

ارایه مدل پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی (SN_{eff}) در سطح شبکه با

استفاده از پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز دستگاه FWD

امیر کاوسی*، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مجتبی عباس‌قربانی، دانش آموخته دکتری، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران، ایران
فریدون مقدس‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران
آرمین بامداد زیکساری، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵

چکیده

تعیین وضعیت موجود روسازی در سطح شبکه نیازمند ارزیابی سازه‌ای روسازی می‌باشد که معمولاً با استفاده از دستگاه FWD و در قالب شاخص عدد سازه‌ای موثر روسازی (SN_{eff}) انجام می‌شود. تحلیل داده‌های این دستگاه نیازمند اطلاع از ضخامت لایه‌ها بوده که بایستی با سونداز، مغزه‌گیری و یا استفاده از دستگاه GPR اندازه‌گیری شود. در این تحقیق به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه برداشت ضخامت لایه‌ها، با استفاده از پایگاه داده موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک نسبت به ارایه مدل پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی اقدام گردید. برای محاسبه این شاخص داده‌های افت و خیز دستگاه FWD و ضخامت لایه‌های روسازی حاصل از دستگاه GPR بر اساس روش آشتو به عدد سازه‌ای موثر روسازی تبدیل و به عنوان روش مبنا در نظر گرفته شد. سپس پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز روسازی مورد مطالعه قرار گرفته و همبستگی آنها با عدد سازه‌ای موثر روسازی در نرم‌افزار SPSS تعیین گردید. در ادامه ضمن مطالعه مدل‌ها مبتنی بر پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز روسازی، ۳۰۰۰ کاسه انحناء افت و خیز در ۱۲۰۰ کیلومتر از راه‌های استان خوزستان به منظور ارایه مدل پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از تحلیل داده‌ها یک مدل رگرسیون غیر خطی با استفاده از پارامترهای SCI، AUPP و $D90/D0$ برای محاسبه عدد سازه‌ای موثر روسازی با ضریب تعیین ۰/۹ ارایه گردید. در این تحقیق مشخص گردید که پارامترهایی مانند SCI، AUPP و پارامترهای نرمال شده با افت و خیز مرکزی همبستگی بیشتری با عدد سازه‌ای موثر روسازی دارند. همچنین مدل پیشنهادی در این تحقیق با ضریب تعیین ۰/۹ نسبت به بهترین مدل موجود یعنی مدل Jameson با ضریب تعیین ۰/۸۴ برتری محسوس دارد.

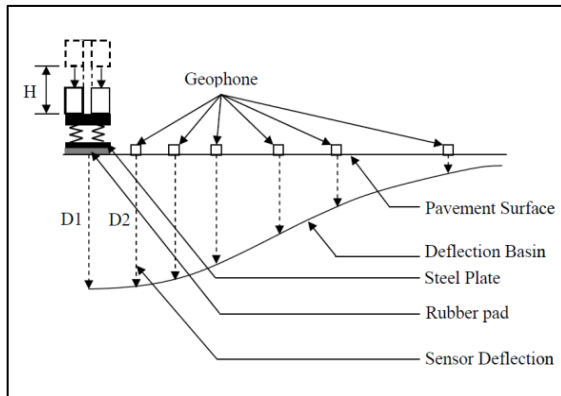
واژه‌های کلیدی: افت و خیز روسازی، دستگاه FWD، عدد سازه‌ای موثر، ارزیابی سازه‌ای

۱- مقدمه

بازیافت گرم، روکش آسفالتی، بازیافت سرد و بازسازی) مشخص می‌گردد. ارزیابی سازه‌ای روسازی در سطح شبکه به منظور تعیین ظرفیت باربری و قابلیت روسازی در تحمل بارهای ناشی از ترافیک در دوره طرح روسازی انجام می‌شود. به منظور تعیین وضعیت سازه‌ای روسازی موجود در سطح شبکه معمولاً از شاخص عدد سازه‌ای موثر (SN_{eff}) استفاده می‌شود. در راهنمای طرح روسازی آشتو دو روش برای تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی‌های موجود معرفی شده است که به

در سیستم مدیریت روسازی^۱، ارزیابی راه‌ها معمولاً در دو سطح پروژه و شبکه انجام می‌شود. در سطح شبکه داده‌ها از کمیت و کیفیت کمتری برخوردار بوده و هدف تعیین نوع عملیات نگهداری (پیشگیرانه^۲، جاری^۳، بهسازی^۴ و بازسازی^۵) در قطعات روسازی و همچنین بودجه مورد نیاز کل عملیات نگهداری می‌باشد. بعد از تعیین نوع عملیات نگهداری در سطح شبکه، ارزیابی دقیقتری روی قطعات روسازی انجام شده و گزینه نگهداری مناسب (فوغ‌سیل، اسلاری‌سیل، چپ‌سیل،

بطور گسترده در ارزیابی روسازی در سطح شبکه و سطح پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر معرف پاسخ کل سیستم روسازی و بستر در حوزه تاثیر تنش بوده و به همین دلیل به منظور تقسیم راه به قطعات همگن سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bryce (et al.), 2013). شاخص انحناء سطح روسازی (SCI^Y) مربوط به خصوصیات کاسه انحناء در نزدیکی مرکز بارگذاری است که می‌تواند پاسخ مجموع لایه آسفالتی را در سیستم روسازی مشخص نماید. پارامترهای BDI^A و BCI^A به ترتیب بمنظور ارزیابی لایه‌های دانه‌ای و بستر استفاده می‌شوند. در استفاده از پارامترهای کاسه انحناء روسازی بایستی به ضخامت لایه‌های روسازی نیز دقت نمود به عنوان مثال در صورت ارزیابی روسازی با ضخامت زیاد برای لایه آسفالتی می‌توان به جای استفاده از افت و خیز در فاصله 20 سانتیمتری از افت و خیز در فاصله 30 سانتیمتری از مرکز بارگذاری برای محاسبه شاخص SCI استفاده نمود. همچنین پارامتر $AREA$ برای ارزیابی سازه‌ای روسازی و بستر و پارامتر $AUPP^0$ وضعیت سازه‌ای بخش بالایی روسازی را مشخص می‌سازد (Horak (et al.), 2009).



شکل ۱. کاسه انحناء افت و خیز روسازی حاصل از دستگاه FWD

۳- پیشینه تحقیق

در این تحقیق تمرکز بر روی محاسبه عدد سازه‌ای موثر روسازی (SN_{eff}) بدون استفاده از ضخامت لایه‌ها می‌باشد. ارتباط بین عدد سازه‌ای موثر روسازی و پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز بوسیله محققان متعددی مورد بررسی قرار گرفته است که نشان از حساسیت قابل توجه عدد سازه‌ای به افت و خیز حداکثر روسازی در مقایسه با ضخامت لایه‌ها دارد (Gedafa (et al.), 2013). در جدول ۲ مدل‌های

ترتیب روش ارزیابی لایه‌های روسازی موجود و روش غیر مخرب با استفاده از داده‌های دستگاه FWD می‌باشد. در روش غیر مخرب سیستم روسازی دولایه‌ای (روسازی و بستر) فرض شده و عدد سازه‌ای موثر بر حسب اینچ با استفاده از ضخامت کل روسازی (in) و مدول موثر کل ضخامت روسازی (psi) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$SN_{eff} = 0.0045 \times D \times \sqrt[3]{E_p} \quad (1)$$

برداشت میدانی با دستگاه FWD در مقایسه با سایر تجهیزات غیر مخرب ارزیابی روسازی زمان‌بر بوده و همراه با اختلال در ترافیک است. از طرف دیگر محاسبه عدد سازه‌ای موثر روسازی در این روش (رابطه ۱) نیازمند اطلاع دقیق از ضخامت کل لایه‌های روسازی می‌باشد. ضخامت لایه‌ها یا به صورت غیر مخرب با استفاده از دستگاه GPR^6 و یا به صورت مخرب با استفاده از مغزه‌گیری و سونداژ اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه GPR با استفاده از امواج الکترومغناطیس، پروفیل ضخامت کل لایه آسفالتی و مجموع لایه‌های اساس و زیراساس را اندازه‌گیری می‌کند اما برداشت داده‌ها و تحلیل نتایج آن زمان‌بر و پیچیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تحلیل داده‌های افت و خیز دستگاه FWD به منظور ارزیابی سازه‌ای روسازی نیازمند صرف زمان زیادی برای برداشت داده‌ها و تحلیل نتایج آن می‌باشد و این در حالی است که ارزیابی در سطح شبکه نیازمند داده‌های دقیق و صرف زمان زیاد نمی‌باشد. هدف از این تحقیق ارایه مدلی به منظور محاسبه عدد سازه‌ای موثر روسازی بر اساس داده‌های افت و خیز دستگاه FWD با رویکرد حذف ضخامت لایه‌های روسازی می‌باشد.

۲- پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز

کاسه انحناء افت و خیز روسازی از اتصال مقادیر افت و خیز اندازه‌گیری شده بوسیله ۷ یا ۹ ژئوفون دستگاه FWD به یکدیگر به دست می‌آید که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است. پارامترهای مختلفی جهت ارزیابی لایه‌های روسازی و بستر از کاسه انحناء افت و خیز قابل استخراج می‌باشد که در جدول ۱ برخی از آنها آورده شده است. هریک از این پارامترها توصیف کننده خصوصیات بخشی از منحنی کاسه انحناء افت و خیز است. برای مثال پارامتر افت و خیز ژئوفون مرکزی (D_{max}) از مهمترین پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز بشمار می‌آید که

جدول ۱. پارامترهای کاسه انحنافت و خیز روسازی (Horak et al., 2009)

پارامتر	رابطه	کاربرد
D _{max}	---	ارزیابی سازه‌ای کل روسازی و قطعه بندی
SCI	$SCI = D_0 - D_{200}$	ارزیابی سازه‌ای لایه آسفالتی
BDI	$BDI = D_{300} - D_{600}$	ارزیابی سازه‌ای لایه اساس
BCI	$BCI = D_{600} - D_{900}$	ارزیابی سازه‌ای لایه زیراساس و بستر
AREA	$AREA = 6 \left(1 + 2 \frac{D_{300}}{D_0} + 2 \frac{D_{600}}{D_0} + \frac{D_{900}}{D_0} \right)$	ارزیابی سیستم روسازی و بستر
AUPP	$AUPP = \left(\frac{5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900}}{2} \right)$	وضعیت سازه‌ای لایه‌های بالای روسازی

سطح شبکه می‌گردد.

۲- حذف محاسبات بازگشتی به منظور تعیین عدد سازه‌ای موثر در روش آشتو که موجب کاهش زمان تحلیل داده‌ها در سطح شبکه می‌گردد (Chang et al., 2010).

۴- مطالعه موردی

به منظور مقایسه مدل‌ها تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی و همچنین توسعه یک مدل مبتنی بر پارامترهای کاسه انحنافت که برای شرایط ایران کالیبره شده باشد از پایگاه داده موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استفاده گردید. این پایگاه شامل ۳۰۰۰ داده از راه‌های شریانی استان خوزستان به طول کل ۱۲۰۰ کیلومتر می‌باشد. کاسه انحنافت و خیز روسازی در پایگاه داده با استفاده از دستگاه FWD در تمام نقاط اندازه‌گیری و برای تحلیل به دمای ۲۰ درجه سانتیگراد منتقل و در تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال معادل نصف محور استاندارد نرمال شده است. لذا پارامترهای کاسه انحنافت و خیز روسازی مانند SCI, BDI, AREA, BCI, AUPP در تمام نقاط قابل محاسبه می‌باشند. از طرف دیگر محورهای مورد نظر با استفاده از دستگاه GPR ارزیابی و پروفیل ضخامت لایه‌های آسفالتی، اساس و زیر

پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی بدون اطلاع از ضخامت لایه‌ها ارایه گردیده است. در مدل اول افت و خیز d_x در فاصله r_x از صفحه بارگذاری معادل افت و خیز بستر روسازی فرض می‌گردد. سپس افت و خیز مذکور از حداکثر مقدار حاصلضرب $d_x \times r_x$ برای ژئوفون‌های دستگاه FWD تعیین شده و در پایان با استفاده از افت و خیز بستر روسازی و فاصله آن از مرکز بارگذاری عدد سازه‌ای موثر روسازی محاسبه می‌شود (Noureldin, 1993). در مدل دوم روسازی به صورت یک دال با سختی و طول مشخصه ۱۱ (طولی از دال که تحت تاثیر تنش قرار می‌گیرد) مدل شده و سپس با محاسبه پارامتر AREA از کاسه انحنافت و خیز روسازی و طول مشخصه، مدول الاستیسیته بستر و عدد سازه‌ای موثر روسازی تعیین می‌گردد (Hoffman, 2003). سه مدل دیگر به صورت توابع رگرسیون خطی و غیر خطی بر اساس پارامترهای کاسه انحنافت و خیز روسازی توسعه یافته‌اند که در جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده و واحد آنها ارایه شده است. مزایای استفاده از مدل‌های مبتنی بر کاسه انحنافت و خیز روسازی به صورت موردی می‌باشد.

۱- حذف ضخامت لایه‌های روسازی در تعیین عدد سازه‌ای موثر که موجب کاهش زمان و هزینه برداشت داده‌ها در

جدول ۲. تخمین عدد سازه‌ای موثر روسازی بدون اطلاع از ضخامت لایه‌ها

ردیف	محقق	رابطه	پارامترهای مدل
۱	Noureldin, 1993		SN _{eff} , r _x , D _x (in)
۲	Hoffman, 2003		SN _{eff} (in), l ₀ (cm), E _{SG} (MPa)
۳	Cost, 1998		SN _{eff} , D _x , D ₉₀ , D ₁₅₀ (in)
۴	Jameson, 1997		SN _{eff} , D ₀ , D ₉₀ (micron)
۵	Schnoor and Horak, 2012		SN _{eff} , AUPP, SCI(in)

۵- توسعه مدل پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی

به منظور توسعه مدل پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی ابتدا ارتباط پارامترهای کاسه‌انحنا افت و خیز با عدد سازه‌ای موثر محاسبه شده با روش آشتو از طریق انجام تحلیل همبستگی^{۱۲} مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. در این جدول پارامترهایی که بر حسب میکرون می‌باشند به صورت غیرخطی و پارامترهای بدون بعد به صورت خطی با عدد سازه‌ای موثر روسازی ارتباط دارند. تنها پارامترهای AREA و D_{90}/D_0 با عدد سازه‌ای ارتباط مستقیم (افزایش این پارامترها حاکی از افزایش مقاومت و برابری روسازی بوده و سبب افزایش عدد سازه‌ای موثر می‌گردد) داشته و سایر پارامترها به صورت معکوس روی عدد سازه‌ای تاثیر گذارند. همانطور که ملاحظه می‌شود تمام پارامترهایی که به نحوی افت و خیز مرکزی در آنها مورد استفاده قرار گرفته، همبستگی بالایی با عدد سازه‌ای موثر روسازی نشان می‌دهند. آنچه مسلم است تغییرات کاسه انحنا افت و خیز روسازی در نزدیکی صفحه بارگذاری مطابق شکل ۱ زیاد بوده و پارامترهایی از کاسه انحنا که از افت و خیز ژئوفونهای ابتدایی دستگاه FWD استفاده می‌کنند بهتر می‌توانند تغییرات پاسخ سیستم روسازی در یک نقطه را نشان دهند.

در شکل ۲ نمودار تغییرات عدد سازه‌ای موثر روسازی (در محدوده ۲ الی ۹) در مقابل افت و خیز مرکزی روسازی و پارامتر D_{90}/D_0 ترسیم شده است. ارتباط غیر خطی افت و خیز مرکزی و همچنین ارتباط خطی پارامتر D_{90}/D_0 با عدد سازه‌ای موثر روسازی در این شکل نشان داده شده است. ارتباطی برخی از پارامترها مشخص می‌سازد که برای توسعه مدل با استفاده از این متغیرهای مستقل، بایستی رگرسیون غیر خطی مورد استفاده قرار گیرد.

اساس اندازه‌گیری شد. پس از آن با انطباق کیلومتر از داده‌های دو دستگاه FWD و GPR، ضخامت لایه‌های روسازی درست در زیر صفحه بارگذاری تعیین گردید. بنابراین ضخامت لایه‌های روسازی در هر نقطه بارگذاری شده با دستگاه FWD مشخص بوده و از این جهت خطایی در محاسبات وارد نمی‌گردد. در این تحقیق عدد سازه‌ای موثر روسازی ابتدا مطابق روش AASHTO93 با استفاده از افت و خیز و ضخامت لایه‌های روسازی محاسبه شده (AASHTO, 93) و مبنای مقایسه مدل‌ها موجود و توسعه مدل جدید قرار گرفته است. به منظور استفاده از داده‌ها در تحلیل آماری و استخراج مدل بایستی تحلیل اولیه بر روی داده‌ها صورت گرفته و محدوده تغییرات مجاز هر یک از آنها مشخص شده و داده‌های پرت از پایگاه داده حذف گردند. به منظور انجام تحلیل رگرسیونی و برآزش رابطه بین عدد سازه‌ای موثر روسازی با پارامترهای کاسه انحنا از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. پایگاه داده بطور تصادفی به دو بخش ۸۰ درصد و ۲۰ درصد تقسیم شد تا به ترتیب برای توسعه مدل و ارزیابی نتایج آن مورد استفاده قرار گیرد.

در جدول ۳ مدل‌ها موجود مبتنی بر پارامترهای کاسه انحنا افت و خیز روسازی با استفاده از پایگاه داده این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این جدول عدد سازه‌ای موثر حاصل از مدل‌ها موجود به صورت رگرسیون خطی با عدد سازه‌ای موثر حاصل از روش آشتو مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود روش Noureldin کمترین همبستگی و روش Jameson با ضریب تعیین ۰/۸۴ و مقدار شیب نزدیک به ۱ و عرض از مبدا کوچک بهترین همبستگی را با نتایج آشتو در پایگاه داده مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این تحقیق تلاش می‌گردد تا با شناخت پارامترهای کاسه انحنا، مدلی به منظور تعیین عدد سازه‌ای روسازی با ضریب تعیین بیشتر برای پایگاه داده مورد مطالعه ارائه گردد.

جدول ۳. ارزیابی مدل‌ها موجود در تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی

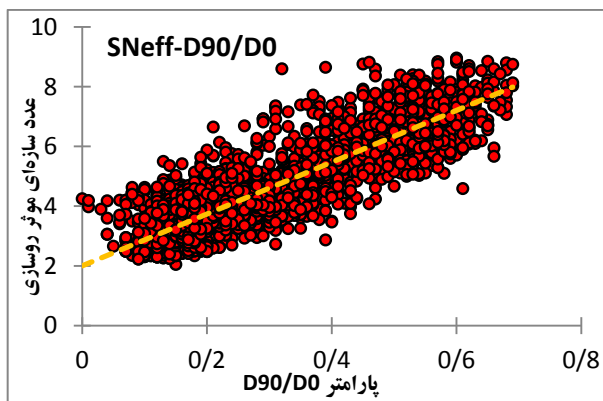
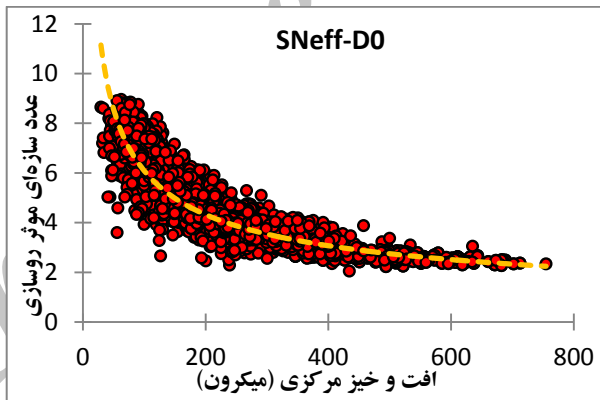
ردیف	محقق	شیب رگرسیون (a)	عرض از مبدا (b)	ضریب تعیین (R^2)
۱	Noureldin	-۰/۰۲۶	۵/۸۳	۰/۰۲
۲	Hoffman	۰/۵۴	۱/۳۳	۰/۷۸
۳	Cost	۰/۴۷	۱/۴۶	۰/۷۹
۴	Jameson	۱/۰۵	-۰/۵۵	۰/۸۴
۵	Horak	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۶۹

مدل ها ارایه شده در جدول ۵ با استفاده از ۸۰ درصد داده‌ها توسعه یافته‌اند لذا ارزیابی آنها در پیش‌بینی مقدار عدد سازه‌ای موثر روسازی در ۲۰ درصد داده‌ها نیز می‌تواند به انتخاب مدل کمک کند. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج پیش‌بینی مدل‌ها غیرخطی با توجه به ضرایب تعیین، بهتر از مدل‌ها خطی است. در بین مدل‌ها غیرخطی با توجه به ضریب تعیین، مدل‌ها ۲، ۳ و ۵ می‌توانند برای بررسی بیشتر انتخاب شوند. در بخش ۸۰ درصد داده‌ها مدل ۳ با توجه به ضریب تعیین و شیب رگرسیون بالاتر و همچنین مقدار عرض از مبدا کوچکتر بهترین مدل می‌باشد. در بخش ۲۰ درصد داده‌ها که در آن توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی مقادیر درست عدد سازه‌ای موثر روسازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد دو مدل ۳ و ۵ ضریب تعیین برابر (R²=۰/۹۰۶) و بیشتر از سایر مدل‌ها دارند. اما مدل ۵ با توجه به مقدار بیشتر شیب رگرسیون و مقدار کمتر عرض

در ادامه تحلیل رگرسیون خطی و غیر خطی با استفاده از پارامترهای مستقل ارایه شده در جدول ۴ بر روی داده‌ها انجام و ۶ مدل موجود در جدول ۵ ارایه گردید. از آنجایی که مقایسه مدل‌ها خطی و غیر خطی با یکدیگر دشوار می‌باشد لذا در این تحقیق مقدار پیش‌بینی شده عدد سازه‌ای در هر مدل با مقدار مشاهده شده عدد سازه‌ای (پارامتر وابسته در تحلیل رگرسیون) در مقابل یکدیگر ترسیم و رگرسیون خطی ساده تک پارامتری به شکل $y = ax + b$ در دو حالت ۸۰ و ۲۰ درصد داده‌ها بین آنها برقرار گردید. بدین ترتیب مدل‌ها از طریق مقایسه سه پارامتر ضریب تعیین، شیب رگرسیون (پارامتر a) و عرض از مبدا رگرسیون (پارامتر b) با یکدیگر قابل مقایسه خواهند بود. در حالت ایده‌آل یعنی انطباق کامل نقاط پیش‌بینی شده و نقاط مشاهده شده، مقدار ضریب تعیین و شیب رابطه بایستی برابر ۱ و عرض از مبدا رابطه بایستی برابر صفر باشد.

جدول ۴. ضریب همبستگی متغیرهای مستقل با SN_{eff}

پارامتر								
ضریب همبستگی	-۰/۸۲۵	-۰/۸۲	-۰/۷۷۲	-۰/۷۷۱	۰/۷۲۸	-۰/۸۴۷	۰/۸۵۷	-۰/۸۵۷
ارتباط با SN _{eff}	غیر خطی	غیر خطی	غیر خطی	غیر خطی	غیر خطی	غیر خطی	خطی	خطی



شکل ۲. نمودار تغییرات عدد سازه‌ای موثر روسازی با افت و خیز ژئوفون مرکزی (Dmax) و پارامتر D90/D0

می‌گردد. این مدل مبتنی بر پارامترهای کاسه انحنا افت و خیز روسازی شامل AUPP برحسب میلی‌متر، SCI بر حسب میکرون و نسبت افت و خیز مرکزی به افت و خیز در فاصله ۹۰ سانتیمتری از صفحه بارگذاری می‌باشد.

$$SN_{eff} = 28.875 AUPP^{-0.395} SCI^{0.043} + (2)$$

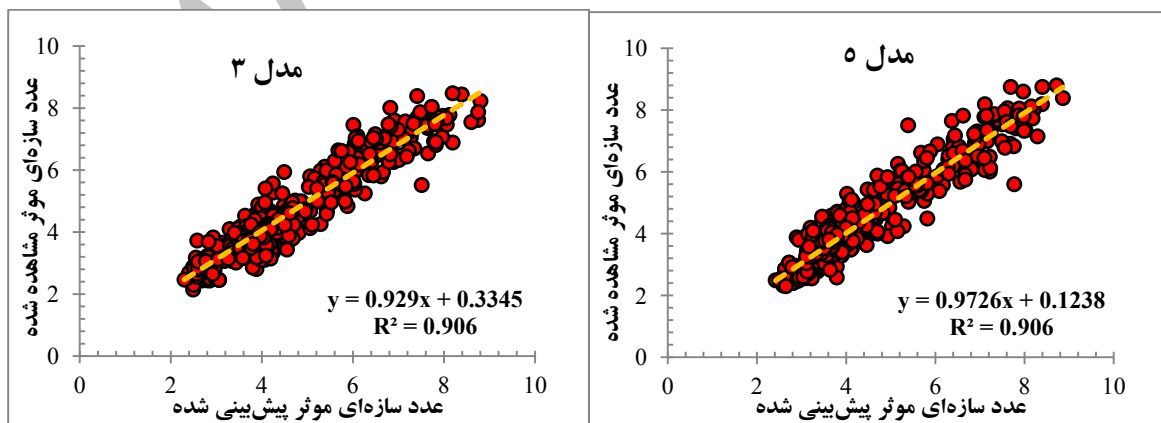
$$1.322 \frac{D_{90}}{D_0}$$

استفاده از این مدل باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه ارزیابی سازه‌ای روسازی در سطح شبکه به دلیل حذف برداشت با دستگاه GPR و تحلیل داده‌های آن جهت تعیین ضخامت لایه‌های روسازی و همچنین حذف مرحله محاسبات بازگشتی روش آشتو برای تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی می‌باشد.

از مبداء، مدل بهتری می‌باشد. در مدل ۵ سه پارامتر از کاسه انحنا افت و خیز روسازی که همبستگی بالایی با مقدار عدد سازه‌ای روسازی دارند مورد استفاده قرار گرفته است و از این حیث تغییرات کاسه انحنا افت و خیز روسازی در این مدل بهتر دیده می‌شود. این مدل مشابه مدل رگرسیونی Horak که در سال ۲۰۱۲ ارزیابی شده می‌باشد که ضرایب آن تغییر یافته و پارامتر $\frac{D_{90}}{D_0}$ به آن اضافه شده است. با توجه به توضیحات فوق مدل شماره ۵ به منظور تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی توصیه می‌گردد. در شکل ۳ نمودار مقادیر پیش‌بینی شده (حاصل از مدل) و مقادیر مشاهده شده (حاصل از روش آشتو) عدد سازه‌ای موثر در دو مدل ۳ و ۵ از جدول ۵ ارزیابی گردیده است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیق رابطه شماره ۲ به منظور تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی پیشنهاد

جدول ۵. روابط رگرسیون به دست آمده جهت تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی

شماره	مدل	نوع رگرسیون	۸۰ درصد داده‌ها			۲۰ درصد داده‌ها		
			b	a	R ²	b	a	R ²
۱	$e^{3.519 AUPP - 0.405 SCI} 0.04$	غیر خطی	۰/۸۹۱	۰/۸۸	۰/۵۶	۰/۹۳	۰/۹۰۱	
۲	$27.254 AUPP^{-0.353} + 1.33 \frac{D_{90}}{D_0}$	غیر خطی	۰/۸۹۴	۰/۸۸	۰/۵۳	۰/۹۴	۰/۹۰	
۳	$30.510 D_0^{-0.43} + 4.525 \frac{D_{90}}{D_0}$	غیر خطی	۰/۸۹۷	۰/۸۹	۰/۵۰	۰/۹۳	۰/۹۰۶	
۴	$1.910 \frac{(D_0 - D_{180})}{D_0} + 9.850 \frac{D_{90}}{D_0}$	خطی	۰/۷۲۴	۰/۷۳	۱/۲	۰/۷۸	۰/۷۴۲	
۵	$28.875 AUPP^{-0.395} SCI^{0.043} + 1.322 \frac{D_{90}}{D_0}$	غیر خطی	۰/۸۹۵	۰/۸۸	۰/۵۲	۰/۹۷	۰/۹۰۶	
۶	$2.008 \frac{(D_0 - D_{90})}{D_0} + 10.657 \frac{D_{90}}{D_0}$	خطی	۰/۷۳۱	۰/۷۲	۱/۲	۰/۷۶	۰/۷۴۷	



شکل ۳. نمودار تغییرات عدد سازه‌ای موثر پیش‌بینی شده بوسیله مدل ۳ و ۵ با مقادیر عدد سازه‌ای موثر مشاهده شده در روش

AASHTO93

از کارایی بالایی در پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی در سطح شبکه برخوردار است.
۶. نتایج این تحقیق برای تعیین عدد سازه‌ای موثر در روسازی انعطاف‌پذیر که دارای لایه آسفالتی بر روی لایه‌های اساس و زیر اساس می‌باشد توصیه می‌گردد و در توسعه مدل از بستر و لایه‌های دانه‌ای تثبیت شده استفاده نشده است.

۹- پی‌نوشت‌ها

- 1 - Pavement management system
- 2 - Preventative maintenance
- 3 - Routine maintenance
- 4 - Rehabilitation
- 5 - Reconstruction
- 6 - Ground Penetrating Radar
- 7 - Surface Curvature Index
- 8 - Base Damage Index
- 9 - Base Curvature Index
- 10 - Area under Pavement Profile
- 11 - Characteristic length
- 12 - Correlation

۱۰- مراجع

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (1993), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- Bryce, J. M., Flintsch, G. W., Katicha, S. W. and Diefenderfer, B. k. (2013) "Developing a network level structural capacity index for structural evaluation of pavements", Virginia Tech Transportation Institute, Report No. VCTIR 13-R9, March, 2013, pp. 9-13.
- Chang, J., Lin, J., Chung, W. and Chen, D. (2010) "Evaluating the structural strength of flexible pavements in Taiwan using the Falling Weight Deflectometer", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 3, Issue 3, pp. 131-141.
- COST 336—Falling Weight Deflect meter: Information Gathering Report, Task Group 2 FWD at Network Level. Final Draft Report. March 1998.
- Gedafa, D. S., Hossain, M., Miller, R. and Van, T. (2014) "Network-level flexible pavement structural evaluation", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 309-322.
- Hoffman, M. S. (2003) "Direct method for evaluating structural needs of flexible pavements with falling-weight deflectometer deflections", Transportation Research Record: Journal of

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف کاهش زمان برداشت میدانی و تحلیل داده‌ها و همچنین صرفه‌جویی در هزینه‌های برداشت اولیه در سطح شبکه (با حذف برداشت داده‌های ضخامت) اقدام به توسعه مدل رگرسیون تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی بر پایه پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز روسازی گردید. با انجام این تحقیق نتایج زیر حاصل گردید:

در بین مدل‌ها موجود تنها مدل Noureldin با توجه به فرضیات نتایج خوبی در پایگاه داده این تحقیق نداشته و ۴ مدل دیگر دارای ضریب تعیین بالای ۰/۶۹ می‌باشند که نشان دهنده پیش‌بینی نسبتاً خوب عدد سازه‌ای موثر روسازی با استفاده از این مدل‌هاست.

۱. در بین مدل‌های موجود تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی بدون اطلاع از ضخامت لایه‌ها مدل لگاریتمی Jameson با ضریب تعیین ۰/۸۴ در پایگاه داده این تحقیق دقیق‌ترین مدل ارزیابی گردید.

۲. پارامتر AUPP با ضریب همبستگی ۰/۸۵- و پارامتر D90/D0 با ضریب همبستگی ۰/۸۶ قوی‌ترین ارتباط را با عدد سازه‌ای موثر روسازی دارند. در محاسبه AUPP به دلیل استفاده از ۴ افت و خیز ابتدای کاسه انحناء، این پارامتر بهتر می‌تواند تغییرات پاسخ سیستم روسازی را برای تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی مشخص نماید.

۳. در آزمون همبستگی مشخص گردید، پارامترهایی از کاسه انحناء که در محاسبه آنها از افت و خیز مرکزی استفاده شده است، ارتباط قویتری با عدد سازه‌ای موثر روسازی نشان می‌دهند.

۴. در مدل نهایی پیش‌بینی عدد سازه‌ای موثر روسازی سه پارامتر AUPP، SCI و نسبت افت و خیز مرکزی به افت و خیز در فاصله ۹۰ سانتیمتری به صورت رگرسیون غیر خطی مورد استفاده قرار گرفتند.

۵. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های ارایه شده از ۳۰۰۰ داده دستگاه FWD به همراه ضخامت لایه‌ها در استان خوزستان استفاده شد که توسعه مدل با استفاده از ۸۰ درصد داده‌ها و آزمون مدلها با استفاده از ۲۰ درصد داده‌ها انجام شد. با ترسیم نمودار مقادیر مشاهده شده (روش آشتو) و مقادیر پیش‌بینی شده (مدل‌های پیشنهادی) مشخص گردید که مدل ۵ با ضریب تعیین ۰/۹۱ در داده‌های آزمون،

- calculation of layer moduli of flexible pavements", Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1384, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, pp. 23-28.
- Schnoor, H. and Horak, E. (2012) "Possible method of determining structural number for flexible pavements with the falling weight deflecto meter", Proceedings of the 31th Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, pp. 94-109.
 - Transportation Research Board, No. 1860, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, pp. 41-47.
 - Horak, E., Maina, J.W., van Wijk, I., Hefer, A., Jordaan, G., Olivier, P., de Bruin, P.W. (2009), "Revision of the South African Pavement Design Method", Draft Contract Report SANRAL/SAPDM/B-2/2009-01.
 - Jameson, G.W. (1997) "Use of FWD to program works based on HDM III; COST 336 workshop on FWD at Network Level", Lisbon, Portugal.
 - Noureldin, A. S. (1993) "New scenario for back

Archive of SID