

ارائه مدل کنترل کیفیت جهت ساخت لایه‌های غیرچسبنده بر پایه نتایج دستگاه PFWD

کامران رفیعی^{۱*} امیر کاووسی^۲ سید شهاب الدین یثربی^۳

دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۷/۱

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۶

چکیده:

معیارهای فعلی کنترل و تضمین کیفیت ساخت لایه‌های غیرچسبنده، به طور عمده بر مبنای آزمایش‌های تعیین چگالی در محل صورت می‌گیرد، در صورتی که مقاومت و مدول سختی معیار طراحی محسوب شود. بدین ترتیب یک شکافی بین مراحل طراحی و روند کنترل کیفیت یک کمبود (فاصله) وجود دارد. براین اساس ارائه شیوه‌ای جهت کنترل کیفیت ساخت که مستقیماً با مدول سختی لایه در محل مرتبط باشد، اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل استفاده از دستگاهی نظیر افت و یا خیزسنج ضربه‌ای قابل حمل که قادر است مدول سختی لایه‌ها را اندازه‌گیری کند، به سرعت در حال گسترش می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی ارتباط مدول سختی حاصل از دستگاه مذکور با درصد تراکم در شرایط آزمایشگاهی است. در این راستا در شرایط آزمایشگاهی و داخل یک جعبه فلزی، چندین لایه از مصالح غیرچسبنده با درصد تراکم‌های مختلف کوبیده شد و سپس مدول سختی هر لایه با استفاده از دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای قابل حمل در رطوبت‌های مختلف تعیین گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که مدول سختی همبستگی مناسبی با درصد تراکم و درصد رطوبت لایه‌ها دارد. ولی با این حال برای ارزیابی رفتار واقعی لایه‌های مصالح غیرچسبنده، مدول سختی شاخص مناسب‌تری نسبت به درصد تراکم می‌باشد.

کلید واژه‌ها: درصد تراکم، مدول سختی، کنترل کیفیت ساخت، مدل، لایه‌های چسبنده

۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس kamran_rafiee@yahoo.com

۲- دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات

مقدمه

تراکم خاک از جمله پارامترهای مهم در ساخت خاکریز و لایه‌های غیرچسبنده Unbound layers محسوب می‌شود و دوام و پایداری آنها تا حد زیادی به دستیابی تراکم مناسب لایه‌ها وابسته است. اما هدف از تراکم خاک صرفاً افزایش چگالی خشک آنها نیست، بلکه هدف اصلی افزایش خصوصیت مهندسی نظیر سختی و مقاومت آنها است. در واقع یکی از مشکلات روش‌های کنترل کیفی فعلی این است که معیار چگالی، نمایه خصوصیات مهندسی خاک در ساخت راه‌ها نیست. از طرف دیگر، مهم‌ترین خصوصیت عملکردی لایه‌های غیرچسبنده، مدول سختی لایه‌های مذکور می‌باشد و روش‌های طراحی روسازی نیز براساس پارامترهای سختی و مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی پایه‌گذاری شده‌اند. به همین دلیل یک شکافی بین روند طراحی و شیوه‌های کنترل کیفیت فعلی به وجود آمده است. در نتیجه، روش‌های کنترل کیفیت ساخت باید بر اساس معیاری استوار باشند که ارتباط نزدیکی با پارامترهای عملکردی طراحی داشته باشند. یک پارامتر عملکردی بنیادی برای ساخت لایه‌های راه، مدول سختی الاستیکی است. به همین دلیل دستگاه‌های غیرمخرب نظیر دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای قابل حمل (PFWD) که می‌توانند مدول سختی الاستیکی در محل را اندازه‌گیری کنند، بصورت بالقوه مناسب برای کنترل کیفیت ساخت راه‌ها می‌باشند (Nazzal, 2003).

روش آزمایش PFWD از نوع آزمون بارگذاری صفحه و بر اساس استاندارد ASTM E2583-07 می‌باشد. بارگذاری بوسیله سقوط یک وزنه بر روی یک سیستم ضربه‌گیر و انتقال پالس نیرویی تولید شده به صفحه بارگذاری انجام می‌پذیرد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دستگاه PFWD متشکل از سه بخش اصلی است: (الف) صفحه بارگذاری، سنسورها و اجزاء الکترونیکی، (ب) وزنه بارگذاری که ممکن است بین ۵ تا ۲۰ کیلوگرم باشد، و (پ) قالب بیرونی دستگاه شامل ضربه‌گیرهای لاستیکی با میرایی مشخص، گیره نگهدارنده وزنه جهت تنظیم ارتفاع سقوط و جعبه سنسورها. بر اساس انواع مصالح روسازی می‌توان از صفحات بارگذاری

مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ یا ۳۰۰ میلی‌متری استفاده نمود (Lin et al., 2006).

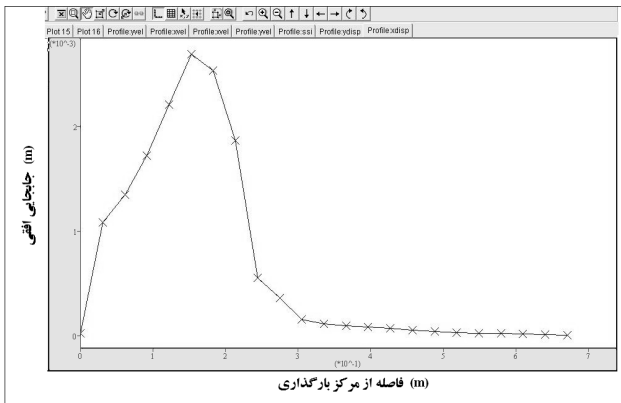
به کمک افت و خیزهای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه امکان تعیین مدول سختی لایه‌های غیرچسبنده با استفاده از روش‌های محاسبه مستقیم و محاسبه معکوس میسر می‌گردد. در محاسبه مستقیم، مدول سختی بر اساس معادلات بوسینسک از طریق رابطه (۱) تعیین می‌شود (Huang, 1993):

$$E = \frac{2(1-\nu^2)\sigma a}{D_0} \quad (1)$$

در این رابطه E مدول سختی، σ حداکثر تنش زیرصفحه بارگذاری، ν ضریب پواسون، a شعاع صفحه بارگذاری و D_0 حداکثر خیز سنسور مرکزی است.

به تازگی تحقیقات مختلفی در زمینه به کارگیری PFWD برای کنترل کیفیت ساخت لایه‌های خاکی غیرچسبنده و ارتباط مدول دستگاه با پارامترهای درصد تراکم در محل صورت گرفته است. بر اساس مطالعه George (۲۰۰۶)، مدول PFWD از طریق رگرسیون غیرخطی همبستگی مناسبی با درصد تراکم و درصد رطوبت داشت. مطالعات Steinert و همکاران (۲۰۰۶) نیز همبستگی مناسب بین نتایج PFWD با پارامترهای درصد تراکم و رطوبت در شرایط میدانی را نشان داد ($R^2=0/82$). ولی نتایج آزمایشگاهی تحقیق Steinert و همکاران (۲۰۰۶) که روی ۵ نوع مصالح غیرچسبنده داخل جعبه چوبی و با درصد تراکم و درصد رطوبت‌های مختلف صورت گرفت، دلالت بر همبستگی نسبتاً ضعیف بین مدول دستگاه PFWD با پارامترهای مذکور داشت ($R^2=0/33$). هم‌چنین نتایج تحقیقی که در سال ۲۰۰۷ توسط اداره حمل و نقل ایالت کانزاس آمریکا در ۸ پروژه میدانی انجام شد، بیانگر آن بود که ایجاد همبستگی بین مدول PFWD و درصد تراکم امکان‌پذیر نیست. زیرا در بیشتر موارد مدول دستگاه PFWD در دو نقطه متوالی حتی تا دو برابر تغییر می‌کرد، در حالی که آن نقاط تراکم یکسانی داشتند (James et al., 2007).

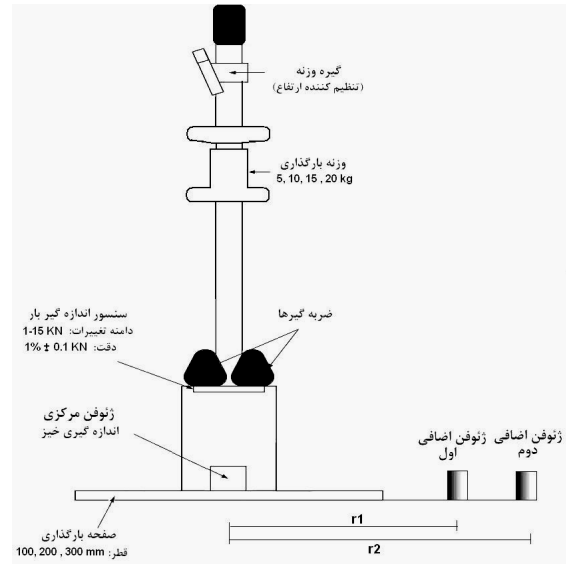
سانتی متر مصالح دانه‌ای شبیه‌سازی گردید. برای حل مدل بارگذاری دینامیکی روی مصالح دانه‌ای پارامترهای زیر در نظر گرفته شد: وزنه بارگذاری ۱۵ کیلوگرم، قطر وزنه ۱۰۰ میلی‌متر، ارتفاع سقوط ۵۰۰ میلی‌متر، قطر میراکننده ۱۰۰ میلی‌متر و قطر صفحه بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر. شکل ۲، پروفیل جابجایی افقی نسبت به مرکز بارگذاری را نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مذکور مشاهده می‌شود، عمده تغییرات ناشی از بارگذاری دینامیکی تقریباً تا فاصله ۵۵ سانتی‌متری از مرکز صفحه بارگذاری PFWD صورت می‌گیرد. لذا با در نظرگیری شعاع ۱۵ سانتی‌متری صفحه بارگذاری، جهت حذف اثر دیواره‌های جانبی باید فاصله دیواره تا لبه صفحه حداقل ۴۰ سانتی‌متر باشد. براین اساس جعبه فلزی به ابعاد ۱۴۰ سانتی‌متر طول، ۱۴۰ سانتی‌متر عرض و ۷۰ سانتی‌متر عمق تهیه گردید و موقعیت آزمایش‌های PFWD هر لایه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۲. پروفیل تغییرات جابه‌جایی ناشی از بارگذاری دینامیکی

۱-۲. مشخصات مصالح

در این مطالعه، مصالح اساس تیپ ۵ مشخصات فنی عمومی راه‌های ایران برای آزمایش انتخاب گردید (دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، ۱۳۸۲). مصالح مورد آزمایش متشکل از ۶۷٪ شن، ۲۵٪ ماسه و ۸٪ ریزدانه غیرخمیری و اندازه بزرگ‌ترین دانه آن یک اینچ بود. منحنی دانه‌بندی و محدوده‌های آیین نامه مصالح منتخب در شکل ۴ آمده است.



شکل ۱. شمای کلی دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای قابل حمل (PFWD)

با توجه به اینکه در تحقیقات مختلف، نتایج متفاوتی در مورد همبستگی مدول دستگاه PFWD با درصد تراکم مصالح غیرچسبنده ارائه شده، این مطالعه به منظور بررسی میزان این ارتباط انجام گردید.

۱. مطالعات آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش روی لایه‌های کوبیده شده در شرایط کنترل شده، نیاز به یک جعبه فلزی بود که مصالح داخل آن کوبیده شود. در این مطالعه، عمق جعبه با توجه به لحاظ نمودن شرایط اجرای چهار لایه ۱۵ سانتی‌متری در داخل آن برابر ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. اما برای تعیین طول و عرض جعبه مسأله مهم تأثیر دیواره‌های جانبی جعبه روی نتایج دستگاه PFWD بود. براساس مطالعات تجربی صورت گرفته توسط مرکز تحقیقات حمل و نقل لویزیانا، جهت حذف تأثیر شرایط مرزی می‌بایست حداقل فاصله ۱۵ سانتی‌متر بین لبه صفحه بارگذاری PFWD و دیواره‌های جانبی وجود داشته باشد (Seyman, 2003). اما مبنای تئوری برای این فاصله ارائه نشده بود. به همین منظور با استفاده از نرم‌افزار FLAC، بارگذاری دینامیکی دستگاه PFWD داخل جعبه مورد آزمایش با منظور کردن لایه ۶۵

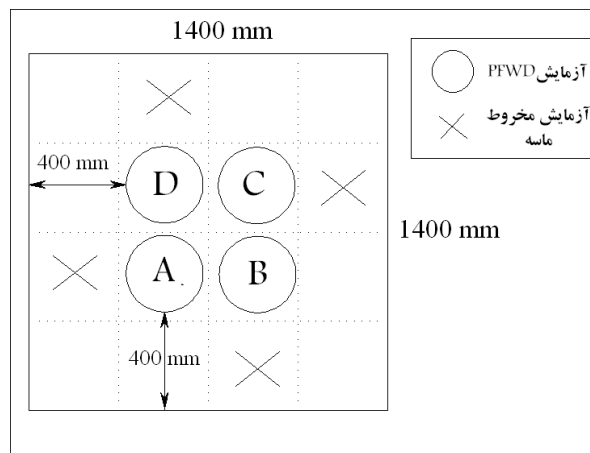
چهار لایه دیگر با ضخامت متوسط ۱۳ سانتی متر اجرا گردید. متوسط زمان تراکم برای هر نقطه در این مرحله ۱۰۰ ثانیه بود. در نهایت لایه چهارم دو بار جایگزین گردید و لایه مذکور در رطوبت بهینه یکبار به مدت ۵۵ ثانیه و بار دوم به مدت ۴۰ ثانیه متراکم شد.

آزمایشات PFWD در چهار نقطه که موقعیت آنها در شکل ۳ نشان داده شده است، روی تمام لایه‌ها بلافاصله بعد از کوبیدن و هم‌چنین در چند روز مختلف که رطوبت لایه کاهش پیدا می‌کرد، صورت گرفت. در هر مرحله برای تعیین چگالی لایه و درصد رطوبت از روش مخروط ماسه استفاده گردید که موقعیت این نقاط نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. در لایه چهارم علاوه بر آن، چگالی و درصد رطوبت در موقعیت‌های آزمایش PFWD نیز تعیین گردید. آزمایش PFWD در هر نقطه با وزنه ۱۵ کیلوگرمی، صفحه بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متری و با ۶ بار تکرار صورت گرفت و متوسط سه تکرار آخر بعنوان مدول سختی دستگاه گزارش شد. خلاصه نتایج اندازه‌گیری آزمون‌های لایه‌های مختلف شامل میزان چگالی خشک و مدول سختی در زمان‌های مختلف به اختصار در جدول ۱ ارائه شده است.

۲. تحلیل نتایج

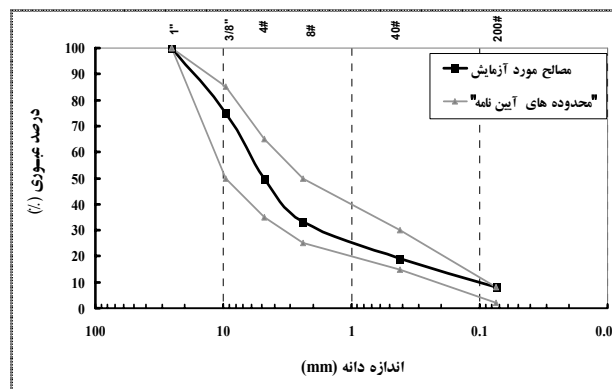
۲-۱. ارائه مدل همبستگی بین مدول سختی PFWD و درصد تراکم

در ابتدا به منظور این‌که در ارزیابی ارتباط مدول سختی PFWD و درصد تراکم لایه، تأثیر سختی لایه‌های زیرین قابل اغماض باشد، این ارزیابی در یک لایه معین (لایه چهارم) صورت گرفت و تراکم‌های مختلف لایه مذکور با دو بار جایگزین کردن لایه ایجاد گردید. جدول ۲، ماتریس همبستگی پیرسون مدول PFWD (E_{PFWD}) با پارامترهای درصد تراکم (Comp) و درصد رطوبت در زمان اندازه‌گیری مدول سختی (w) را برای برای ۳۷ نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۳: موقعیت نقاط آزمایش داخل جعبه فلزی

هم‌چنین آزمایش پروکتور مطابق استاندارد AASHTO T-180 نوع D برای تعیین حداکثر چگالی خشک و درصد رطوبت بهینه مصالح منتخب صورت گرفت. بر اساس منحنی تراکم به دست آمده، درصد رطوبت بهینه ۷/۵٪ و حداکثر چگالی خشک آزمایشگاهی ۲۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید.



شکل ۴: دانه‌بندی مصالح اساس مورد آزمایش

۲-۲. نحوه آماده‌سازی و آزمایش کردن نمونه‌ها

در این مطالعه برای تراکم لایه‌ها از یک نوع متراکم کننده دستی (پیکور اصلاح شده با صفحه ۳۵۰×۳۵۰ میلی‌متر مربع) استفاده گردید. داخل جعبه فلزی بار اول چهار لایه مصالح منتخب با ضخامت متوسط ۱۵ سانتی‌متر در رطوبت بهینه کوبیده شد. متوسط زمان تراکم برای هر نقطه ۹۰ ثانیه بود سپس مصالح داخل جعبه تخلیه گردید و برای بار دوم

جدول ۱: خلاصه نتایج اندازه گیری آزمایش های لایه های مختلف

آزمایش تکرار اول جعبه				آزمایش تکرار دوم جعبه				لایه
زمان (روز)	مدول سختی (Mpa)	چگالی خشک (Mg/m ³)	موقعیت	زمان (روز)	مدول سختی (Mpa)	چگالی خشک (Mg/m ³)	موقعیت	
۱	۱۲	۲.۱۱	متوسط A,B,C,D	۱	۱۳	۲.۱۵	متوسط A,B,C,D	اول
۵	۷۳			۲	۱۵			
-	-			۴	۲۶			
-	-			۶	۲۸			
۱	۵۰	۱.۹۵	متوسط A,B,C,D	۱	۳۴	۲.۱۱	متوسط A,B,C,D	دوم
۳	۹۱			۳	۵۲			
-	-			۴	۸۲			
-	-			۵	۱۰۲			
۱	۷۳	۲.۰۰	متوسط A,B,C,D	۱	۶۵	۲.۱۱	متوسط A,B,C,D	سوم
۲	۸۹			۲	۹۱			
۳	۹۸			۳	۱۱۴			
۴	۱۲۹			-	-			
۱	۷۴	۲.۱۶	A	۱	۷۸	۲.۱۷	A	چهارم
۲	۸۱			۳	۱۰۲			
۳	۸۵			۵	۱۰۸			
۶	۱۱۸			۶	۱۲۲			
۱	۱۰۰	۲.۱۷	B	۱	۷۸	۲.۱۶	B	
۲	۱۰۱			۳	۷۳			
۳	۱۰۴			۵	۸۹			
۶	۱۲۵			۶	۱۰۸			
۱	۱۰۰	۲.۱۷	C	۱	۷۹	۲.۱۵	C	
۲	۱۰۲			۳	۹۳			
۳	۱۲۱			۵	۱۰۰			
۶	۱۵۲			۶	۱۰۶			
۱	۱۱۸	۲.۱۶	D	۱	۷۳	۲.۱۳	D	
۲	۱۲۵			۳	۹۰			
۳	۱۵۲			۵	۱۱۶			
۶	۱۲۳			۶	۱۲۹			
۱				۱	۶۷	۲.۰۵	A	لایه چهارم- جایگزین اول
				۲	۸۱			
				۳	۹۹			
				۵	۱۰۶			
				۱	۶۹	۱.۹۷	B	
				۲	۷۲			
				۳	۸۸			
				۵	۱۰۵			
				۱	۷۲	۲.۰۷	C	
				۲	۷۶			
				۳	۸۴			
				۵	۹۹			
				۴	۱۰۷			

ادامه جدول ۱: خلاصه نتایج اندازه‌گیری آزمایش‌های لایه‌های مختلف

آزمایش تکرار اول جعبه		آزمایش تکرار دوم جعبه		
۱	۶۴	۲.۰۲	A	لایه چهارم - جایگزین دوم
۲	۷۲			
۳	۹۳			
۴	۹۶			
۱	۶۸	۲.۰۳	C	
۲	۸۱			
۳	۹۴			
۱	۷۱	۲.۰۱	D	
۲	۸۲			

۲/۷۳ بیشتر است که دلالت بر معنی‌داری ضرایب درصد تراکم و درصد رطوبت در مدل مذکور دارد.

تحلیل حساسیت رابطه ۲ نشان می‌دهد که اگر تراکم ۱۰ درصد تغییر کند، مدول سختی به میزان ۲۸ درصد تغییر پیدا می‌کند. در صورتی که تغییر ۱۰ درصد، رطوبت باعث تغییر ۱۱ درصدی مدول سختی می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد درصد تراکم نسبت به درصد رطوبت تأثیر بیشتری روی مدول سختی دارد.

Steinert و همکاران (۲۰۰۶)، براساس مطالعات آزمایشگاهی داخل جعبه چوبی روی ۵ مصالح غیرچسبنده رابطه ۳ را براساس ۱۴۵ داده پیشنهاد نمودند:

$$R^2 = 0.33 \quad (3)$$

$E_{PFWD} = -77.989 + 1.878 \text{ Comp} - 7.296(\text{RWC})$
که در این رابطه RWC تفاوت درصد رطوبت موجود نسبت به درصد رطوبت بهینه است. رابطه ۳ با جایگزینی پارامتر RWC با پارامتر درصد رطوبت و برازش آن برای ۱۴۵ داده بصورت رابطه ۴ قابل تبدیل است:

$$R^2 = 0.53 \quad N = 145 \quad (4)$$

$E_{PFWD} = 39.1 + 1.6 \text{ Comp} - 10.6 w$
مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده مدول سختی PFWD براساس مدل این تحقیق (E Study) با مقادیر متناظر آن براساس رابطه ۴ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر محاسباتی دو تحقیق، همبستگی بالایی دارند ($R^2 = 0.997$).

جدول ۲- ماتریس همبستگی پیرسون بین مدول PFWD.

چگالی خشک و درصد رطوبت

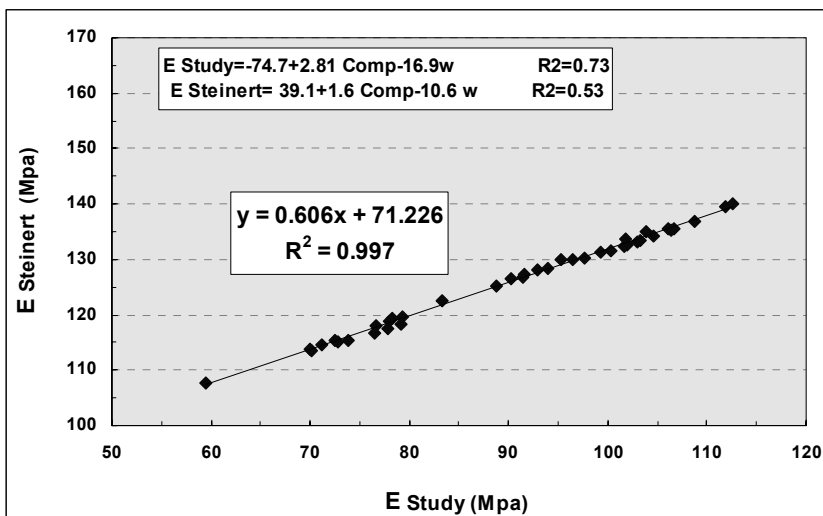
	E_{PFWD}	Comp	w
E_{PFWD}	۱	*۰/۴۰	**۰/۶۸-
Comp	*۰/۴۰	۱	۰/۱۸
w	**۰/۶۸-	۰/۱۸	۱

** همبستگی معنی‌دار در سطح مخاطره ۰/۰۱
* همبستگی معنی‌دار در سطح مخاطره ۰/۰۵

مطابق این ماتریس مدول سختی PFWD با درصد تراکم همبستگی معنی‌دار مثبت ($r_{y1} = +0.40$) و با درصد رطوبت در زمان اندازه‌گیری همبستگی معنی‌دار منفی ($r_{y2} = -0.68$) دارد. در صورتی که درصد تراکم و درصد رطوبت در زمان آزمایش با یکدیگر همبستگی ندارند ($r_{x1x2} = 0.18$). براین اساس رگرسیون خطی مدول PFWD با پارامترهای مذکور به صورت رابطه (۲) بدست آمد:

$$R^2 = 0.73 \quad F = 47.64 \quad N = 37 \quad (2)$$

$E_{PFWD} = -74.7 + 2.81 \text{ Comp} - 16.9 w$
که E_{PFWD} برحسب مگاپاسکال می‌باشد. ضریب تعیین قابل ملاحظه (۰/۷۳) و اختلاف قابل توجه $F = 47.64$ محاسباتی با مقدار جدولی $F(95, 1, 34) = 4.13$ ، نشان دهنده رابطه قوی بین مدول PFWD با درصد تراکم و درصد رطوبت است. هم‌چنین مقادیر t-student محاسباتی برای ضرایب درصد تراکم و درصد رطوبت به ترتیب برابر ۶/۰۲ و ۸/۶۲ می‌باشد که از مقدار جدولی آن در سطح اطمینان ۹۵٪ یعنی



شکل ۵. مقایسه مدول محاسباتی تحقیق فعلی با مدول محاسبه شده تحقیق Steinert و همکاران (۲۰۰۶)

درصد رطوبت را در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، می‌توان روند خطی برای تغییرات مدول سختی نسبت درصد رطوبت در لایه‌های مختلف، با توجه به ضرایب همبستگی بالای آن در نظر گرفت. شیب این خط برای لایه اول ملایم و برای لایه‌های بالاتر تندتر است. اما تعیین ضرایب این معادله خطی حتی برای نقاط واقع شده در یک لایه معین نیز ثابت نیست و براساس خصوصیات خاک، شرایط تبخیر و عوامل دیگر تغییر می‌کند. لذا ارائه یک معادله خطی معین برای پیش‌بینی تغییرات مدول سختی براساس درصد رطوبت، امکان‌پذیر نیست و جهت تعیین ضرایب معادله مذکور حداقل دو بار اندازه‌گیری مدول در رطوبت‌های مختلف، ضروری به نظر می‌رسد.

پس از تعیین معادلات تغییرات مدول سختی نقاط مختلف نسبت به تغییر رطوبت، میزان مدول‌های PFWD برای رطوبت بهینه (۷/۵ درصد) تخمین زده شدند. رگرسیون خطی مدول PFWD در رطوبت بهینه و درصد تراکم در رابطه ۵ آمده است:

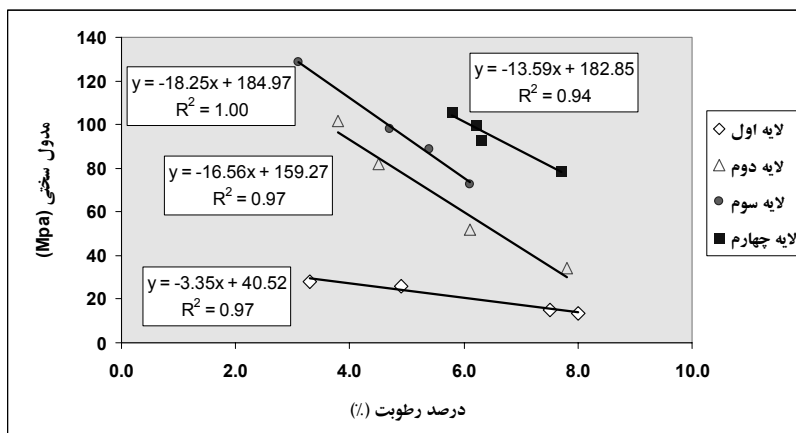
$$R^2=0.86 \quad F=47/23 \quad S_y=1/3 \quad N=10 \quad (5)$$

$$\text{Comp} = 73.9 + 0.33 E_{\text{opt}}$$

علت این همبستگی بالا آن است که در هر دو رابطه ضریب درصد رطوبت حدود شش برابر ضریب درصد تراکم می‌باشد. این همبستگی بالا، دقت رابطه ۲ را که صرفاً برای یک نوع از مصالح ارائه شده بود را تأیید می‌کند. با این حال نتایج مطالعه Steinert و همکاران (۲۰۰۶) مقادیر مدول سختی بزرگتری نسبت به این تحقیق داده است. علت این مسئله آن است که آزمایش‌های Steinert بر مبنای وزنه بارگذاری ۲۰ کیلوگرمی دستگاه PFWD صورت گرفته، در صورتی که در این تحقیق از وزنه ۱۵ کیلوگرمی استفاده شده است.

۳-۱. تأثیر درصد رطوبت

رطوبت در حین تراکم نقش ماده روان کننده روی ذرات خاک را دارد و باعث افزایش تراکم خاک می‌شود (تا درصد رطوبت بهینه). اما پس از عملیات تراکم، با تبخیر رطوبت خاک، چگالی خشک و به عبارتی درصد تراکم تغییر نمی‌کند. در صورتی که براساس رابطه ۲، با کاهش درصد رطوبت مقدار مدول سختی PFWD افزایش می‌یابد. لذا برای برقراری یک رابطه مستقیم بین درصد تراکم و مدول سختی می‌بایست میزان مدول PFWD را در یک رطوبت معین (رطوبت بهینه) تعیین نمود. شکل ۶، نحوه تغییرات مدول PFWD با تغییر



شکل ۶. روند تغییرات مدول سختی PFWD با تغییر درصد رطوبت

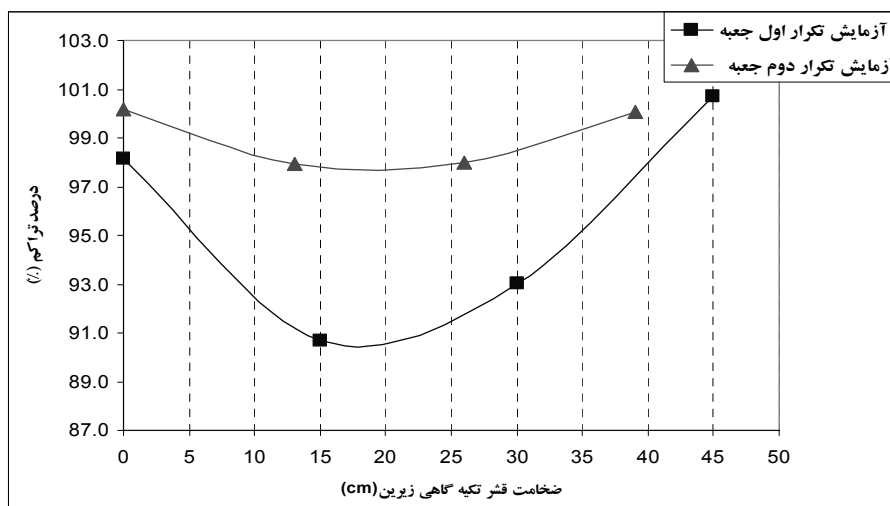
ارتباط مستقیمی با ضخامت قشر تکیه‌گاهی ندارد و زمانی که قشر تکیه‌گاهی حدود ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد، درصد تراکم لایه علی‌رغم ثابت بودن شرایط انرژی تراکم و درصد رطوبت در هر آزمایش به حداقل مقدار خود می‌رسد. با این حال با افزایش زمان تراکم و کاهش ضخامت اجرایی آزمایش دوم نسبت به آزمایش اول، درصد تراکم بهبود می‌یابد.

ارتباط بین مدول سختی هر لایه و ضخامت قشر تکیه‌گاهی در دو تکرار آزمایش در شکل ۸ آمده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت قشر تکیه‌گاهی در آزمایش، میزان مدول سختی به تدریج افزایش می‌یابد. در ضمن میزان مدول سختی با افزایش زمان تراکم و کاهش ضخامت‌های اجرایی بهبود می‌یابد.

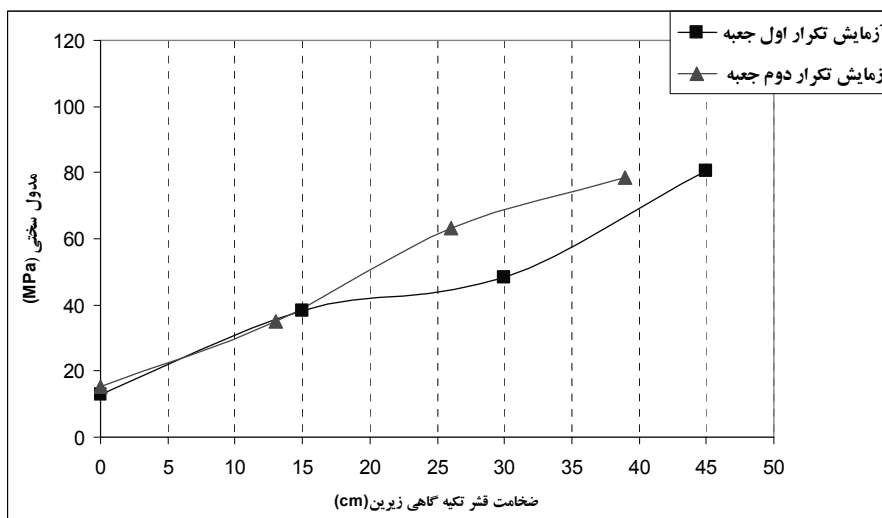
که E_{opt} مدول PFWD در رطوبت بهینه برحسب مگاپاسکال و $Comp$ درصد تراکم می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین بالا (۰/۸۶) و خطای قابل قبول مدل ($S_y=1/3$)، نشان می‌دهد که با تعیین مدول سختی PFWD در رطوبت بهینه می‌توان با دقت مناسبی درصد تراکم را تخمین زد.

۲-۳. تأثیر ضخامت قشر تکیه‌گاهی

ارتباط بین درصد تراکم هر لایه و ضخامت قشر تکیه‌گاهی زیرین برای یک انرژی تراکم معین در دو تکرار آزمایش داخل جعبه فلزی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد تراکم در دو آزمایش



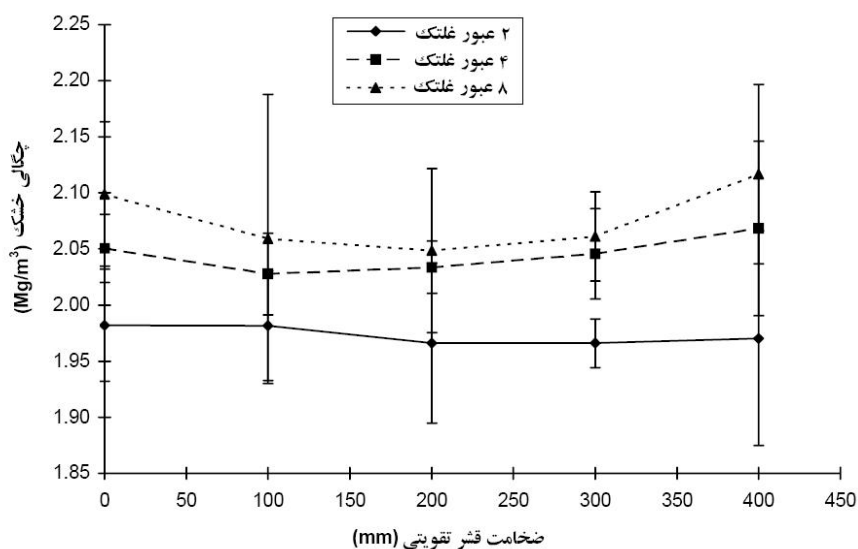
شکل ۷. تأثیر ضخامت قشر تکیه‌گاهی روی درصد تراکم لایه داخل جعبه فلزی



شکل ۸. تأثیر ضخامت قشر تکیه گاهی روی مدول سختی لایه داخل جعبه فلزی

غیرچسبنده روسازی می‌باشد. این نتیجه‌گیری در مطالعات میدانی Rogers و همکاران (۲۰۰۰) نیز مورد تأیید قرار گرفته است. در این مطالعات میدانی، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، زمانی که ضخامت قشر تقویتی (بین لایه زیراساس و بستر) حدود ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد، چگالی خشک (یا درصد تراکم) لایه زیر اساس علی‌رغم ثابت بودن انرژی‌های تراکم (تعداد عبور غلتک) به حداقل مقدار خود رسید، که این روند از لحاظ طراحی قابل توجیه نیست.

از طرفی از لحاظ تئوری طراحی روسازی انتظار می‌رود وقتی تعداد لایه‌های روسازی و ضخامت قشر تکیه‌گاهی افزایش می‌یابد، به تدریج سختی سیستم روسازی افزایش یافته و مقدار تنش وارده به سطح اولیه (سطح بستر) کاهش یابد. ولی با توجه به موارد بالا، پارامتر درصد تراکم از این الگو تبعیت نمی‌کند، در صورتی که مدول سختی دستگاه PFWD با این روند انطباق دارد. بنابراین نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که مدول سختی PFWD معیار مناسب‌تری نسبت به پارامتر درصد تراکم جهت ارزیابی رفتار واقعی سیستم



شکل ۹. تأثیر ضخامت قشر تقویتی روی درصد تراکم لایه زیراساس در شرایط میدانی (Rogers et al., 2000)

۳. نتیجه گیری
- براساس انجام آزمایش PFWD در شرایط آزمایشگاهی و روی مصالح غیرچسبنده متراکم شده داخل یک جعبه فلزی نتایج زیر به دست آمده است:
 - در شرایط آزمایشگاهی، به منظور حذف اثر دیواره‌های جانبی جعبه فلزی روی نتایج دستگاه PFWD، فاصله دیواره جعبه تا لبه صفحه بارگذاری دستگاه حداقل ۴۰ سانتی‌متر مناسب است.
 - مدول دستگاه PFWD، همبستگی بالایی با درصد تراکم و درصد رطوبت در زمان آزمایش دارد ($R^2=0.73$). در این همبستگی درصد تراکم نقش مؤثرتری نسبت به درصد رطوبت دارا می‌باشد.
 - با کاهش درصد رطوبت، مقدار مدول سختی PFWD افزایش می‌یابد و معمولاً منحنی تغییرات مدول سختی با درصد رطوبت به صورت خطی است.
 - میزان مدول سختی یک لایه تابع ضخامت لایه‌های زیرین بوده و با افزایش ضخامت لایه‌های زیرین، در یک انرژی تراکم معین، مدول سختی افزایش می‌یابد.
 - میزان درصد تراکم یک لایه نیز تابع ضخامت لایه‌های زیرین می‌باشد، اما روند تغییرات آن با مدول سختی متفاوت است. به طوری که زمانی که قشر زیرین لایه، ضخامتی حدود ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متر دارد، درصد تراکم لایه به حداقل میزان خود می‌رسد.
- براساس نتایج به دست آمده از تحقیق، شاخص مدول سختی معیار مناسب‌تری نسبت به پارامتر درصد تراکم جهت ارزیابی رفتار واقعی لایه‌های غیرچسبنده می‌باشد.

منابع

- James S., Stefan A., Mbaki O., Mustaque H. (2007) Evaluation of Prima Light Falling-Weight Deflectometer as quality control tool for compaction of fine grained soils, Transportation Research Board Meeting, National Research
- 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.
- Huang, Yang H., (1993) Pavement Analysis and Design. , Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Lin, D., Liao, C., Lin, J. (2006) Factors affecting portable falling weight deflectometer measurements. ASCE, Journal of Geotechnical & Geo-Environmental Engineering, Vol.132, No.6.
- Nazzal, M. (2003) Field evaluation of In-situ test technology for QC/QA during construction of pavement layers and embankments, Ph.D. Thesis, Louisiana State University, Louisiana, USA.
- Rogers, C., Fleming P. R, Frost, M. (2000) Stiffness behaviour of trial road foundations, fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, Nottingham, U. K.
- Seyman, E., (2003) Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/ quality assurance tools, M.Sc. Thesis, Louisiana State University, USA.
- 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 DC, USA.