

توسعه مدل ریاضی کاسه نشست روسازی و تعیین فاصله بهینه ژئوفن‌های

دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای (FWD)

مقاله پژوهشی

علی‌رضا غنی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

نسرین حیدرآبادی‌زاده، کارشناس آزمایشگاه پیشرفته قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

آرش ضیائی، مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۱/۲۲ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۸

صفحه ۵۴-۴۷

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک مدلی ریاضی به منظور مدل‌سازی پیوسته کاسه نشست روسازی با استفاده از داده‌های افت‌وخیز سطح روسازی و تعیین موقعیت بهینه افت‌وخیز سنج‌های مربوط به دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای است. برای این منظور ۱۰۰۰۰ مقطع روسازی انعطاف‌پذیر مختلف با استفاده از نظریه ارتجاعی چندلایه‌ای تحلیل و سپس پایگاه داده مربوط به افت‌وخیزها در نه فاصله شعاعی مختلف برای مقاطع مختلف روسازی ایجاد شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب رگرسیون مربوط به برآزش معادله پیشنهادی به کاسه نشست در کلیه موارد بیش از ۰/۹۹ است که نشان‌دهنده برآزش بسیار خوب معادله پیشنهادی به کاسه نشست روسازی است. به منظور تعیین بهترین فاصله شعاعی جهت قرار دادن ژئوفن‌ها، تمامی سناریوهای مربوط به انتخاب ۴، ۵، ۶ و ۷ ژئوفن از ۹ ژئوفن بررسی شد و در هر مورد، ۵ سناریوی برتر انتخاب گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین فاصله شعاعی برای ۶ ژئوفن برابر ۱۸۳۰-۱۲۲۰-۹۱۵-۴۵۷-۲۰۳-۰ میلی‌متر و بهترین فاصله شعاعی برای ۷ ژئوفن برابر ۱۸۳۰-۱۲۲۰-۹۱۵-۴۵۷-۳۰۵-۲۰۳-۰ میلی‌متر است.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی، FWD، کاسه نشست، روسازی‌های انعطاف‌پذیر، فاصله بهینه ژئوفن‌ها

۱- مقدمه

استفاده از دستگاه FWD، یک جرم تا ارتفاع مشخص بالا آورده می‌شود و سپس بر روی یک صفحه بارگذاری دایره‌ای شکل افتاده و یک بار ضربه‌ای به سطح روسازی وارد می‌کند. شدت بار توسط یک سیستم فشارسنج اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که افت‌وخیزها با استفاده از یکسری افت‌وخیز سنج که تا سطح روسازی پایین آورده شده‌اند و در فواصل شعاعی مختلف قرار داده شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود [Sahin, 2007]. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک رابطه ریاضی به منظور مدل‌سازی کاسه نشست سطح روسازی در فواصل شعاعی مختلف از مرکز بارگذاری است. با استفاده از رابطه ریاضی ارائه شده که با استفاده از ۱۰۰۰۰ مقطع روسازی اعتبار سنجی

آزمایش‌های غیر مخرب به همراه محاسبات برگشتی مدول لایه‌های روسازی یک روش دقیق و پذیرفته شده برای ارزیابی سازه‌ای روسازی‌هاست. آزمایش‌های غیر مخرب روسازی معمولاً با استفاده از روش اندازه‌گیری افت‌وخیز سطح روسازی با استفاده از تجهیزات مختلف انجام می‌شود. این تجهیزات بر اساس حالت بارگذاری به ترتیب به سه گروه تجهیزات افت‌وخیز سنج استاتیکی، تجهیزات افت‌وخیز سنج حالت پایدار و تجهیزات افت‌وخیز سنج ضربه‌ای تقسیم می‌شوند [Sahin, 2007]. متداول‌ترین وسیله از بین تجهیزات اندازه‌گیری افت‌وخیز، دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای (FWD) است [Saltan, 2002]. در اندازه‌گیری افت‌وخیز با

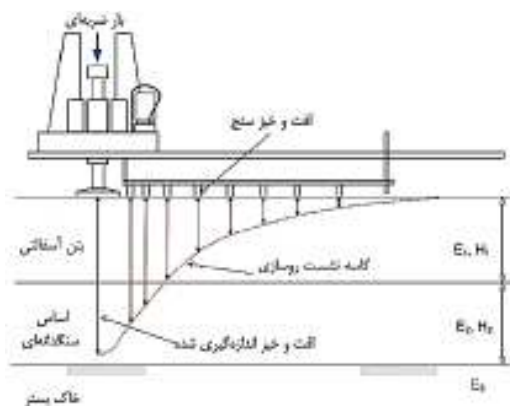
که می‌توانند سطوح بارگذاری بین ۶/۷ الی ۱۵۶ کیلو نیوتن را در سطح روسازی ایجاد نمایند. بار ضربه‌ای حاصل از دستگاه FWD، معمولاً به صورت یک بار نیم سینوسی با زمان بارگذاری ۰/۰۳ ثانیه در نظر گرفته می‌شود [Ullidtz and Stubstad, 1985; Hossain, Zaniewski and Rajan, 1994]. این زمان بارگذاری نشان‌دهنده حرکت بار یک چرخ متحرک با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت است. نتایج افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده در سطح روسازی با استفاده از دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای برای انجام محاسبات برگشتی و تعیین عمر باقی‌مانده روسازی به کار گرفته می‌شوند. محاسبات برگشتی توسط برنامه‌های کامپیوتری مختلفی انجام می‌شود که از آن جمله می‌توان به برنامه‌های EVERCALC، MODULUS، MICHBACK، EVERCALC-Alt و NUSGABACK اشاره نمود. در حقیقت در انجام محاسبات برگشتی روسازی، هدف یافتن مدول برجهندگی لایه‌های مختلف با توجه به معلوم بودن ضخامت لایه‌های مختلف و همچنین افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده در سطح روسازی است.

شده است، می‌توان با اندازه‌گیری تعداد معدودی افت‌وخیز در فواصل شعاعی مختلف و کالیبراسیون رابطه، افت‌وخیز را در سایر فواصل شعاعی به دست آورد. همچنین در این تحقیق، موقعیت بهینه ژئوفن‌ها تعیین و مهم‌ترین ژئوفن‌ها از نظر تأثیر بر مدول برگشتی پیش‌بینی شده برای لایه‌های مختلف روسازی، مشخص شده‌اند.

۲- دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای

دستگاه افت‌وخیز سنج ضربه‌ای باهدف شبیه‌سازی بار حاصل از عبور وسایل نقلیه در روسازی و تعیین افت‌وخیزهای سطح روسازی در فواصل شعاعی مختلف توسعه داده شده است. در این دستگاه، یک صفحه دایره‌ای انعطاف‌پذیر از یک ارتفاع مشخص بر روی سطح روسازی پرتاب می‌شود که ارتفاع سقوط وزنه با توجه به مقدار بار موردنیاز قابل تنظیم است. یک پوشش لاستیکی برای جلوگیری از بارگذاری آبی در زیر صفحه نصب شده است [Ullidtz and Stubstad, 1985].

تعداد هفت الی نه افت‌وخیز سنج وظیفه اندازه‌گیری افت‌وخیز سطح روسازی در فواصل شعاعی مختلف را بر عهده دارند. انواع مختلفی از دستگاه‌های FWD وجود دارند



شکل ۱. کاسه نشست روسازی در اثر بارگذاری دستگاه FWD در یک روسازی آسفالتی متعارف.

۳- توسعه پایگاه داده مصنوعی

سطح روسازی در ۹ فاصله شعاعی مختلف (۰، ۲۰۳، ۳۰۵، ۴۵۷، ۶۱۰، ۹۱۵، ۱۲۲۰، ۱۵۲۵ و ۱۸۳۰ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. بارگذاری به صورت یک صفحه با سطح تماس دایره‌ای و به شعاع ۱۵۲ میلی‌متر و فشار ثابت ۵۵۲ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. جدول (۱) مشخصات آماری مربوط به مقاطع

در این مطالعه ۱۰۰۰۰ مقطع مختلف روسازی انعطاف‌پذیر متشکل از بتن آسفالتی، اساس سنگدانه‌ای و خاک بستر، به منظور ایجاد یک پایگاه داده جامع جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی توسعه داده شده، تحت اثر بارگذاری استاتیکی معادل یک دستگاه FWD تحلیل شدند و در هر حالت افت‌وخیز

است که امکان تحلیل خطی و غیرخطی روسازی را تحت اثر حداکثر ۱۰ سطح بارگذاری با استفاده از نظریه ارتجاعی چندلایه‌ای فراهم می‌سازد. اعتبار سنجی نتایج حاصل از تحلیل خطی و غیرخطی روسازی با استفاده از این برنامه نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب نتایج حاصل از این برنامه با سایر برنامه‌های مبتنی بر نظریه ارتجاعی چندلایه‌ای مانند KENLAYER و JULEA است [Ghanizadeh and Ziaei, 2015]. مشخصات آماری مربوط به افت‌وخیزهای سطح روسازی در توسعه پایگاه داده در جدول (۲) داده شده است.

روسازی تحلیل‌شده را نشان می‌دهد. در تمام تحلیل‌ها، نسبت پواسون بتن آسفالتی و اساس سنگدانه‌ای ۰/۳۵ و نسبت پواسون خاک بستر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. این مقادیر به‌طور معمول مقادیر نسبت پواسون برای مخلوط آسفالتی گرم، مصالح دانه‌ای تثبیت نشده و خاک‌های ریزدانه است [Maher and Bennert, 2008]. همچنین یافته‌های قبلی نیز نشان داده است که انتخاب نسبت پواسون اثر کمی بر پاسخ‌های روسازی دارد [Huang, 2004]. به‌منظور تحلیل مقاطع مختلف روسازی، از برنامه NonPAS استفاده شده

جدول ۱. مشخصات آماری مربوط به ضخامت‌ها و مدول لایه‌های روسازی برای پایگاه داده ایجادشده.

پارامتر آماری	H ₁	H ₂	E ₁	E ₂	E ₃
حداکثر	۳۰۹	۵۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰	۴۰۰
حداقل	۵۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۲۰
میانه	۱۸۱	۳۰۰	۴۳۱۷/۸	۷۲۷/۷	۱۰۰
میانگین	۱۷۸/۴	۲۸۲/۵	۴۷۰۳/۲۲	۸۴۶/۷۸	۱۴۸/۳۵
انحراف معیار	۷۹/۴	۱۱۹	۲۶۸۲/۱۳	۵۵۹/۸	۱۱۲/۴۳
	H _i : ضخامت لایه آم برحسب میلی‌متر		E _i : مدول لایه آم برحسب مگا پاسکال		

جدول ۲. مشخصات آماری مربوط به مقادیر مدول‌ها (برحسب مگا پاسکال) برای پایگاه داده ایجادشده.

پارامتر آماری	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉
حداکثر	۳/۰۷۲	۲/۰۲۹	۱/۴۹۴	۱/۰۴۴	۰/۸۸۸	۰/۶۴۸	۰/۴۸۲	۰/۳۷۹	۰/۳۲۳
حداقل	۰/۰۵۷	۰/۰۴۵	۰/۰۴۱	۰/۰۳۷	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۴
میانه	۰/۲۶۶	۰/۲۱۴	۰/۱۸۹	۰/۱۶۷	۰/۱۴۸	۰/۱۱۸	۰/۰۹۲	۰/۰۷۴	۰/۰۶۱
میانگین	۰/۳۶۷	۰/۲۹۵	۰/۲۶۰	۰/۲۲۲	۰/۱۹۳	۰/۱۵۰	۰/۱۲۱	۰/۰۹۹	۰/۰۸۳
انحراف معیار	۰/۳۰۸	۰/۲۴۷	۰/۲۱۵	۰/۱۸۳	۰/۱۵۹	۰/۱۲۵	۰/۱۰۳	۰/۰۸۶	۰/۰۷۳

۴- مدل‌سازی کاسه نشست روسازی

چنین رابطه ریاضی می‌توان پس از اندازه‌گیری افت‌وخیز در تعدادی فواصل شعاعی محدود، رابطه بین افت‌وخیز و فاصله شعاعی را کالیبره و سپس مقادیر افت‌وخیز را در سایر فواصل شعاعی پیش‌بینی نمود. در این تحقیق، روابط ریاضی مختلفی به‌منظور برقراری ارتباط بین فاصله شعاعی از مرکز بارگذاری و افت‌وخیز مورد بررسی قرار گرفتند و از بین این روابط، رابطه (۱) پیشنهاد گردید.

$$Def_r = c + \frac{a \times |r/d|^b}{1 + |r/d|^b} \quad (1)$$

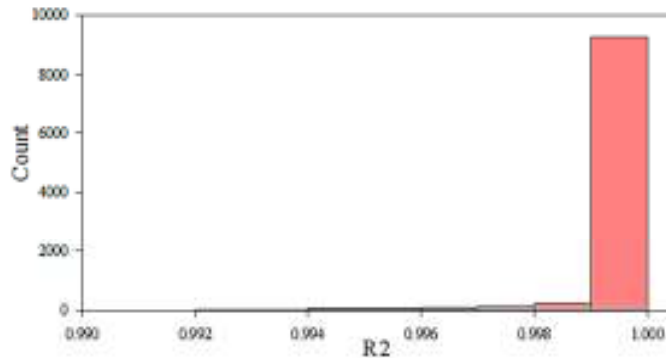
معمولاً برای محاسبه افت‌وخیز سطح روسازی با استفاده از دستگاه FWD، افت‌وخیز را در تعدادی فواصل شعاعی مختلف (۷ الی ۹ نقطه) از سطح روسازی اندازه‌گیری می‌کنند. به‌منظور تعمیم نتایج اندازه‌گیری افت‌وخیز در این فواصل شعاعی نیاز است تا یک رابطه ریاضی دقیق بین مقادیر افت‌وخیز و فاصله شعاعی از مرکز بارگذاری ارائه شود. با استفاده از این رابطه می‌توان افت‌وخیز سطح روسازی را در سایر فواصل شعاعی محاسبه نمود. با داشتن

پایگاه داده (۹) افت و خیز به ازای مقادیر مختلف فاصله شعاعی) برازش داده شد. در مجموع ۱۰۰۰۰ برازش انجام شد و در هر حالت ضرایب ثابت a ، b ، c و d به همراه ضریب رگرسیون R^2 محاسبه شد. مشخصات آماری حاصل از برازش تابع (۱) به ۱۰۰۰۰ داده افت و خیز در جدول (۳) آورده شده است. هیستوگرام فراوانی مربوط به ضرایب رگرسیون به دست آمده در شکل (۲) نشان داده شده است.

که در این رابطه Def_r افت و خیز اندازه گیری شده (میلی متر) در فاصله شعاعی r (سانتی متر) و مقادیر a ، b ، c و d ضرایب ثابت مدل می باشند که از طریق رگرسیون غیرخطی و با توجه به تعداد محدود افت و خیزهای اندازه گیری شده در فواصل شعاعی مختلف به دست می آیند. به منظور اعتبار سنجی معادله (۱)، برنامه ای در محیط MATLAB توسعه داده شد و معادله (۱) به هر رکورد

جدول ۳. مشخصات آماری مربوط برازش رابطه پیشنهاد شده به کاسه نشست ۱۰۰۰۰ مقطع روسازی.

پارامتر	a	b	c	d	R^2
حداکثر	-۰/۰۷	۲/۴۸	۳/۰۷	۱۰۲۸۹۳	۱
حداقل	-۹/۰۶	-۰/۹۳	۰/۰۵۷	۱۲۰	۰/۹۶۴
میانه	-۰/۳۳۱	۱/۱۸	۰/۲۶۶	۷۹۹	۰/۹۹۹۹
میانگین	-۰/۵۶۶	۱/۱۸۵	۰/۳۶۷	۴۵۱۵	۰/۹۹۹۵
انحراف معیار	۰/۷۴۲	۰/۳۲۲	۰/۳۰۸	۱۲۸۴۵	۰/۰۰۱۶



شکل ۲. هیستوگرام فراوانی ضرایب رگرسیون حاصل از برازش معادله (۱) به کاسه نشست ۱۰۰۰۰ مقطع روسازی.

افت و خیز برای ۵ فاصله شعاعی مختلفی که در هر سناریو وجود نداشتند توسط رابطه (۱) محاسبه شد و بر اساس این داده ها (مقادیر محاسبه شده از رابطه و مقادیر حاصل از تحلیل) ضریب رگرسیون و خطای ریشه مربع متوسط (RMSE) محاسبه شد. این فرایند برای حالتی که ۵، ۶ و ۷ ژئوفن وجود داشته باشد نیز انجام شد. تعداد سناریوهایی که برای ۵، ۶ و ۷ ژئوفن وجود داشت به ترتیب برابر ۱۲۶، ۸۴ و ۳۶ بود. جدول های ۴ الی ۷ پنج سناریو برتر که بیشترین مقدار R^2 را دارد نشان می دهند. شکل های ۳ الی ۶ مقادیر R^2 برای حالت های مختلف انتخاب ۴، ۵، ۶ و ۷ ژئوفن از ۹ ژئوفن مختلف را نشان می دهند.

همان گونه که ملاحظه می شود، ضریب رگرسیون در اکثر موارد بیش از ۰/۹۹ است که نشان دهنده برازش بسیار خوب کاسه نشست محاسبه شده با رابطه ارائه شده در این تحقیق (معادله (۱)) است.

تعیین موقعیت بهینه ژئوفن ها

در این تحقیق، به منظور تعیین بهترین فاصله شعاعی جهت قرار دادن ژئوفن ها، ابتدا فرض شد که تنها ۴ ژئوفن وجود دارد و ۱۲۶ حالت مختلف انتخاب ۴ ژئوفن از ۹ ژئوفن تعیین شد و سپس با برازش رابطه (۱) به ۱۰۰۰۰ داده و برای ۱۲۶ سناریو مختلف مقادیر a ، b ، c و d تعیین شد. سپس

جدول ۴. پنج سناریو برتر در انتخاب ۴ از ۹ ژئوفن.

فاصله شعاعی قرارگیری ژئوفن‌ها (mm)	R ²	RMSE
۰ - ۳۰۵ - ۹۱۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۷۹	۰/۰۰۲۲۱
۰ - ۳۰۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۷۱	۰/۰۰۲۸۰
۰ - ۳۰۵ - ۶۱۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۶۸	۰/۰۰۲۲۷
۰ - ۲۰۳ - ۹۱۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۶۷	۰/۰۰۲۴۷
۰ - ۲۰۳ - ۹۱۵ - ۱۵۲۵	۰/۹۹۹۵۸	۰/۰۰۲۴۲

جدول ۵. پنج سناریو برتر در انتخاب ۵ از ۹ ژئوفن.

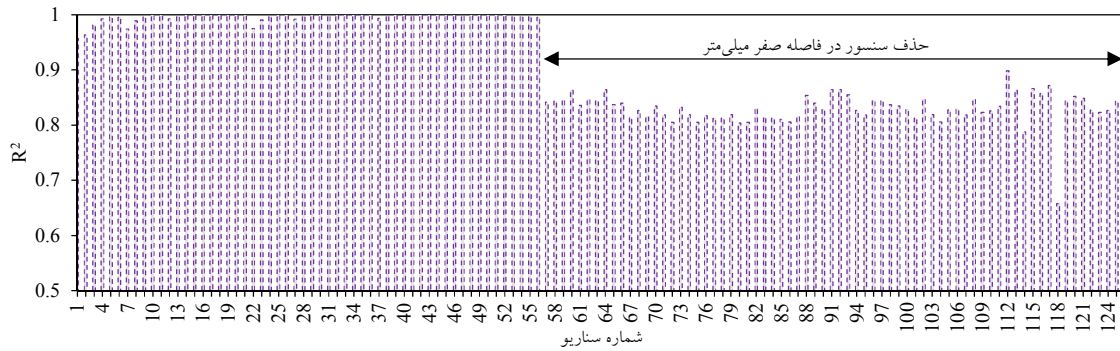
فاصله شعاعی قرارگیری ژئوفن‌ها (mm)	R ²	RMSE
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۰	۰/۰۰۱۴۱
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۹۱۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۸۹	۰/۰۰۱۱۰
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۹۱۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۸۷	۰/۰۰۱۲۸
۰ - ۲۰۳ - ۶۱۰ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۸۵	۰/۰۰۱۷۷
۰ - ۳۰۵ - ۶۱۰ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۸۴	۰/۰۰۱۹۱

جدول ۶. پنج سناریو برتر در انتخاب ۶ از ۹ ژئوفن.

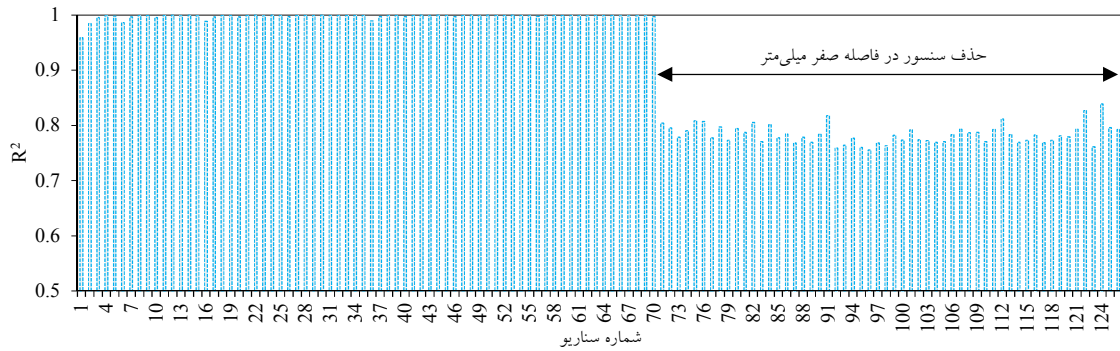
فاصله شعاعی قرارگیری ژئوفن‌ها (mm)	R ²	RMSE
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۷	۰/۰۰۱۳۲
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۶۱۰ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۵	۰/۰۰۰۷۹
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۳	۰/۰۰۱۲۵
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۹۱۵ - ۱۵۲۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۱	۰/۰۰۱۴۹
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۹۱۵ - ۱۵۲۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۸۹	۰/۰۰۱۳۶

جدول ۷. پنج سناریو برتر در انتخاب ۷ از ۹ ژئوفن.

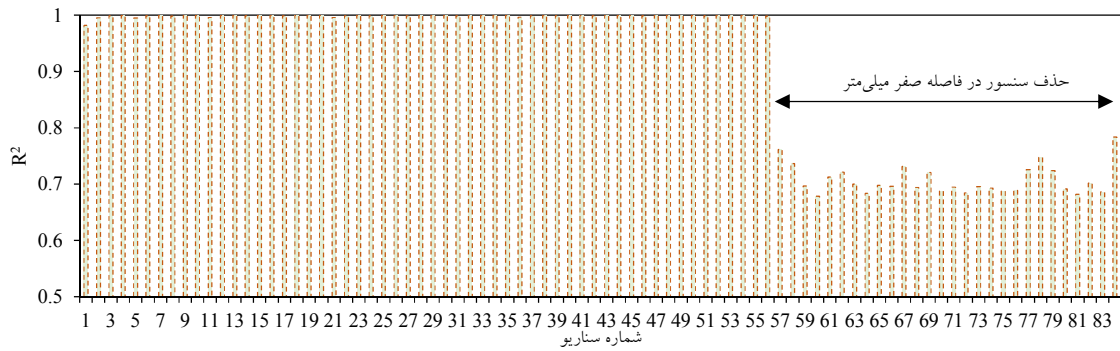
فاصله شعاعی قرارگیری ژئوفن‌ها (mm)	R ²	RMSE
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۴۵۷ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۹	۰/۰۰۰۵۹
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۶۱۰ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۶	۰/۰۰۰۷۵
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۵۲۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۲	۰/۰۰۱۹۴
۰ - ۲۰۳ - ۴۵۷ - ۶۱۰ - ۹۱۵ - ۱۲۲۰ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۱	۰/۰۰۱۶۹
۰ - ۲۰۳ - ۳۰۵ - ۶۱۰ - ۱۲۲۰ - ۱۵۲۵ - ۱۸۳۰	۰/۹۹۹۹۰	۰/۰۰۱۱۳



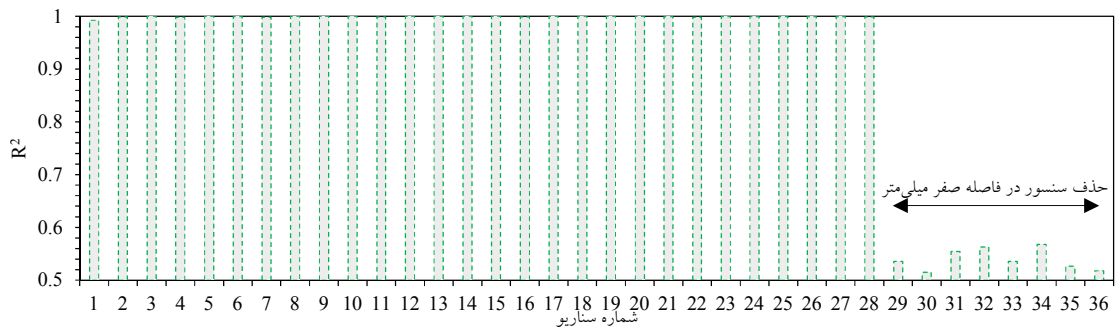
شکل ۳. مقادیر R^2 برای حالت‌های مختلف انتخاب ۴ ژئوفن از ۹ ژئوفن.



شکل ۴. مقادیر R^2 برای حالت‌های مختلف انتخاب ۵ ژئوفن از ۹ ژئوفن.



شکل ۵. مقادیر R^2 برای حالت‌های مختلف انتخاب ۶ ژئوفن از ۹ ژئوفن.



شکل ۶. مقادیر R^2 برای حالت‌های مختلف انتخاب ۷ ژئوفن از ۹ ژئوفن.

نشان می‌دهد [Gopalakrishnan and Papadopoulos, 2011; Scimemi and et al, 2016; Alkasawneh, 2007; Fwa and et al, 1997; Varma and Kutay, 2016]

در شکل‌های ۳ الی ۶، کاهش شدید R^2 مربوط به سناریوهایی است که در فاصله صفر میلی‌متر ژئوفن وجود نداشته باشد. جدول (۸) مقادیر R^2 و RMSE را برای سناریوهایی که در سایر مطالعات به آن‌ها اشاره شده است

جدول ۸. سناریوهای بررسی شده در سایر مطالعات.

فاصله شعاعی قرارگیری ژئوفن‌ها(mm)	R^2	RMSE
۰-۳۰۵-۶۱۰-۹۱۵-۱۲۲۰-۱۵۲۵	۰/۹۹۸۹۷	۰/۰۰۴۲۲
۰-۲۰۳-۳۰۵-۴۵۷-۹۱۵-۱۲۲۰	۰/۹۹۴۵۰	۰/۰۰۵۴۴
۰-۲۰۳-۳۰۵-۴۵۷-۶۱۰-۹۱۵	۰/۹۸۱۸۶	۰/۰۱۱۰۹
۰-۲۰۳-۳۰۵-۴۵۷-۶۱۰-۹۱۵-۱۵۲۵	۰/۹۹۸۶۱	۰/۰۰۲۴۸
۰-۳۰۵-۶۱۰-۹۱۵-۱۲۲۰-۱۵۲۵-۱۸۳۰	۰/۹۹۹۶۰	۰/۰۰۴۵۵
۰-۴۵۷-۶۱۰-۹۱۵-۱۲۲۰-۱۵۲۵-۱۸۳۰	۰/۹۹۸۸۱	۰/۰۰۷۸۹
۰-۲۰۳-۳۰۵-۴۵۷-۶۱۰-۹۱۵-۱۲۲۰-۱۵۲۵	۰/۹۹۶۹۶	۰/۰۰۴۰۴

برابر ۱۸۳۰-۱۲۲۰-۹۱۵-۴۵۷-۲۰۳-۰ میلی‌متر است که بیشترین مقدار ضریب رگرسیون ($R^2 = 0.99997$) را در میان ۸۴ سناریو دارد.

۵. بهترین فاصله شعاعی در انتخاب ۷ ژئوفن از ۹ ژئوفن برابر ۱۸۳۰-۱۲۲۰-۹۱۵-۴۵۷-۳۰۵-۲۰۳-۰ میلی‌متر است که:

بیشترین مقدار ضریب رگرسیون ($R^2 = 0.99999$) را در میان ۳۶ سناریو دارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالت استفاده از ۶ ژئوفن، مقدار R^2 سناریوهای پیشنهادی در این تحقیق بیشتر از مقادیر R^2 سناریوهای پیشنهادی توسط سایر محققین می‌باشند؛ این امر زمانی که از ۷ ژئوفن نیز استفاده می‌شود نیز صادق است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که به‌منظور تعیین دقیق کاسه نشست، فاصله شعاعی ژئوفن‌ها در انتخاب ۶ ژئوفن مطابق جدول (۶) و در انتخاب ۷ ژئوفن مطابق جدول (۷) تنظیم گردد.

۶-مراجع

- Alkasawneh, W. M., (2007), "Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithms". Ph. D dissertation, University of Akron.
- Fwa, T., Tan, C., & Chan, W., (1997), "Back calculation analysis of pavement-layer moduli using genetic algorithms", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1570, No.1, pp.134-142.
- Garson GD. (1991), "Interpreting neural-network connection weights". Artif Intell Expert .Vol. 6, No. 7, pp. 47-51.
- Ghanizadeh A.R. and A. Ziaei, (2015), "NonPAS: A Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements", International Journal

۵- نتیجه‌گیری

- نتایج این تحقیق به شرح زیر قابل‌بیان است:
۱. معادله پیشنهادشده قادر به محاسبه افت‌وخیزهای سطح روسازی با دقت بسیار مناسب است، به‌طوری‌که ضریب رگرسیون در اکثر موارد بیش از ۰/۹۹ بیشتر است.
 ۲. در صورت استفاده از ۴ ژئوفن، بهترین فاصله شعاعی به‌صورت ۱۸۳۰-۹۱۵-۳۰۵-۰ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین مقدار ضریب رگرسیون ($R^2 = 0.99979$) را در میان ۱۲۶ سناریو دارد.
 ۳. بهترین فاصله شعاعی در انتخاب ۵ ژئوفن از ۹ ژئوفن برابر ۱۸۳۰-۱۲۲۰-۴۵۷-۳۰۵-۰ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین مقدار ضریب رگرسیون ($R^2 = 0.9999$) را در میان ۱۲۶ سناریو دارد.
 ۴. بهترین فاصله شعاعی در انتخاب ۶ ژئوفن از ۹ ژئوفن

- Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Saltan, M., (2002), "Modeling deflection basin using neuro-fuzzy in backcalculating flexible pavement layer moduli". Pakistan Journal of Information and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 180-187.
 - Scimemi, G. F., Turetta, T., & Celauro, C., (2016), "Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm". Construction and Building Materials, Vol. 119, No. 119, pp. 288-295.
 - Sahin, M. (2005), "Pavement Management For Airports, Roads, and Parking Lots Second Edition": Published by Springer.
 - Ullidtz, P., & Stubstad, R. N., (1985), "Analytical-empirical pavement evaluation using the falling weight deflectometer". Transportation research record, Vol. 1022, No. 17, pp. 36-44.
 - Varma, S., & Emin Kutay, M., (2016). "Backcalculation of viscoelastic and nonlinear flexible pavement layer properties from falling weight deflections". International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 388-402.
 - of Integrated Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 21-28.
 - Gopalakrishnan, K., & Papadopoulos, H., (2011), "Reliable pavement backcalculation with confidence estimation". Scientia Iranica, Vol. 18, No. 6, pp. 1214-1221.
 - Gurney, K., (2005), "An introduction to neural networks". London, CRC Press.
 - Hossain, M., Zaniewski, J., & Rajan, S., (1994), "Estimation of Pavement-Layer Moduli using Nonlinear Optimization Technique". Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 376-393.
 - Huang, Y. H., (2004), "Pavement analysis and design", New Jersey, Prentice Hall.
 - Maher, A. & Bennert, T. A., (2008). "Evaluation of Poisson's ratio for use in the mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG)", Final Report: FHWA-NJ-2008-004. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation Washington, D.C.
 - Olden JD, Jackson DA., (2002), "Illuminating the "black box": a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks". Ecol Mode. Vol. 154. pp. 135-50.
 - Pekcan, O., Tutumluer, E., and Thompson, M., (2008), "Artificial neural network based backcalculation of conventional flexible pavements on lime stabilized soils".