستگاه LWD است. در نتیجه در خاک های دانه ای که درصد رطوبت بهینه پایینی دارند می توان توسط LWD با درصد اطمینان بالایی تراکم لایه را تخمین زد.

۶- نتایج

- این پژوهش روی مصالح درشت دانه SW-SM انجام شده است و با توجه به رفتار متغیر خاک ها و تأثیر پارامترهای مختلف در مقاومت آنها نتایج آن قابل تعمیم به تمام مصالح نیست و برای این کار پژوهش های گسترده ای لازم است.
- دستگاه LWD قادر است با تجهیزات اندازه گیری دقیق و هزینه کم در مدت زمانی بسیار کمتر از آزمایش های آزمایشگاهی مدول برجهندگی مصالح را در محل تخمین بزند.
- پراکندگی نتایج آزمایش CBR به علت ماهیت خود آزمایش، نسبت به LWD و سه محوری سیکلی بسیار بیشتر است.

- [6] Steinert, B. C.; Humphrey, D. N.; Kestler, M. A. 2006. Portable falling weight deflectometers for tracking seasonal stiffness variations in asphalt surfaced roads. Transportation Research Board Meeting, National Research Council, CD-ROM, Washington D.C.
- [7] Seyman, E. 2003. Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/ quality assurance tools. M.Sc. Thesis, Louisiana State University.
- [8] George, V.; Rao, N. H.; Shivashankar, R. 2009. PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades, International Journal of Pavement Engineering 10(3):189-199.
- [9] Gudishala, R., (2004), "Development of Resilient Modulus Prediction Models for Base and Subgrade Pavement Layers from In-Situ Devices Test Results", M.S. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge.
- [10] 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.
- [11] Witczak, M., Qi, X. and Mirza, M.W., (1995), "Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure", ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, No. 3.
- [12] Huang, Yang H., (1993), "Pavement Analysis and Design", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [13] 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.
- [14] 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.
- مدول به دست آمده از آزمایش LWD ارتباط بسیار خوبی با نتایج آزمایش سه محوری سیکلی دارد. بر اساس این پژوهش بهترین مدل همبستگی نتایج این دو آزمایش مدل لگاریتمی است.
- بهترین همبستگی آزمایش‌های پژوهش مربوط به LWD و سه محوری دینامیکی با ضریب همبستگی ۷۹٪ است.
- مدول LWD همبستگی بسیار خوبی با تراکم لایه‌های خاکی درشت‌دانه دارد و می‌توان از این دستگاه به منظور کنترل کیفیت اجرای این مصالح استفاده کرد.

۷- منابع

- [1] Fleming P. R.; Frost M. W.; Lambert J. 2007. A review of the Light Weight Deflectometer (LWD) for routine insitu assessment of pavement material stiffness, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2004/2007, 80-87.
- [2] Horak E and "The use of Surface Moduli as determined with the Falling Weight Deflectometer" Paper accepted for presentation at the Southern Africa Transpotation Conference (SATC), Pretoria, July 2007.
- [3] George, K. P. 2006. Portable FWD (PRIMA 100) for in-situ subgrade evaluation. Final Report, Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-06-179.
- [4] 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 the Transportation Research Board, No. 2016, pp.13-22.
- [5] Rafiei, K. and Kavussi, A. (2010). "Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers", Journal of Civil Engineering and Management, 16(1): 123-129.

Correlation of LWD, CBR and Cyclic-Triaxial Tests

M. Fakhri^{1*}, S. Brazvan²

1- Associate Prof., School of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- M.Sc. of Geotechnical Eng., Science and Research branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

fakhri@kntu.ac.ir

Abstract:

The resilient modulus of subgrade is an important factor in pavement design which is determined by cyclic triaxial test on cylindrical samples. Due to test complication and difficulties, other tests could be useful if there is an appropriate correlation between results. Nowadays non-destructive testing of pavement is growing in the world as they are rapid, without destruction and have precision measuring equipment. In recent years the application of LWD has been widely developed. This device evaluates pavement structure of several locations in short time with high accuracy. The main objective of this paper is to evaluate the LWD feasibility in order to estimate subgrade resilient modulus and the quality control of construction. So the in-construction road path have been chosen, then LWD field test, CBR laboratory test and finally cyclic triaxial have been done. Also the compaction percentage of each point determined to compare with LWD results.

Comparing modulus obtained from LWD results to other test lead to establish models and equation which the best relation between LWD modulus and resilient modulus acquired. Also LWD result scattering is less than CBR. Moreover LWD device has enough efficiency for structural evaluation of unbound material and quality control of pavement sublayers.

Keywords: LWD, CBR, Cyclic triaxial, Resilient modulus