

## بررسی اثر پارامترهای دستگاه PFWD در مدول سختی مصالح غیرچسبنده

امیر کاووسی<sup>۱\*</sup> و کامران رفیعی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری راه و ترابری - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۷/۷/۲۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۲/۱۹، تاریخ تصویب ۸۹/۶/۳۰)

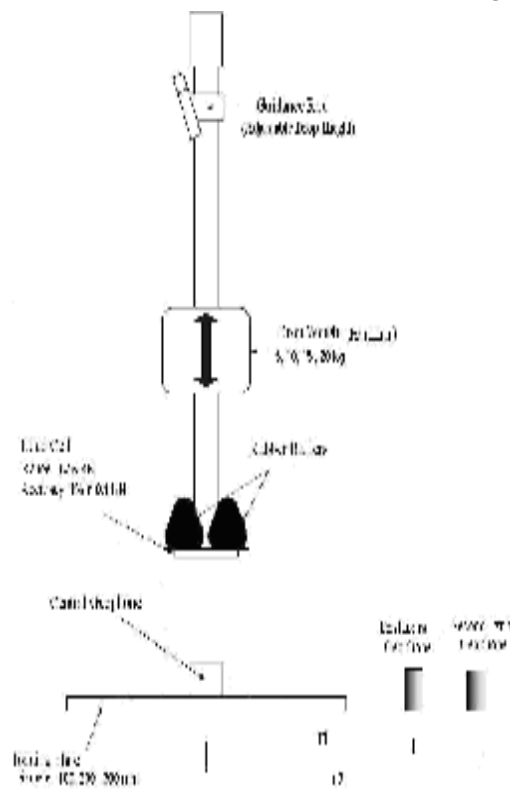
### چکیده

کاربرد دستگاه افت و خیز سنج ضربه ای قابل حمل (PFWD) در کنترل کیفیت ساخت لایه های غیرچسبنده روسازی در سطح جهان در حال گسترش است. با این وجود هنوز در زمینه نحوه به کارگیری PFWD و دقت نتایج آزمایش ابهاماتی وجود دارد که تحقیقات بیشتر را ضروری می‌سازد. در این تحقیق اثر عوامل دستگاهی نظیر میزان وزنه بارگذاری، ارتفاع سقوط، قطر صفحه بارگذاری، نحوه تماس صفحه با سطح، فواصل ژئوفن‌ها بر مدول سختی مصالح غیرچسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی این عوامل، ابتدا PFWD در چندین پروژه راهسازی در استان تهران و سپس روی یک نوع مصالح دانه ای متراکم شده داخل یک جعبه فلزی و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی مورد آزمایش گرفت. براساس نتایج به دست آمده میزان وزنه، قطر صفحه بارگذاری و نحوه تماس صفحه با سطح، تأثیر قابل ملاحظه ای بر مدول سختی دارد، در صورتی که اثر ارتفاع سقوط قابل اغماض می باشد.

**واژه های کلیدی:** کنترل کیفیت ساخت، لایه های غیرچسبنده، مدول سختی، PFWD

### مقدمه

با میرایی مشخص، گیره نگهدارنده وزنه جهت تنظیم ارتفاع سقوط و جعبه سنسورها.



شکل ۱: شمای کلی دستگاه افت و خیز سنج ضربه ای قابل حمل (PFWD).

معیارهای فعلی کنترل و تضمین کیفیت ساخت لایه‌های غیرچسبنده روسازی، عمدتاً بر مبنای آزمایشات تعیین درصد تراکم در محل صورت می گیرد، در صورتی که سختی و مدول برجهنگی پارامترهای اصلی طراحی روسازی راه ها محسوب می شود. لذا یک شکافی بین روند طراحی و روند کنترل کیفیت احساس می شود. براین اساس ارائه شیوه ای جهت کنترل کیفیت ساخت که مستقیماً با مدول لایه در محل مرتبط باشد، اهمیت زیادی دارد و به همین دلیل دستگاه‌هایی نظیر افت و خیز سنج ضربه ای قابل حمل (PFWD)<sup>۱</sup> که مدول سختی لایه‌های روسازی را اندازه گیری می کنند، در سطح جهان در حال گسترش است [۱].

شکل (۱)، طرح کلی از دستگاه PFWD را نشان می‌دهد. این دستگاه یک بار ضربه ای را به سطح روسازی وارد می‌کند و همزمان با آن میزان بار وارده و مقدار خیز سطحی در طول مدت بارگذاری اندازه‌گیری می شود. همان‌طور که در این شکل 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 ضربه گیر های لاستیکی

ارتفاعات مختلف، مدول مشابهی را نتیجه می‌دهند. براساس این مطالعات، مهم‌ترین پارامتر در میزان مدول محاسبه شده، اندازه صفحه بارگذاری است و مدول  $E_0$  به دست آمده از صفحه ۱۰۰ میلی‌متری حدود ۱/۵ برابر بیشتر از مدول صفحه ۳۰۰ میلی‌متری است. همچنین نتایج این تحقیق دلالت بر ارجح بودن صفحه ۳۰۰ میلی‌متری نسبت به صفحه ۱۰۰ میلی‌متری داشت.

در تحقیقی دیگر نشان داده شد که چگونگی سطح تماس درمیزان مدول دستگاه مؤثر است و اندازه‌گیری‌های دستگاه PFWD در محل‌هایی که دانه‌های سنگی در سطح لایه جدا از هم دارند (مصالح غیرچسبنده) و بخصوص در شرایط کمبود ریزدانه، تکرار پذیری ضعیف تری دارد [۶].

Fleming [۷] تأثیر دما روی ضربه گیر را با انجام آزمایش در سه دمای مختلف روی کف بتنی آزمایشگاه و با ارتفاع سقوط ثابت بررسی نمود. نتایج این بررسی نشان داد که میزان مدول سختی به طور مؤثری با تغییر دما ثابت می‌ماند و فقط میزان طول پالس بار با بیشتر شدن دما افزایش می‌یابد. با این وجود هنوز در زمینه نحوه به کارگیری PFWD و عواملی که ممکن است بر کیفیت داده‌ها مؤثر باشند، ابهاماتی وجود دارد که تحقیقات بیشتر را ضروری می‌سازد. لذا این مطالعه به منظور ارزیابی عوامل دستگاهی نظیر میزان وزنه بارگذاری، ارتفاع سقوط، قطر صفحه بارگذاری، نحوه تماس صفحه با سطح و فواصل ژئوفن‌ها بر مدول سختی مصالح غیرچسبنده صورت گرفت.

### روش تحقیق

در این تحقیق، جهت بررسی تأثیر عوامل دستگاهی در مدول حاصله، ابتدا PFWD (مدل TML ساخت ژاپن) روی لایه‌های بستر، اساس و زیراساس در چند پروژه راهسازی در استان تهران مورد آزمایش قرار گرفت.

سپس داخل یک جعبه فلزی با ابعاد  $140 \times 140$  سانتیمتر مربع، چهار لایه اساس منتخب (اساس تیپ ۵ نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی [۸]) با تراکم‌های مختلف توسط یک متراکم کننده دستی کوبیده شد و آزمایش PFWD روی هر لایه در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی صورت گرفت. مشخصات پروژه‌های مذکور و عوامل مورد بررسی در آنها به صورت خلاصه در جدول (۱) آمده است.

براساس انواع مصالح روسازی می‌توان از صفحات بارگذاری مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ یا ۳۰۰ میلی‌متری استفاده نمود. همچنین علاوه بر ژئوفن واقع شده در مرکز صفحه بارگذاری، می‌توان دو ژئوفن اضافی با فواصل شعاعی مختلف از مرکز صفحه را برای اندازه‌گیری خیز سطحی به کار گرفت [۲].

براساس تئوری بوسینسک و با فرض بارگذاری ثابت و صفحه بارگذاری انعطاف پذیر می‌توان مدول سختی  $\lambda^2$  را مطابق رابطه (۱) برای ژئوفن مرکزی به دست آورد [۳]:

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

در این روابط، P حداکثر بار وارده روی صفحه بارگذاری،  $D_0$  حداکثر خیز ژئوفن مرکزی،  $\nu$  ضریب پواسون و a شعاع صفحه بارگذاری است.

استفاده از مقادیر حداکثر بار و خیز در رابطه (۱) مسأله قابل بحثی است و ممکن است از بار حداکثر و خیز متناظر آن استفاده شود که نتایج آن نسبت به حالت اول، مدول بیشتر و تغییرات کمتری را نتیجه می‌دهد. با اینحال هیچ‌کدام از این روش‌ها بیانگر مدول واقعی مصالح نیست. یک روش دقیق‌تر برای محاسبه مدول، استفاده از تاریخچه زمانی خیز و بار در عوض حداکثر بار و خیز می‌باشد. در این راستا می‌توان در یک دوره زمانی معین بارگذاری، مدول سختی را با توجه به بار و خیز متناظر آن در زمان‌های مختلف محاسبه و مورد بررسی قرار داد [۴].

میزان مدول سختی دستگاه PFWD تابع عوامل مختلفی است. براساس مطالعات Steinert [۵] درخصوص 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 صفحه بارگذاری است، در صورتی که برای وزنه ۱۰ کیلوگرمی، با افزایش قطر صفحه مدول کاهش پیدا می‌کند. علت این مسأله بدین صورت گزارش شد که وقتی قطر صفحه و مقدار وزنه کوچک باشد، فقط قسمت بالایی روسازی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و بنابراین میزان خیز، متأثر از قسمت سخت‌تر روسازی است و درنتیجه مدول بزرگتری را نتیجه می‌دهد.

Lin و همکارانش [۲] نشان دادند که اثر ارتفاع سقوط وزنه، روی مدول PFWD چشمگیر نیست، به گونه‌ای که

## یافته ها و بحث

## تأثیر وزنه بارگذاری بر مدول سختی

به منظور ارزیابی تأثیر وزنه بارگذاری در پروژه‌های مختلف، وزنه های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرمی در یک ارتفاع سقوط معین و با یک صفحه ثابت بارگذاری به کار گرفته شد و میزان مدول سختی برای هر حالت محاسبه گردید. شکل (۲)، نحوه تغییرات مدول سختی با تغییر وزنه بارگذاری را نشان می دهد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در کلیه پروژه ها با افزایش مقدار وزنه (در سه محدوده مورد بررسی)، مدول سختی افزایش می‌یابد. علت آن است که وقتی از وزنه های سنگین تر استفاده می‌شود، وزن دستگاه و میزان تنش های استاتیکی جانبی قبل از بارگذاری افزایش می یابد و افزوده شدن تنش‌های جانبی نیز باعث افزایش مدول سختی می‌شود.

به منظور پیش بینی تغییرات مدول سختی با افزایش

وزنه بارگذاری، می توان از مدل Kondner [۹] مطابق رابطه زیر استفاده نمود:

$$E = E_0 \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^a \quad (2)$$

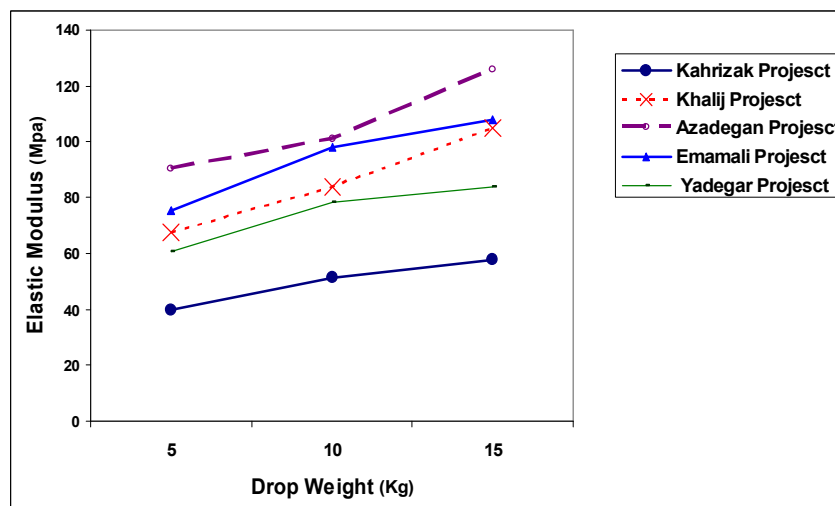
براین اساس با فرض آن که تنش جانبی زیر صفحه بارگذاری PFWD با وزن دستگاه رابطه مستقیمی دارد، مدل مذکور به صورت رابطه (۳) قابل تبدیل خواهد بود:

$$\frac{E_2}{E_1} = k \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^a \quad (3)$$

در این رابطه  $E_1$  و  $W_1$  به ترتیب مدول سختی و وزن دستگاه با یک وزنه معین و  $E_2$  و  $W_2$  به ترتیب مدول سختی و وزن ثانویه دستگاه به واسطه تغییر در وزنه بارگذاری و  $k$  و  $a$  ضرایب ثابت می باشند. در این مطالعه، وزن اولیه دستگاه با وزنه ۵ کیلوگرمی برابر ۲۶ کیلوگرم بود و هنگام به کارگیری وزنه های ۱۰ و ۱۵ کیلوگرمی، وزن دستگاه به ترتیب به ۳۱ و ۳۶ کیلوگرم افزایش می‌یافت.

جدول ۱: مشخصات پروژه های مورد آزمایش با دستگاه PFWD.

محل پروژه	نوع لایه	رده خاک	تعداد نقاط آزمایش	عوامل مورد بررسی
کهریزک	بستر	A-6	۳	وزنه بارگذاری
بزرگراه آزادگان	اساس	A-1-a	۲	وزنه بارگذاری
بزرگراه امام علی	زیراساس	A-1-a	۲	وزنه بارگذاری
خیابان خلیج	اساس	A-1-a	۲	وزنه بارگذاری
بزرگراه یادگار امام	زیراساس	A-1-a	۱۱	ارتفاع سقوط، فواصل ژئوفن های اضافی
	اساس	A-1-a	۷	
جعبه فلزی داخل آزمایشگاه	اساس	A-1-a	۱۶ نقطه در شرایط مختلف	وزنه بارگذاری، ارتفاع سقوط، قطر صفحه بارگذاری، سطح تماس صفحه



شکل ۲: تغییرات مدول سختی با افزایش وزنه بارگذاری.

بارگذاری PFWD در آزمایش‌های میدانی در دو ارتفاع و در شرایط آزمایشگاهی در سه ارتفاع سقوط صورت گرفت. در کل آزمایش‌ها وزنه ثابت ۱۵ کیلوگرمی و با صفحه ۳۰۰ میلی‌متری به کار گرفته شد. نتایج این بررسی‌ها مطابق جدول (۳) نشان داد که تغییر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر مدول سختی ندارد (حداکثر ضریب تغییرات برابر ۰/۶ است). علت این مسأله آن است که برای مصالح سنگدانه‌ای (مصالح تحقیق) که مقاومت آنها به اصطکاک بین دانه‌ای بستگی دارد، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار روی مدول سختی، تنش جانبی است [۱۱ و ۱۰]. در صورتی که در آزمایش PFWD، 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.

براساس داده‌های جمع‌آوری شده در پروژه‌های مختلف، تحلیل رگرسیون غیرخطی به شکل رابطه (۳) برای ۲۶ داده صورت گرفت (جدول ۲) و برای پارامترهای  $a$  و  $k$  به ترتیب مقادیر ۱ و ۰/۹۶۶ به دست آمد. براین اساس تغییر مدول سختی دستگاه PFWD ناشی از تغییر وزنه بارگذاری به صورت رابطه (۴) ارائه گردید:

$$E_2 = E_1 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{0.966} \quad R^2 = 0.96 \quad N = 26 \quad (4)$$

ضریب تعیین  $R^2$  بالای این مدل (۰/۹۶) بیانگر آن است که مدل مذکور از دقت پیش‌بینی مناسبی برخوردار است. همچنین این مدل نشان می‌دهد که افزایش مدول PFWD در محدوده وزنه‌های مورد بررسی تقریباً رابطه مستقیمی با افزایش وزن دستگاه دارد.

### تأثیر ارتفاع سقوط بر مدول سختی

به منظور بررسی اثر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف،

جدول ۲: نتایج مدول‌های سختی اولیه (با وزنه ۵ کیلوگرمی) و مدول ناشی از تغییر وزنه بارگذاری.

شماره نقطه	موقعیت	مدول اولیه با وزنه ۵ کیلوگرمی (MPa)	وزنه مورد بررسی (kg)	مدول تغییر یافته با وزنه مورد بررسی (MPa)
۱	کهریزک-نقطه ۱	۴۰	۱۰	۵۱
		۴۰	۱۵	۵۸
۲	کهریزک-نقطه ۲	۲۶	۱۰	۳۰
		۲۶	۱۵	۳۴
۳	کهریزک-نقطه ۳	۱۸	۱۰	۲۴
		۱۸	۱۵	۲۸
۴	خیابان خلیج-نقطه ۱	۶۸	۱۰	۸۴
		۶۸	۱۵	۱۰۵
۵	بزرگراه آزادگان-نقطه ۱	۹۰	۱۰	۱۰۱
		۹۰	۱۵	۱۲۶
۶	بزرگراه آزادگان-نقطه ۲	۷۹	۱۰	۸۶
		۷۹	۱۵	۹۷
۷	بزرگراه امام علی-نقطه ۱	۷۵	۱۰	۹۸
		۷۵	۱۵	۱۰۸
۸	بزرگراه امام علی-نقطه ۲	۷۱	۱۰	۱۰۰
		۷۱	۱۵	۱۰۳
۹	آزمایشگاه، لایه سوم-نقطه A	۱۴۰	۱۰	۱۵۹
۱۰	آزمایشگاه لایه سوم-نقطه B	۱۲۷	۱۰	۱۴۵
۱۱	آزمایشگاه لایه چهارم-نقطه A	۸۲	۱۰	۹۷
		۸۲	۱۵	۱۰۵
۱۲	آزمایشگاه، لایه چهارم-نقطه B	۶۱	۱۰	۷۸
		۶۱	۱۵	۸۴
۱۳	آزمایشگاه لایه چهارم-نقطه C	۷۱	۱۰	۸۴
		۷۱	۱۵	۹۲
۱۴	آزمایشگاه لایه چهارم-نقطه D	۷۸	۱۰	۹۲
		۷۸	۱۵	۱۰۰

جدول ۳: تأثیر ارتفاع سقوط در تغییرات مدول سختی.

ضریب تغییرات	ارتفاع سقوط وزنه (سانتیمتر)			موقعیت	
	۲۲۵	۳۷۵	۵۱۵		
٪۱.۵	-	۹۳	۹۱	نقطه ۱- پروژه یادگار امام	شرایط میدانی
٪۴.۱	-	۷۸	۸۳	نقطه ۲- پروژه یادگار امام	
٪۱.۷	-	۹۴	۹۶	نقطه ۳- پروژه یادگار امام	
٪۳.۸	-	۱۶۷	۱۷۶	نقطه ۴- پروژه یادگار امام	
٪۲.۵	-	۱۵۰	۱۵۵	نقطه ۵- پروژه یادگار امام	
٪۶.۴	۹۰	۸۹	۸۰	نقطه A	شرایط آزمایشگاهی
٪۳.۸	۶۳	۶۸	۶۶	نقطه B	
٪۳.۳	۵۸	۶۰	۶۲	نقطه C	
٪۰.۷	۸۳	۸۴	۸۳	نقطه D	

با سطح و همچنین ارائه روشی جهت شناسایی اندازه گیری های نادرست، آزمایش PFWD در چند نقطه داخل جعبه آزمایش که سطح همواری داشت، صورت گرفت. سپس در سطح لایه عمداً به عمق چند سانتی متر ناهمواری ایجاد و مجدداً آزمایش PFWD در آن نقاط صورت گرفت. از لحاظ عملیاتی، زمانی که آزمایش روی سطح ناهموار انجام می شد، مقداری جهش یا تغییر مکان افقی در دستگاه ایجاد می شد که برخی از این ارتعاشات دلالت بر وجود سطح تماس ضعیف داشت. با این حال وجود سطح تماس ضعیف در برخی از نقاط تا حدودی با بررسی منحنی های تاریخچه زمانی بار یا خیز که نمونه ای از آن در شکل (۳) آمده ، قابل شناسایی است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، وقتی که سطح ناهموار باشد، منحنی تاریخچه زمانی بار از شکل نرمال خارج می شود.

یک روش دیگر، بررسی منحنی خیز-بار در طول یک مدت بارگذاری می باشد. دو نوع منحنی خیز-بار خاص در شکل (۴) نمایش داده شده است. این شکل به صورت واضح نشان می دهد که منحنی سطح تماس خوب، شکل ظاهری بهتری نسبت به سطح تماس ضعیف دارد.

اما در هر صورت، بررسی میزان تأثیر سطح تماس ضعیف روی میزان مدول در محل مشکل است. در این تحقیق، در حالی که میزان مدول سختی برای سطح تماس خوب برابر ۹۶ MPa بود، برای سطح تماس ضعیف این میزان برابر ۴۴ MPa (یعنی کمتر از نصف آن) ثبت شده است. اما تأثیر دیگر عوامل در این تغییرات مشخص نیست.

### تأثیر اندازه قطر صفحه بارگذاری بر مدول سختی

اثر اندازه قطر صفحه (قطرهای ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی متری) در چند نقطه در شرایط آزمایشگاهی با ارتفاع بارگذاری ۵۰ سانتی متر و وزنه های ۵ و ۱۰ کیلوگرمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده مطابق جدول (۴) نشان داد که فشار وارده روی صفحه بارگذاری ۱۰۰ میلی متری حدود ۸ تا ۹ برابر بیشتر از صفحه ۳۰۰ میلی متری است. متعاقب آن مدول سختی به دست آمده از صفحه ۱۰۰ میلی متری به طور متوسط ۱/۸۵ برابر صفحه ۳۰۰ میلی متری حاصل گردید. البته نتایج به دست آمده براساس تعداد محدودی آزمایش اخذ شده و به منظور تایید آن، آزمون های بیشتری مورد نیاز می باشد.

جدول ۴: اثر اندازه صفحه روی مدول حاصله.

قطر صفحه بارگذاری (میلی متر)	شماره نقطه	بار وارده (نیوتن)	فشار وارده (کیلوپاسکال)	مدول سختی (مگاپاسکال)
۳۰۰	A	۴۰۴۶	۵۷	۱۸۸
		۶۳۶۶	۹۰	۱۹۴
	B	۴۰۸۰	۵۸	۱۳۰
		۶۲۸۱	۸۹	۱۲۹
۱۰۰	A	۴۰۲۲	۵۱۲	۳۴۳
		۶۰۸۰	۷۷۴	۳۵۳
	B	۳۹۴۳	۵۰۲	۲۴۵
		۶۰۹۱	۷۷۶	۲۷۴

### تأثیر تماس صفحه با سطح بر مدول سختی

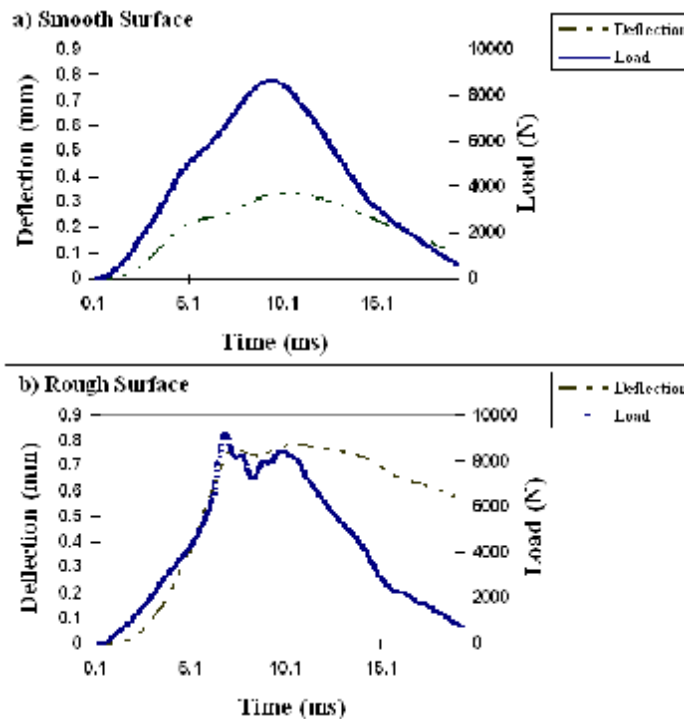
برای بررسی اثرات نحوه سطح تماس صفحه بارگذاری

## تأثیر فواصل ژئوفن های اضافی بر مدول سختی

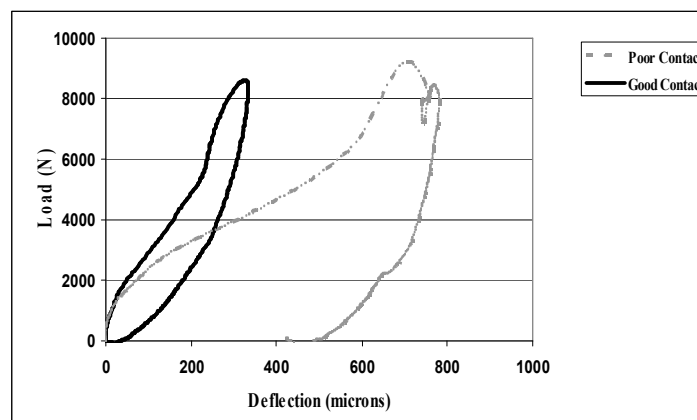
در صورتی که از دو ژئوفن اضافی علاوه بر ژئوفن مرکزی برای ثبت خیز سطحی استفاده شود، می توان مدول سختی لایه ها را براساس محاسبات معکوس به دست آورد. روش شارپ فواصل ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ سانتی متری نسبت به مرکز صفحه بارگذاری را برای آرایش شش ژئوفن جانبی دستگاه FWD پیشنهاد نموده است [ ۱۲ ]. در این دستورالعمل، آرایش نامنظم ژئوفن ها و تراکم بیشتر در ناحیه نزدیک بار جهت شناسایی بهتر

حوضچه افت و خیز و لحاظ تغییرات آن مدنظر قرار گرفته است. اما جهت تعیین فواصل دو ژئوفن اضافی دستگاه PFWD دستورالعملی ارائه نشده و این مسأله قابل بررسی و تحقیق است.

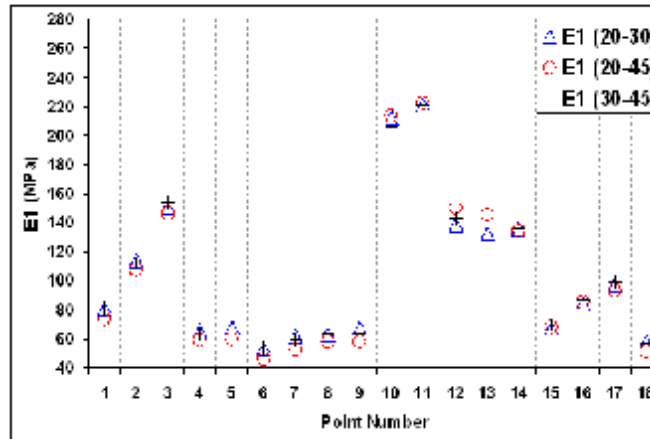
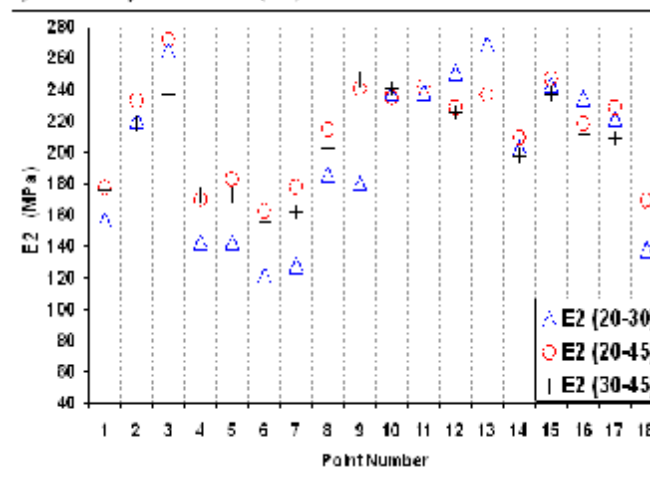
در این مطالعه، برای بررسی این موضوع و تعیین تأثیر این فواصل بر مدول سختی لایه ها، ژئوفن های اضافی دستگاه به ترتیب در فواصل ۲۰-۳۰، ۲۰-۴۵ و ۳۰-۴۵ سانتی متر قرار داده شد و در هر یک از این فواصل، آزمایش PFWD چندین بار تکرار گردید.



شکل ۳: تأثیر ناهمواری سطح روی منحنی های تاریخچه زمانی بار و خیز



شکل ۴: اثر سطح تماس ضعیف و سطح تماس خوب روی منحنی خیز-بار.

a) Upper layer modulus ( $E_1$ )b) Lower layer modulus ( $E_2$ )

شکل ۵: نتایج مدول سختی محاسبات معکوس براساس فواصل مختلف ژئوفن ها.

که نحوه قرارگیری ژئوفن ها تأثیر چندانی در میزان مدول لایه بالایی ندارد. با اینحال مطابق شکل ۵(b)، میزان مدول های  $E_2$  برای فواصل ۲۰-۴۵ و ۳۰-۴۵ سانتی متر تا حدود زیادی به یکدیگر نزدیک بوده و میزان مدول های فواصل ۲۰-۳۰ سانتی متر در بیشتر نقاط با آنها متفاوت است. به عبارت دیگر در نظر گیری فاصله ۳۰ سانتی متری برای ژئوفن دوم، از دقت لازم برای تخمین مدول لایه پایینی برخوردار نیست و فاصله ۴۵ سانتی متری برای استقرار ژئوفن های دوم دستگاه PFWD مناسب تر به نظر می رسد.

### نتیجه گیری

به منظور دستیابی به تکرارپذیری و حصول اطمینان از نتایج دستگاه PFWD، ضروری است که نقش هر یک از پارامترهای موثر در نتایج دستگاه بررسی و شناسایی

سپس براساس بار اعمال شده و میزان خیز ژئوفن های مرکزی و کناری در هر تکرار، میزان مدول لایه بالایی ( $E_1$ ) و لایه زیرین ( $E_2$ ) توسط نرم افزار EVERCALC محاسبه گردید. نرم افزار EVERCALC یکی از نرم افزارهای محاسبات معکوس است که شیوه محاسبه آن روش تکرار است. بدین صورت که با چندین بار فراخوانی یک برنامه تحلیلی مکانستیکی، تطابق قابل قبولی بین حوضچه خیز اندازه گیری شده و محاسبه شده برقرار می کند. این کار از طریق حداقل نمودن تابع هدف (مجموع وزنی مربعات اختلاف خیزهای محاسبه شده و اندازه گیری شده) صورت می گیرد [۱۳]. نتایج محاسبات  $E_1$  و  $E_2$  برای هر نقطه براساس فواصل مختلف ژئوفن ها در شکل ۵) آمده است. همان طور که در شکل ۵(a) مشاهده می شود، میزان مدول  $E_1$  به دست آمده از فواصل مختلف ژئوفن ها در نقاط مختلف تقریباً یکسان است. به عبارت دیگر می توان نتیجه گرفت

- گردد. از جمله این عوامل می توان میزان وزنه بارگذاری، ارتفاع سقوط، قطر صفحه بارگذاری، نحوه تماس صفحه با سطح، فواصل ژئوفن های اضافی و دمای ضربه گیر را برشمرد. براساس نتایج این تحقیق، میزان تأثیرگذاری هریک از این عوامل به شرح زیر است:
- با افزودن وزنه بارگذاری دستگاه PFWD، مدول سختی افزایش می یابد. این افزایش مدول در محدوده وزنه های بررسی شده، تقریباً با تغییر وزن دستگاه رابطه مستقیمی دارد ( $R^2=0.196$ ).
  - اثر ارتفاع سقوط وزنه روی مدول PFWD زیاد نبوده و قابل اغماض است (حداکثر ضریب تغییرات ۰.۶).
  - قطر صفحه بارگذاری تأثیر زیادی روی مدول سختی دارد، به گونه ای که مدول به دست آمده از صفحه
- ۱۰۰ میلی متری حدود ۱/۸۵ برابر صفحه ۳۰۰ میلی متری است.
- چگونگی سطح تماس صفحه با سطح لایه نیز در میزان مدول اندازه گیری شده مؤثر است. اصولاً سطح تماس ناهموار نتایج به مراتب متفاوتی می دهد. اما میزان تأثیر سطح تماس ضعیف روی مدول مشخص نیست.
  - براساس محاسبات معکوس، میزان فاصله دو ژئوفن اضافی از مرکز بارگذاری تأثیر چندانی در میزان مدول سختی محاسباتی لایه بالایی ندارد، ولی تا اندازه ای در میزان محاسبه شده مدول لایه پایینی مؤثر است.

## مراجع

- 1 - 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
- 2 - Lin, Deng-Fong., Liao, Chi-Chou., Lin, Jyh-Dong, (2006). "Factors Affecting Portable Falling Weight Deflectometer Measurements." ASCE, *Journal of Geotechnical & Geo-Environmental Engineering*, Vol. 132, No.6.
- 3 - Huang, Yang H. (1993). *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- 4 - 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.
- 5 - Steinert, B. C., Humphrey, D. N. and 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.
- 6 - Nunn, M. E., Brown, A., Weston, D. and Nicholls, J. C. (1997). "Design of Long Life Flexible Pavements for Heavy Traffic." *TRL report 250*, London, ISSN 0968-4107.
- 7 - Fleming P. R., Frost W. and Lambert J. (2007). "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.
- 8 - Office of the Deputy for Technical Affairs, (2003). "*Road General Technical Specification, No:101*", Management and Planning Organization of Iran.
- 9 - Briaud, J. L. and SEO, J. B. (2003). "Intelligent Compaction: Overview and Research Needs." *Report to the Federal Highway Administration*, Washington D.C.
- 10 - Hardcastle, J. H. (1992). "Subgrade Resilient Modulus for Idaho Pavements." Idaho Transportation Department, *FHWA Report No. RP110-d*.
- 11 - Lekarp, F., Isacson, U. and Dawson, A. (2000). "Resilient Response of Unbound Aggregates." *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 1.



- 12 - Romanoschi, S. and METCALF, J. B. (1999), "Simple approach to estimation of pavement structural capacity." *Transportation Research Board*, Record No. 1652, USA.
- 13 - Towfiq, Kamal, (2003). "Utilizing the Falling Weight Deflectometer in Evaluating Soil Support Values of Pavement Layers".", *Final Report*, Florida Department of Transportation, USA.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Portable Falling Weight Deflectometer
- 2 - Stiffness modulus
- 3 - Coefficient of determination