

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

امیر کاووسی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مجتبی عباس قربانی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
فریدون مقدس‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران
آرمین بامداد زیکساری، کارشناس ارشد، مهندسین مشاور آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران، ایران

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۲۱

چکیده:

ارزیابی روسازی در سطح شبکه به منظور تعیین وضعیت کیفی روسازیه‌ها، تعیین نوع عملیات نگهداری (پیشگیرانه، بهسازی و یا بازسازی) و همچنین اولویت‌بندی بر اساس محدودیت بودجه انجام می‌شود. در این سطح از ارزیابی، داده‌های مورد استفاده، از جزییات و پوشش کمتری در سطح شبکه راه‌ها نسبت به ارزیابی در سطح پروژه برخوردار بوده و همچنین تحلیل‌های ساده‌تری روی آنها انجام می‌شود. وضعیت سازه‌ای روسازیهای آسفالتی در سطح شبکه معمولاً با استفاده از دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای (FWD) و تعیین پارامترهایی مانند مدول لایه‌ها و یا عدد سازه‌ای مؤثر روسازی (SN_{eff}) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تحلیل داده‌های افت و خیز، نیازمند اطلاع از ضخامت لایه‌های روسازی است که این کار می‌تواند با استفاده از دستگاه GPR و یا سونداژ و مغزه‌گیری از روسازی صورت گیرد. ساده‌سازی برداشت و تحلیل داده‌های حاصل از دستگاه FWD در سطح شبکه به منظور ارزیابی سریع شبکه راه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این تحقیق به منظور محاسبه عدد سازه‌ای مؤثر روسازی، ده روش مختلف در سه رده، از نظر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها، شامل "عدم اطلاع از ضخامت"، "اطلاع از ضخامت کل روسازی" و "اطلاع از ضخامت لایه‌های روسازی" مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور هفت قطعه از هفت محور در کشور (با شرایط متفاوت از نظر شاخص SN_{eff}) انتخاب و آزمایش FWD روی آنها انجام شد. پس از بکارگیری روش‌های مختلف و ارزیابی نتایج حاصل از آنها، روش Jameson (با ضریب همبستگی ۰/۷۱) در رده روش‌های بدون نیاز به اطلاع از ضخامت روسازی و روش Wimsatt (با ضریب همبستگی ۰/۹۲) در رده روش‌هایی که اطلاع از ضخامت کل روسازی در آنها لازم است به عنوان مناسب‌ترین روش‌ها شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: دستگاه FWD، عدد سازه‌ای، بهسازی روسازی، مدیریت روسازی

۱. مقدمه

داده‌های جمع آوری شده از روسازی معمولاً در دو سطح پروژه^۱ و شبکه^۲ مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در سطح شبکه تعداد محدودی از داده‌های روسازی برداشت می‌شود و نگاه کلان در بررسی روسازی مد نظر قرار می‌گیرد. اولویت‌بندی قطعات روسازی در ارزیابی سطح شبکه، امکان هزینه صحیح و بهینه منابع محدود مالی را فراهم می‌کند [Shahin, 2005]. 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. [Murphy and Zhang 2010] معمولاً از دستگاه FWD^۳ به منظور ارزیابی سازه‌ای روسازی استفاده می‌شود. با استفاده از این دستگاه می‌توان تنش ناشی از محور استاندارد (۲/۸ تن) را در زمان ۱۰ الی ۳۵ میلی ثانیه به روسازی وارد کرده و افت و خیز سطح روسازی را تا فاصله ۸/۱ متری با استفاده از ۷ یا ۹ حسگر اندازه‌گیری کرد.

همچنین با استفاده از این دستگاه می‌توان ۲۰۰ نقطه (۸ ساعت کاری و احتساب ۵/۱ دقیقه برای انجام بارگذاری در هر نقطه) را در یک روز کاری بارگذاری کرد که با در نظر گرفتن حداکثر فاصله برداشت بر اساس استاندارد ASTM D4695 در سطح شبکه (۵۰۰ متر) یک شاخه و یا قطعه ۱۰۰ کیلومتری، مورد ارزیابی سازه‌ای قرار می‌گیرد [FWD Manual, 2008]. وضعیت سازه‌ای روسازی آسفالتی در سطح شبکه معمولاً با استفاده از مدول لایه‌ها و یا عدد سازه‌ای مؤثر روسازی^۴ (SN_{eff}) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. [Shekharan, Chowdhury and Dief-enderfer, 2009] در صورتی که با بکارگیری روشهای مناسب استفاده از ضخامت لایه‌های روسازی در ارزیابی سازه‌ای روسازی حذف شود صرفه‌جویی زیادی در هزینه و زمان برداشت میدانی و تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد.

۲. تحلیل داده‌های FWD در سطح شبکه

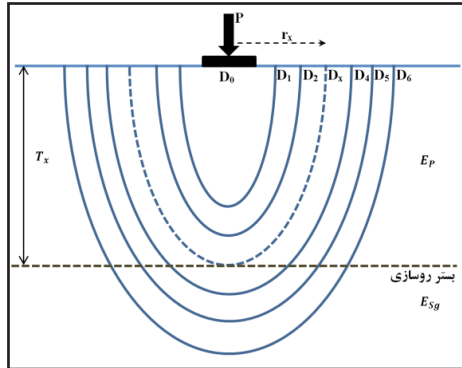
برداشت میدانی با دستگاه FWD در مقایسه با دیگر تجهیزات غیرمخرب ارزیابی روسازی زمان‌بر و همراه با اختلال در ترافیک بوده و همچنین برای تحلیل داده‌های آن نیاز به اطلاع دقیق از ضخامت لایه‌های روسازی است. ضخامت لایه‌ها یا به صورت غیرمخرب با استفاده از دستگاه GPR^۵ و یا به صورت مخرب با استفاده از مغزه‌گیری و سونداژ اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه GPR با استفاده از امواج الکترومغناطیس، پروفیل ضخامت کل لایه آسفالتی و مجموع لایه‌های اساس و زیر اساس را اندازه‌گیری می‌کند، اما برداشت داده‌ها و بخصوص تحلیل نتایج آن زمان‌بر و پیچیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ارزیابی سازه‌ای روسازی در مقایسه با دیگر انواع ارزیابی (وضعیت خرابیها و ناهمواری و ...) زمان‌بر، پرهزینه و پیچیده است. از طرفی در ارزیابی سطح شبکه نیاز به بررسی دقیق و برداشت داده‌ها با جزئیات زیاد نیست و این کار بایستی بعد از اولویت‌بندی قطعات بر اساس محدودیت بودجه در سطح پروژه روی قطعات برگزیده انجام شود. [Diefenderfer, 2008] بنابراین ساده‌سازی برداشت و تحلیل داده‌های دستگاه FWD در سطح شبکه به منظور ارزیابی سریع شبکه راه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی سازه‌ای روسازی، عدد سازه‌ای مؤثر (SN_{eff}) است که از نتایج آزمایش راه انجمن آشتو است. در راهنمای طرح روسازی آشتو دو روش برای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازیهای موجود معرفی شده است که به ترتیب روش ارزیابی لایه‌های روسازی موجود و روش غیرمخرب با استفاده از داده‌های دستگاه FWD است. در روش غیرمخرب سیستم روسازی دولایه‌ای (روسازی و بستر) فرض شده و عدد سازه‌ای مؤثر بر حسب اینچ با استفاده از ضخامت کل روسازی (in) و مدول مؤثر کل ضخامت روسازی (psi) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

SN_{eff} - عدد سازه‌ای مؤثر روسازی بر حسب اینچ

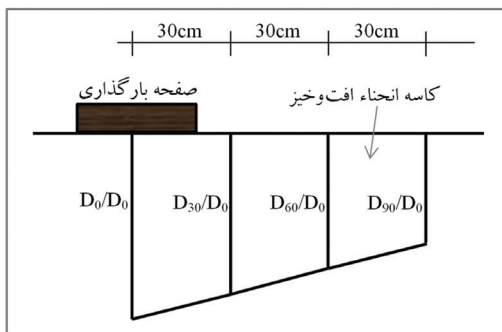
r_x - فاصله از مرکز بارگذاری (اینچ)

D_x - افت و خیز روسازی در فاصله (اینچ)



شکل ۱. افت و خیز ناشی از بارگذاری با دستگاه FWD در سیستم روسازی

دومین روش مربوط به تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی بدون نیاز به اطلاع از ضخامت با استفاده از پارامتر AREA ارایه شده است. افت و خیزهای مورد استفاده در تعیین این پارامتر در شکل ۲ نشان داده شده است. این پارامتر سطح زیر منحنی افت و خیز روسازی تا فاصله ۹۰ سانتیمتر است که با تقسیم به افت و خیز مرکزی نرمال‌سازی می‌شود، بنابراین بر خلاف معنی لغوی این پارامتر به دلیل تقسیم بر افت و خیز مرکزی واحد آن بر حسب واحد طول است. در این روش روسازی به صورت یک دال با سختی و طول مشخصه (طولی از دال که تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد) مدل می‌شود. [Hoffman, 2003] پارامتر AREA و طول مشخصه روسازی به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌گردند.



شکل ۲. افت و خیزهای مورد استفاده در محاسبه پارامتر AREA

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

روشهای متفاوتی برای تفسیر داده‌های دستگاه FWD و تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در سطح شبکه ارایه شده که می‌توان آنها را بر اساس نیاز به ضخامت لایه‌ها، در سه گروه زیر رده‌بندی کرد [Crook, Montgomery and Guthrie, 2012].

۱) ارزیابی سازه‌ای بدون اطلاع از ضخامت روسازی

۲) ارزیابی سازه‌ای با اطلاع از کل ضخامت روسازی

۳) ارزیابی سازه‌ای با اطلاع از ضخامت لایه‌های روسازی

هدف از این تحقیق مقایسه روشهای مختلف در تعیین سریع عدد سازه‌ای مؤثر روسازی به منظور انتخاب در ارزیابی سطح شبکه است. به این منظور روشهای مختلف در هر گروه مورد بررسی قرار گرفته و مناسب‌ترین روش به منظور ارزیابی سازه‌ای روسازی در سطح شبکه توصیه می‌شود.

۱-۲ ارزیابی سازه‌ای بدون اطلاع از ضخامت روسازی

در صورت عدم اطلاع از ضخامت لایه‌ها برای ارزیابی سازه‌ای روسازی روشهای مختلفی توسط محققین ارایه شده است که در ادامه تشریح می‌شود. در این راستا تحقیقی که اساس آن رابطه (۲) است به منظور تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی ارایه شده است. در این روش فرض می‌شود که یک افت و خیز (D_x) در فاصله x از صفحه بارگذاری وجود دارد که مقدار آن معادل افت و خیز در زیر صفحه بارگذاری و روی بستر است (شکل ۱). حداکثر مقدار حاصل ضرب برای ژئوفونهای دستگاه FWD از ۱ الی ۶ که در شکل ۱ نشان داده شده است افت و خیز بستر روسازی را تعیین می‌کند. پس از یافتن افت و خیز بستر روسازی با استفاده از رابطه ۲ مقدار عدد سازه‌ای مؤثر روسازی موجود (زمان ارزیابی) محاسبه می‌شود [Noureldin, 1993].

$$SN_{eff} = \frac{(4r_x^2 - 36)^{1/2}}{17.234(r_x \times D_x)^{1/3}} \quad (2)$$

موسسه COST در اروپا [COST, 1998] و دیگری که یک رابطه لگاریتمی است در استرالیا توسعه یافته است [Jameson, 1997]. عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در روشهای COST و Jameson بر اساس افت و خیز روسازی در زیر صفحه بارگذاری و افت و خیز در فواصل ۹۰ سانتیمتری به ترتیب با استفاده از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شود.

$$SN_{eff} = 1.69 + \left(\frac{842.8}{D_{0,corr} - D_{60}} \right) - \left(\frac{42.94}{D_{36}} \right) \quad (8)$$

$$SN_{eff} = 13.5 - 6.5 \times \log D_0 + 3.7 \times \log D_{36} \quad (9)$$

$D_{0,corr}$ - افت و خیز مرکزی دستگاه FWD که برای بار محور استاندارد ۸/۲ تنی نرمال و نسبت به دما اصلاح شده است.

D_x - افت و خیز روسازی در فاصله X (بر حسب اینچ) از مرکز صفحه بارگذاری بر حسب میکرون

در تحقیقی دیگر با استفاده از پارامترهای کاسه انحنا افت و خیز^۲ روسازی شامل AUPP^v و SCI^۱ یک رابطه رگرسیون غیر خطی به منظور تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی ارائه شده است [Schnoor and Horak, 2012]. نحوه محاسبه پارامترهای AUPP و SCI در روابط شماره ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

$$SN_{eff} = e^{5.12 AUPP - 0.78 SCI} \quad (10)$$

$$SCI = D_0 - D_8 \quad (11)$$

$$AUPP = \left(\frac{5D_0 - 2D_{12} - 2D_{24} - D_{36}}{2} \right) \quad (12)$$

AUPP - شاخص ارزیابی سازه‌ای روسازی بر حسب میلیمتر
SCI - شاخص ارزیابی سازه‌ای لایه رویه بر حسب میکرون
 D_x - افت و خیز روسازی در فاصله X (بر حسب اینچ) از مرکز صفحه بارگذاری بر حسب میکرون

۲-۲ ارزیابی سازه‌ای با اطلاع از ضخامت کل روسازی

در برخی از پروژه‌ها ضخامت کل سازه روسازی از روی بستر معلوم است در این حالت سه روش برای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر

$$AREA = 6 \left(1 + 2 \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right) \quad (3)$$

$$l_0 = A \cdot e^{B \times AREA} \quad (4)$$

AREA - پارامتر AREA از کاسه انحنا افت و خیز روسازی (اینچ)
 D_x - افت و خیز روسازی در فاصله X (سانتیمتر) از مرکز صفحه بارگذاری به میکرون

l_0 - طول مشخصه (سانتیمتر)

A و B - ضرایب رابطه حاصل از جدول ۱

جدول ۱. ضرایب مدل Hoffman

n	m	B	A	h/l_0	Area (in)
-۰/۸۵۹۵	۹۲۶/۹	۰/۱۰۳۹	۳/۲۷۵	۵	$23 \leq Area$
-۰/۸۷۸۲	۱۱۵۲/۱	۰/۰۹۴۸	۳/۶۹۱	۱۰	$21 \leq Area < 23$
-۰/۸۸۶۷	۱۲۷۷/۶	۰/۱۰۴۴	۲/۸	۲۰	$19 \leq Area < 21$
-۰/۸۹۴۵	۱۳۴۴/۲	۰/۱۰۹۶	۲/۳۷۱	۴۰	$Area < 19$

در جدول (۱) پارامتر h عمق بستر سنگی بر حسب سانتیمتر است که در تعیین ضرایب مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از تعیین طول مشخصه مدول الاستیسیته بستر و عدد سازه‌ای مؤثر روسازی با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$E_{sg} = m \times \frac{P}{D_0} \times l_0^m \quad (5)$$

$$SN_{eff} = 0.0182 l_0 \times \sqrt[3]{E_{sg}} \quad (6)$$

E_{sg} - مدول بستر روسازی بر حسب MPa

P - تنش ناشی از بارگذاری بر حسب kPa

D_0 - افت و خیز مرکزی دستگاه FWD بر حسب میکرون

به دلیل اینکه در روش Hoffman تحلیل نتایج با فرض دال نازک روسازی روی پی الاستیک با عمق بینهایت و یا محدود (بستر سنگی) انجام شده است، توصیه شده که اصلاح عدد سازه‌ای مؤثر با استفاده از رابطه ۷ صورت گیرد.

$$SN_{eff,corrected} = 2SN_{eff} - 0.5 \quad (7)$$

دو روش دیگر به منظور محاسبه عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در غیاب اطلاع از ضخامت روسازی ارائه شده است که اولی توسط

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

میکرون

SIP - شاخص سازه‌ای روسازی بر حسب میکرون

H_p - ضخامت کل روسازی بر حسب میلیمتر

K_1 - مقدار ۴۷۲۸/۰ برای بتن آسفالتی و ۰/۱۱۶۵ برای آسفالت سطحی^{۱۰}

K_2 - مقدار ۴۸۱۰/۰ برای بتن آسفالتی و ۳۲۴۸/۰ - برای

آسفالت سطحی

K_3 - مقدار ۷۵۸۱/۰ برای بتن آسفالتی و ۸۲۴۱/۰ برای آسفالت

سطحی

روش دوم در استفاده از ضخامت کل روسازی مربوط به موسسه آشتو است که به طور گسترده به منظور ارایه طرح بهسازی با استفاده از داده‌های افت و خیز دستگاه FWD به کار می‌رود. در این روش عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در یک سیستم دو لایه‌ای و پس از انجام محاسبات بازگشتی با استفاده از ضخامت کل روسازی و مدول مؤثر کل لایه‌ها محاسبه می‌شود [AASHTO, 1993].

$$SN_{eff} = 0.0045D \cdot \sqrt[3]{E_p} \quad (15)$$

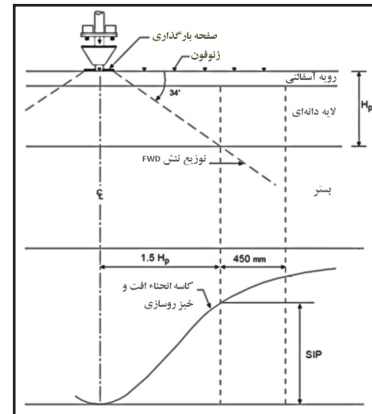
SN_{eff} - عدد سازه‌ای مؤثر روسازی

D - ضخامت کل لایه‌های روسازی روی بستر بر حسب اینچ

E_p - مدول مؤثر کل لایه‌های روسازی روی بستر بر حسب psi

همچنین تحقیقی دیگر در سال ۱۹۹۹ روشی را برای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی بر اساس ارزیابی مدول کل لایه‌های روسازی در مقایسه با مدول بستر روسازی با استفاده از نسبت $\frac{D_7}{D_1}$ ارایه کرد [Wimsatt, 1998]. افت و خیز در زیر صفحه بارگذاری سختی روسازی و بستر آن را مشخص کرده و افت و خیز در فاصله ۱۸۰ سانتیمتری از صفحه بارگذاری سختی بستر روسازی را تعیین می‌کند. مدول بستر روسازی با استفاده از اصلاح رابطه آشتو (رابطه ۱۶) محاسبه می‌شود. همچنین نسبت

روسازی مورد بررسی قرار گرفت. در روش اول عدد سازه‌ای مؤثر روسازی با استفاده از شاخص سازه‌ای روسازی^۹ (SIP) و ضخامت کل روسازی تعیین می‌شود. پارامتر SIP اختلاف افت و خیز روسازی در مرکز بارگذاری و افت و خیز در فاصله شعاعی معادل یک و نیم برابر ضخامت روسازی است. [Rohde, 1994]



شکل ۳. توزیع تنش و کاسه انحنای افت و خیز ناشی از بارگذاری با دستگاه FWD [Rohde, 1994]

این ایده از نظریه Irwin برداشت شده که طی آن افت و خیز بستر روسازی برابر افت و خیز سطحی در فاصله یک و نیم برابری ضخامت کل روسازی است. در این نظریه فرض می‌شود که ۹۵ درصد از افت و خیز در سطح روسازی زیر خط توزیع تنش با زاویه ۳۴ درجه از سطح روسازی اتفاق می‌افتد. [Irwin, 1983] در شکل ۳ شاخص سازه‌ای روسازی، ضخامت کل لایه‌های روسازی تا روی بستر و همچنین فرضیات نظریه Irwin ارایه شده است. شاخص سازه‌ای روسازی و مقدار SN مؤثر با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$SIP = D_0 - D_{1.5H_p} \quad (13)$$

$$SN = k_1 \cdot SIP^{k_2} \cdot H_p^{k_3} \quad (14)$$

در این روابط:

D_0 - افت و خیز مرکزی دستگاه FWD در اثر بار وارده ۴۰۰۰۰ نیوتنی بر حسب میکرون

$D_{1.5H_p}$ - افت و خیز در فاصله از مرکز بارگذاری بر حسب

خواهد شد. سپس مدولی که ضخامت محاسباتی متناظر با آن (حاصل از رابطه ۲۱) معادل ضخامت واقعی روسازی است، برای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی با استفاده از رابطه ۲۲ انتخاب می‌شود.

$$SN_{eff} = \sqrt[3]{\frac{E_p}{11 \times 10^6}} \times T_x \quad (22)$$

۲-۳ ارزیابی سازه‌ای با اطلاع از ضخامت لایه‌های روسازی

اگر ضخامت لایه‌های روسازی شامل آسفالت، اساس و زیراساس معلوم باشد می‌توان مدول لایه‌های روسازی را با استفاده از نرم‌افزارهای محاسبات بازگشتی مانند [Huang, 2004]، [WESDEF [Huang, 2004]، [UI-، [ELMOD¹¹ [litz, 1998] و [BAKFAA [FAA, 2008] محاسبه کرد. این نرم‌افزارها بر اساس تئوری چند لایه‌ای الاستیک خطی و با فرضیاتی نظیر بارگذاری استاتیکی، لایه‌های همگن و پیوسته در امتداد طولی محور روسازی و رفتار الاستیک خطی مصالح روسازی، مدول لایه‌ها را محاسبه می‌کنند. هنگامی که مدول لایه‌های روسازی محاسبه شد، می‌توان ضرایب قشر لایه‌های روسازی را با استفاده از روابط ۲۳ الی ۲۵ به ترتیب برای لایه آسفالتی، لایه اساس و لایه زیر اساس تعیین کرد. پس از تعیین ضرایب قشر لایه‌ها با استفاده از رابطه ۲۶ عدد سازه‌ای مؤثر روسازی محاسبه می‌شود.

$$a_1 = 0.4 \log\left(\frac{E_A}{3000MPa}\right) + 0.44 \quad 0.2 < a_1 < 0.44 \quad (23)$$

$$a_2 = 0.249(\log E_B) - 0.997 \quad (24)$$

$$a_3 = 0.227(\log E_S) - 0.839 \quad (25)$$

$$SN_{eff} = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (26)$$

در این روابط:

a_x - ضریب قشر لایه آسفالتی (۱)، لایه اساس (۲) و لایه زیر

اساس (۳)

E_x - مدول الاستیسیته لایه آسفالتی (A)، لایه اساس (B) و زیر

مدول روسازی به بستر با استفاده از رابطه رگرسیون (رابطه ۱۷) محاسبه می‌شود.

$$E_{subgrade} = \frac{0.24 \times P}{D_7 \times 72} \quad (16)$$

$$\frac{E_p}{E_{subgrad}} = 516.94 \left(\frac{D_7}{D_1}\right)^5 - 214.46 \left(\frac{D_7}{D_1}\right)^2 + 159.56 \left(\frac{D_7}{D_1}\right)^3 - 6.143 \left(\frac{D_7}{D_1}\right) + 1.0826 \left(\frac{D_7}{D_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

در این روابط:

$E_{subgrad}$ - مدول برجهندگی بستر روسازی بر حسب psi

P - بار وارده بر حسب lb

D_7 - افت و خیز روسازی در فاصله ۱۸۰ سانتیمتری بر حسب in

D_1 - افت و خیز روسازی زیر صفحه بارگذاری بر حسب in

$\frac{E_p}{E_{subgrad}}$ - نسبت مدول روسازی به مدول بستر است.

با استفاده از رابطه (۱۸) مدول مؤثر کل لایه‌های روسازی و سپس به کمک رابطه ۱۹ عدد سازه‌ای مؤثر روسازی تعیین می‌شود.

$$E_p = \left(\frac{E_p}{E_{subgrad}}\right) \times (E_{subgrade}) \quad (18)$$

$$SN_{eff} = 0.0045 D \cdot \sqrt[3]{E_p} \quad (19)$$

در تحقیقی دیگر فرض می‌شود که موقعیت واحدی در سطح روسازی با فاصله شعاعی وجود دارد که افت و خیز آن معادل افت و خیز روی بستر روسازی، درست در زیر صفحه بارگذاری است. در صورت تعیین افت و خیز بستر روسازی مطابق شکل ۱ مدول مؤثر کل لایه‌ها، ضخامت مؤثر روسازی با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شود [Noureldin, 1993]. این روابط بر اساس روش دو لایه‌ای برمیستر و اصلاحات ادمارک برای ضخامت لایه‌ها، توسعه یافته و برای تمام زوجهای r_x و D_x (بر حسب اینچ) محاسبه می‌شود.

$$E_p = \frac{716 - \frac{2149}{r_x}}{D_0 - D_x} \quad (20)$$

$$T_x = \left[\frac{D_0 - D_x}{D_x \left(\frac{r_x}{3} - 1\right)}\right]^{1/3} \times (4r_x^2 - 36)^{1/2} \quad (21)$$

در این حالت ۶ ضخامت و ۶ مدول مؤثر متناظر با آنها تعیین

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

اساس (S) بر حسب psi

SN_{eff} - عدد سازه‌ای مؤثر روسازی

m_x - ضریب زهکشی لایه‌های اساس (۱) و زیر اساس (۲)

D_x - ضخامت لایه آسفالتی (۱)، لایه اساس (۲) و لایه زیر اساس

(۳) بر حسب اینچ

در این تحقیق، از نرم‌افزار ELMOD به منظور انجام محاسبات بازگشتی و تعیین مدول لایه‌ها استفاده شد. در این نرم‌افزار، روسازی به عنوان یک سیستم سه لایه‌ای تعریف می‌شود که در آن کل ضخامت لایه‌های آسفالتی به عنوان لایه اول، مجموع ضخامت لایه‌های اساس و زیر اساس به عنوان لایه دوم و بستر نیز با ضخامت نامحدود به عنوان لایه سوم معرفی می‌شود. از طرف دیگر دستگاه GPR نیز قادر به تفکیک لایه اساس و زیراساس دانه‌ای با دقت زیاد نبوده و تحلیل داده‌های حاصل از این دستگاه در غالب موارد منتج به ضخامت کل لایه‌های آسفالتی و مجموع ضخامت لایه‌های اساس و زیر اساس می‌شود. در این روش ضریب قشر لایه‌های آسفالتی با توجه به مدول الاستیسیته از رابطه ۲۳ و ضرایب قشر برای مجموع لایه اساس و زیراساس با استفاده از میانگین ضرایب قشر حاصل از روابط ۲۴ و ۲۵ تعیین می‌شود.

در آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران روشی تحت عنوان "ارزیابی لایه‌های روسازی موجود" در بخش بهسازی ارایه شده است که به طور گسترده توسط مهندسان مشاور مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش از راهنمای طراحی روسازی آشتو در نشریه ۲۳۴ گنجانده شده است. بنابراین بررسی این روش و ارزیابی نتایج حاصل آن تحت عنوان روش Visual با وجود عدم استفاده از داده‌های افت و خیز دستگاه FWD در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. در این روش ضریب قشر با توجه به خرابی‌های سطح روسازی برای لایه آسفالتی و تغییرات دانه‌بندی برای لایه‌های دانه‌ای تعیین می‌شود که در هیچ موردی ضریب قشر

لایه آسفالتی نباید بزرگ تر از ۰/۳۵ انتخاب شود.

۳. مطالعه موردی و مقایسه روشها

در این تحقیق روشهای تشریح شده فوق الذکر (Noureldin-Rohde, Horak, COST, Jameson, Hoffman, in Vi-ELMOD5, Wimsatt, AASHTO, Noureldin_T) به منظور محاسبه عدد سازه‌ای مؤثر روسازی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در پنج روش اول بدون داشتن ضخامت روسازی، چهار روش بعدی با داشتن ضخامت کل روسازی و دو روش آخر با در اختیار داشتن ضخامت یک لایه‌های روسازی، عدد سازه‌ای مؤثر روسازی محاسبه شد. به منظور مقایسه روشهای تشریح شده از داده‌های برداشت شده دستگاه‌های FWD و GPR در چند استان کشور به ترتیب برای ارزیابی سازه‌ای و تعیین ضخامت لایه‌های روسازی استفاده شد. از آنجا که تمام تحلیل‌ها به طور مجزا در هر نقطه بارگذاری شده با دستگاه FWD انجام می‌شود، بنابراین به منظور پوشش حد پایین و حد بالای عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در محاسبات، نقاط دارای افت و خیز و ضخامت متفاوت در شبکه راههای کشور انتخاب شد. از طریق تطابق کیلومترها در دو دستگاه FWD و GPR ضخامت لایه‌ها درست در زیر صفحه بارگذاری دستگاه FWD استخراج شد تا دقیق‌ترین جواب از تحلیل داده‌های افت و خیز حاصل شود. همچنین اصلاح دمای افت و خیز مرکزی دستگاه FWD در تمام نقاط با استفاده از کردار مندرج در راهنمای آشتو در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد تا ورودی افت و خیز در روشهای مختلف یکسان شود.

۴. تحلیل و مقایسه روشها

در جدول ۲ نتایج حاصل از روشهای مختلف در تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی به همراه مقدار ضخامت لایه آسفالتی،

جدول ۲. داده‌های منتخب برای ارزیابی روشهای مختلف در تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی

AASHTO		Noureldin	Noureldin_I	Hoffman	Horak	Jameson	COST	Robde	Wimsatt	ELMOD	D ₀ micron	ضخامت لایه		قطعه	محور
Visual	NDT											داده‌های mm	آسفالتی mm		
1/6	2/3	10/8	2/6	2	5/4	3/4	3/8	2/8	2/5	3/3	288	235	70	1	چابهار- نیکشهر (سیستان و بلوچستان)
1/6	2/6	13/7	3/1	2/3	6/6	3/5	6/5	3/5	2/9	4	184	255	60	2	
1/7	3/1	12/2	3/5	3/2	7/1	6/3	5/5	4	3/2	6/1	171	251	71	3	
1/9	3/4	19/1	4	2/3	7/6	2/9	2/7	6/4	3/4	5	128	305	71	4	
2/1	6/1	18/3	6/7	3	9	4	5/8	5/3	3/8	5/3	94	296	88	5	
2/1	6/7	18/3	5/3	3/5	10/5	6/8	9/1	6/3	6/9	5/8	71	306	90	6	
3/3	3/6	8/7	3/5	3/7	5/1	3/7	3/5	3/5	3/1	6/3	374	289	177	7	میاندشت- عباس‌آباد (سمنان)
3/5	6/2	9/2	6/1	6/5	6/3	6/6	6/7	6/3	4	5/3	250	264	203	8	
3/2	4	10/2	3/9	6/2	6/1	6/1	6/3	6/1	3/5	5/6	250	283	171	9	
3/2	3/3	8/3	3/2	3/5	6/5	3/4	3/2	3/1	2/9	6/1	450	279	172	10	
3/2	3	9/1	2/9	2/6	6/2	2/7	2/8	2/8	2/6	3/6	494	245	186	11	
3/9	5	9/2	6/1	6/6	6/1	6/7	6/7	6/4	3/6	6/8	242	198	255	12	
2/5	3/6	16/2	3/5	2/7	6	2/8	3/2	3/8	3/1	6/1	222	313	104	13	دامغان- چشمه علی (سمنان)
2/7	6/1	13/5	3/9	2/8	6/1	3/1	3/6	6/1	3/5	6/9	215	354	109	14	
2/5	6/5	12/7	6/4	6/1	8/5	5	7/2	5/4	6/5	6/1	125	309	104	15	
2/5	6/2	12/7	4	4	8/3	6/9	7/1	5/1	6/2	5/9	127	273	115	16	
2/4	3/1	8/2	3	6/4	5/4	6/2	3/9	3/4	3	6/3	345	268	113	17	
2/4	3	9/3	2/8	3/7	5/1	3/6	3/6	3/2	2/6	4	343	260	114	18	
3/4	6/4	9/7	6/2	3/8	5/7	3/9	4	6/2	6/3	5/5	290	445	118	19	قم- کرسار (قم- تهران سمنان)
3/9	5/2	9/4	6/9	5/2	7	6/9	5/3	5/2	5	6/3	216	406	160	20	
3/9	6/7	9/2	6/4	3/9	6/2	6/4	6/4	6/6	6/5	6/9	263	398	163	21	
3/8	6/1	9/6	4	2/8	5/3	3/6	3/6	3/9	6/1	5/6	331	407	155	22	
3/6	6/6	9/8	6/4	6/1	6/2	6/3	6/6	6/6	6/6	6	243	405	144	23	
3/6	6/9	9/8	6/6	5	6/6	6/6	6/9	6/9	6/7	5/3	223	414	141	24	
2/5	3/2	11/2	3/7	3/2	6/5	6/2	6/9	3/8	3/3	3/3	207	243	107	25	سیرجان- شهریارک (کرمان)
2/5	3	10/9	3/5	3	5/8	3/7	6/1	3/4	2/7	3/2	253	229	110	26	
2/5	2/6	9/6	2/4	3/1	6/2	2/6	2/8	2/7	2/2	2/6	469	243	110	27	
2/5	3/5	10/5	3/2	6/7	6/8	6/6	5/5	6/2	3/4	3/7	197	241	108	28	
2/5	3/1	10/8	2/9	3/2	5/9	3/8	6/2	3/6	3	3/2	250	239	113	29	
2/5	2/7	10/2	2/3	2/8	6/6	2/9	3/1	2/9	2/5	2/7	384	245	107	30	
3/5	6	8/6	6/7	7/9	11/2	6/5	9/6	7/3	6/4	7/1	144	262	202	31	آبادان- دارخوین (خوزستان)
3/5	5/1	8/4	6/3	6/5	9/4	5/8	7	6/2	5/5	6/4	190	261	201	32	
3/5	5/2	8/2	6/3	7/5	9/2	5/9	7/1	6/1	5/4	5/7	190	264	200	33	
3/5	6/1	8/4	6/7	9/8	11/5	6/5	9/6	7/6	6/3	6/2	146	264	201	34	
3/4	6/2	8/1	3/8	6/1	7/1	5	5	6/7	6/4	6/8	269	261	200	35	
3/4	4	8/4	3/7	4	6/5	6/7	6/8	6/2	6/4	6/1	277	260	199	36	
3/1	6/1	8/4	3/8	6/9	8/1	5/7	6/6	5	6/1	5/3	197	201	161	37	اهواز- شوش (خوزستان)
3/6	3/8	8/8	3/7	6/4	6/1	6/5	6/5	4	3/8	5/4	276	252	187	38	
3/8	5/8	11	5/2	7/1	10/1	6/1	10/4	6/9	6/3	5/8	107	277	189	39	
3/9	5/8	9/4	5/1	7/4	8/8	5/8	7/5	6/4	5/9	6/7	155	341	184	40	
3/5	6/3	9/3	6/1	6/8	6/5	6/6	5	6/5	6/6	5	242	346	151	41	
3/7	6/2	9/5	5/5	8/1	9/6	6/1	8/7	7/1	6/8	6/4	137	387	154	42	

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

مجموع ضخامت لایه اساس و زیر اساس و افت و خیز مرکزی دستگاه FWD ارایه شده است.

در ستون آخر جدول (۲)، نتایج روش ارزیابی لایه‌های روسازی موجود با عنوان Visual ارایه شده است. ضریب قشر لایه‌های اساس و زیراساس برابر ۰/۱ و ضریب قشر لایه آسفالتی با توجه به خرابی‌های موجود در سطح روسازی برابر ۰/۲۵ در محور چابهار- نیکشهر، ۰/۳ در محورهای میاندشت- عباس آباد، دامغان- چشمه علی و دارخوین- آبادان و ۰/۳۵ در محورهای قم- گرمسار و سیرجان- شهربابک استفاده شده است. در جدول (۲)، دو روش با نام Noureldin وجود دارد که پسوند T در یکی از آنها نشان دهنده استفاده از ضخامت کل لایه‌های روسازی (رابطه ۲۲) در تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی است. به منظور ارزیابی روش‌های بایستی یک روش به عنوان مبنای تحلیل آماری انتخاب شده و سایر روش‌ها با آن مقایسه شوند.

۴-۱ انتخاب روش مبنای به منظور مقایسه مدلها

برای انجام مقایسه بین روش‌های مختلف از میان روش ELMOD به دلیل استفاده از ضخامت یک لایه‌ها و دو روش NDT و روش Visual در راهنمای AASHTO یک روش بایستی مبنای مقایسه قرار گیرد.

به طور کلی پارامتر تنها از دو روش مندرج در راهنمای آشتو محاسبه می‌شود که یکی بر اساس داده‌های افت و خیز و دیگری بر اساس وضعیت لایه‌های روسازی موجود است. در شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از روش ELMOD و Visual در مقایسه با روش NDT در ۴۲ قطعه انتخابی ارایه شده است.

در کردارهای شکل ۴ و کردارهایی که در ادامه تحقیق ارایه شده است، خط منقطع نشان‌دهنده کردار $y=x$ است که به میزان انحراف داده‌ها از آن نتایج یک روش بزرگ تر از روش دیگر خواهد بود. همچنین رابطه رگرسیون خطی و ضریب همبستگی دو روش مندرج در کردار با ترسیم خط رگرسیون ارایه شده که

در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روش Visual بر اساس ضخامت لایه‌ها و خرابیهای سطحی مقدار عدد سازه‌ای مؤثر روسازی محاسبه می‌شود. اما از آنجا که مقدار ضرایب قشر و زهکشی در غالب موارد برای طول زیادی از راه ثابت فرض می‌شود، بنابراین ضخامت لایه‌ها تنها متغیر این روش خواهد بود. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در روش Visual بین ۶/۱ تا ۹/۳ است، در حالی که این محدوده در روش NDT بین ۲/۳ و ۶/۲ است.

همچنین نتایج عدد سازه‌ای در روش NDT بزرگ تر از روش Visual بوده و ضریب تعیین (R^2) کوچکی (۰/۴۹) بین دو روش وجود دارد. بنابراین روش Visual نمی‌تواند مبنای مقایسه روش‌های مختلف قرار گیرد.

در شکل ۴ مقایسه عدد سازه‌ای مؤثر روسازی حاصل از نرم‌افزار ELMOD و روش NDT آشتو ترسیم شده است. هر دو روش از داده‌های افت و خیز دستگاه FWD به منظور محاسبه عدد سازه‌ای استفاده می‌کنند.

در نرم‌افزار ELMOD پس از انجام محاسبات بازگشتی در یک سیستم سه لایه‌ای (شامل لایه‌های آسفالتی، لایه‌های دانه‌ای و بستر روسازی با ضخامت نامحدود) مدول لایه‌های روسازی محاسبه شده و سپس با استفاده از روابط ۲۳ الی ۲۵ به ضریب قشر تبدیل می‌شود.

ادامه مراحل در این روش مشابه روش Visual بوده و عدد سازه‌ای مؤثر روسازی محاسبه می‌شود.

مزیت نرم‌افزار ELMOD نسبت به روش Visual در وارد کردن پاسخ سازه‌ای روسازی (مدول لایه‌ها) در تعیین ضرایب قشر روسازی است در حالی که در روش Visual تنها بر اساس خرابی‌های سطحی ضرایب قشر تعیین می‌شود.

به عنوان روش مبنا برای مقایسه نتایج دیگر روشهای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی انتخاب شد.

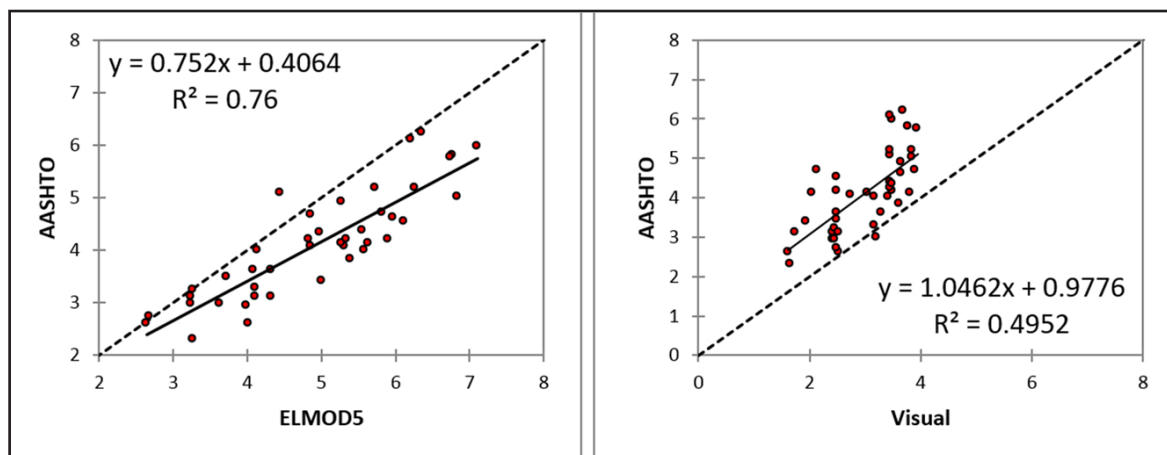
۱- پارامتر عدد سازه‌ای روسازی از نتایج اصلی آزمایش راه آشتو است.

۲- استفاده از مدول حاصل از محاسبات بازگشتی و نه مدول آزمایشگاهی به منظور تعیین ضرایب قشر چندان منطقی به نظر نمی‌رسد.

۳- به دلیل بزرگ تر بودن نتایج روش ELMOD روسازی قوی‌تر فرض می‌شود، بنابراین استفاده از روش NDT در جهت اطمینان خواهد بود.

در روش NDT آشتو، داده‌های افت و خیز روسازی در یک سیستم دولایه‌ای با انجام محاسبات بازگشتی به مدول مؤثر کل لایه‌های روسازی تبدیل شده و سپس با استفاده از این پارامتر و ضخامت کل لایه‌ها، عدد سازه‌ای روسازی محاسبه می‌شود. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از نرم‌افزار ELMOD در اکثر قطعات، بزرگ تر از نتایج حاصل از روش NDT آشتو است، هرچند روند تغییرات عدد سازه‌ای روسازی در دو روش مشابه یکدیگر است.

به عبارت دیگر محدوده تغییرات در روش ELMOD ۶/۲ تا ۱/۷ و در روش NDT ۳/۲ تا ۲/۶ بوده و ضریب تعیین (R^2) بین دو روش ۰/۷۶ است. در این تحقیق به دلایل زیر روش NDT آشتو



شکل ۴. نتایج روش نرم‌افزار ELMOD و نشریه ۲۳۴ (Visual) در مقایسه با روش آشتو برای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی

جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون خطی روشهای مختلف در مقابل روش آشتو

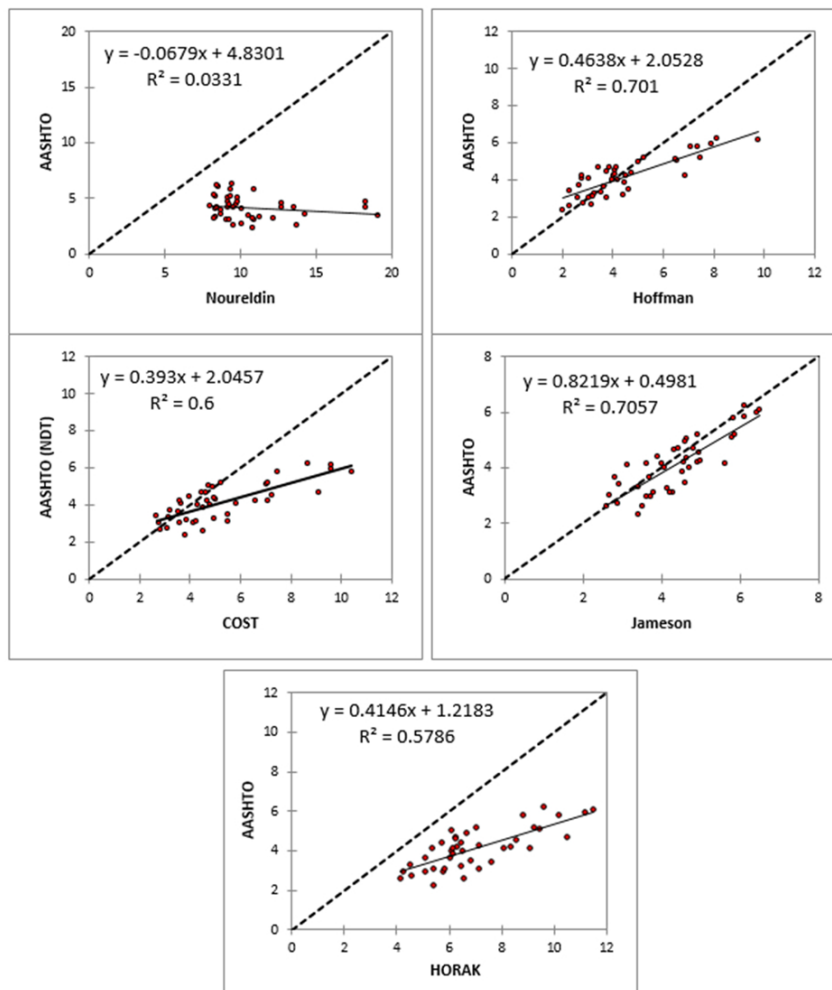
ردیف	روش مورد استفاده	میانگین عدد سازه‌ای	حداقل عدد سازه‌ای	حداکثر عدد سازه‌ای	محدوده تغییرات	شیب	عرض از مبدا	p-value	R^2	RMSE
۱	Noureldin	۱۰/۶	۸/۱	۱۹/۱	۱۱/۱	-۰/۰۶۷۹	۴/۸۳۰۱	۰/۲۷	۰/۰۳	۷/۱۷
۲	Hoffman	۴/۴	۲	۹/۸	۷/۸	۰/۴۶۳۸	۲/۰۵۲۸	۰	۰/۷	۱/۱۷
۳	Jameson	۴/۴	۲/۶	۶/۵	۳/۹	۰/۸۲۱۹	۰/۴۹۸۱	۰	۰/۷۱	۰/۶۴
۴	COST	۵/۳	۲/۷	۱۰/۴	۷/۷	۰/۳۹۳	۲/۰۴۵۷	۰	۰/۶	۱/۷۸
۵	Horak	۷	۴/۲	۱۱/۵	۷/۳	۰/۴۱۴۶	۱/۲۱۸۳	۰	۰/۵۸	۳/۱۳
۶	Rohde	۴/۶	۲/۷	۷/۶	۴/۹	۰/۷۳۵۶	۰/۷۵۳۳	۰	۰/۸۵	۰/۶۹
۷	Wimsatt	۴	۲/۲	۶/۸	۴/۶	۰/۸۲۴۱	۰/۷۸۴	۰	۰/۹۲	۰/۳۶
۸	Noureldin_T	۳/۹	۲/۳	۵/۵	۳/۲	۱/۱۷۴۱	-۰/۴۶۴	۰	۰/۸۱	۰/۵

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

مناسب بین دو روش زمانی اتفاق می‌افتد که شیب خط نزدیک به یک، عرض از مبدا نزدیک به صفر، معنی‌داری رابطه بزرگ تر از ۹۵ درصد (مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵)، ضریب همبستگی نزدیک به ۱ و مقدار خطای RMS به صفر نزدیک باشد. روش Noureldin در اکثر نقاط تخمین دست بالایی از عدد سازه‌ای مؤثر روسازی به دست می‌دهد. در این روش افت و خیز مربوط به بستر روسازی از حداکثر مقدار حاصلضرب تعیین می‌شود. به دلیل فرضیات موجود در این روش، در اکثر موارد ژئوفونهای انتهایی برای تعیین افت و خیز بستر روسازی انتخاب شد و نتایج بزرگی برای عدد سازه‌ای مؤثر روسازی حاصل شد. در این تحقیق به منظور کاهش خطا در روش Noureldin از افت و

۲-۴ مقایسه روشهای تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در مقابل روش NDT آشتو

کردار نتایج روشهای مختلف در تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در مقابل روش NDT آشتو برای رده بدون اطلاع از ضخامت روسازی در شکلهای (۵) و در برای رده با اطلاع از ضخامت کل روسازی در شکل (۶) ترسیم شده است. همچنین نتایج تحلیل آماری عدد سازه‌ای مؤثر حاصل از روشهای مختلف شامل مقدار میانگین، حداقل، حداکثر، محدوده داده‌ها، شیب خط رگرسیون، عرض از مبدا، معنی‌داری رگرسیون، ضریب تعیین و خطای RMS بین داده‌های پیش‌بینی در هر روش و مقدار واقعی از روش آشتو در جدول (۳) ارایه شده است. بدیهی است رگرسیون

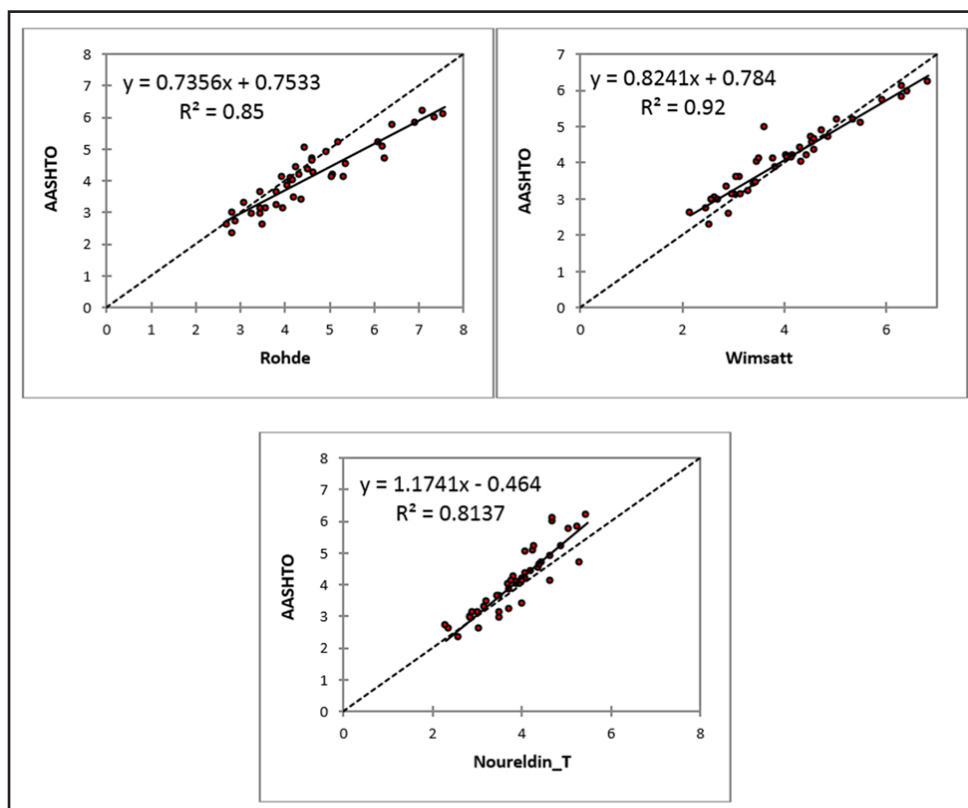


شکل ۵. نتایج روشهای تعیین عدد سازه‌ای بدون اطلاع از ضخامت روسازی در مقایسه با روش آشتو

اطلاع از ضخامت روسازی، با توجه به ضریب همبستگی 0.71 بهترین نتیجه را ارائه می‌کند. در این روش از افت و خیز مرکز بارگذاری به عنوان پاسخ کل سیستم روسازی و بستر و افت و خیز در فاصله 90 سانتیمتری از صفحه بارگذاری به عنوان پاسخ بستر روسازی استفاده شده است.

در شکل (۶) روشهای تعیین عدد سازه‌ای در رده با اطلاع از ضخامت کل لایه‌های روسازی با روش آشتو مقایسه شده است. به طور کلی نتایج تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در رده با اطلاع از ضخامت کل روسازی با توجه به ضرایب همبستگی بزرگ تر از 0.8 بهتر از رده بدون اطلاع از ضخامت روسازی است. روش NDT آشتو نیز در این رده قرار می‌گیرد، اما این روش به دلیل داشتن محاسبات بازگشتی و روند سعی و خطا به زمان زیادی برای ارزیابی سازه‌ای و تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی نیاز دارد. در این رده رگرسیون چند جمله‌ای استفاده

خیز در فاصله 90 سانتیمتری به عنوان افت و خیز بستر روسازی استفاده شد. این روش با توجه به ضریب تعیین بسیار کم و همچنین ضریب معناداری (P-value) بیشتر از 0.05 قابل استفاده در سطح شبکه نیست. روشهای Hoffman و COST در رده بدون اطلاع از ضخامت روسازی، نتایج خوبی تا عدد سازه‌ای 5 داشته و پس از آن تخمین دست بالا ارائه می‌دهند. روش Hoff-man با توجه به ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون بزرگ تر و همچنین مقدار خطای کمتر، بهتر از روش COST است. در حقیقت روش COST یک رابطه رگرسیون از داده‌های محلی بوده در حالی که روش Hoffman با استفاده از پارامتر Area و فرض روسازی به صورت دال مدل مناسب‌تری ارائه می‌کند. مدل رگرسیون غیرخطی Horak که با استفاده از پارامترهای AUPP و SCI توسعه یافته است با ضریب تعیین 0.5 همبستگی کمی با نتایج آشتو نشان می‌دهد. مدل لگاریتمی Jameson در رده بدون



شکل ۶. نتایج روشهای تعیین عدد سازه‌ای با اطلاع از کل ضخامت روسازی در مقایسه با روش آشتو

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

MOD و ماهیت عدد سازه‌ای روسازی که متعلق به آزمایش راه آشتو است روش NDT به عنوان روش مبنا برای مقایسه نتایج حاصل از روشهای مختلف انتخاب شد.

۳- تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که روش Nouredin به دلیل مقدار P-Value بزرگ تر از ۰/۰۵ رابطه خوبی با روش NDT آشتو ندارد. به دلیل فرضیات موجود در این روش در اکثر موارد ژئوفونهای انتهایی برای تعیین افت و خیز بستر روسازی انتخاب شد و نتایج بزرگی برای عدد سازه‌ای مؤثر روسازی حاصل شد. ۴- به طور کلی نتایج حاصل از روشهای مربوط به رده استفاده از ضخامت کل روسازی و یا ضخامت یک یک لایه‌ها (Ro-hde 'Wimsatt, Nouredin_T, NDT و ELMOD) نسبت به روشهای مربوط به رده بدون استفاده از ضخامت روسازی (Hoffman, Jameson, Horak و COST) به منظور تخمین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی (SNeff) بهتر است.

۵- در رده بدون اطلاع از ضخامت روسازی روشهای Hoff-man و COST تا عدد سازه‌ای ۵ تطابق خوبی با روش آشتو داشته و پس از آن نتایج دست بالایی دارند. روش Hoffman به دلیل استفاده از پارامتر AREA و فرض روسازی به صورت دال با ضریب همبستگی ۰/۷ و خطای کمتر، بهتر از روش COST ارزیابی شد. هر چند استفاده از رابطه رگرسیون COST در سطح شبکه ساده‌تر است.

۶- بهترین روش در رده بدون اطلاع از ضخامت روسازی روش Jameson با ضریب همبستگی ۰/۷۱ است که بر اساس یک رابطه لگاریتمی با استفاده از افت و خیز مرکز بارگذاری و افت و خیز در فاصله شعاعی ۹۰ سانتیمتری عدد سازه‌ای روسازی را محاسبه می‌کند، بنابراین می‌توان از این روش به منظور ارزیابی سریع روسازی در سطح شبکه استفاده کرد.

۷- در رده با اطلاع از ضخامت کل روسازی، روشهای Nouredin_T, Rohde و Wimsatt مورد بررسی و تحلیل

شده در روش Wimsatt با ضریب همبستگی ۹۲/۰ و خطای ۳۶/۰ در این دسته بهترین روش است. روشهای Rohde و Nouredin_T در این رده با ضریب همبستگی بالای ۸/۰ بعد از روش Wimsatt قرار می‌گیرند. در روش Wimsatt علاوه بر دقت بیشتر نسبت به دیگر روشها در رده با اطلاع از ضخامت کل روسازی به دلیل ثابت بودن متغیرهای مدل و عدم نیاز به محاسبات بازگشتی، عدد سازه‌ای مؤثر روسازی با سرعت زیاد تعیین می‌شود.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشهای مختلف تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی (SN_{eff}) در سطح شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. با اخذ داده‌های مورد نیاز از برداشت دستگاه‌های FWD و GPR در گزیده‌ای از راههای کشور و انجام محاسبات و تحلیلهای لازم نتایج زیر حاصل شد:

۱- از آنجا که ممکن است خرابیهای سطح روسازی و همچنین شرایط لایه‌های دانه‌ای در طول قابل توجهی از راه تغییر نکند، بنابراین ضریب قشر و زهکشی ثابت بوده و تعیین عدد سازه‌ای مؤثر روسازی در روش Visual تنها تابع ضخامت روسازی می‌شود. به همین دلیل محدوده تغییرات عدد سازه‌ای مؤثر در این روش از ۹/۱ تا ۹/۳ (دو واحد) است، در حالی که در روش NDT دو برابر این مقدار است. دو روش Visual و NDT هر دو، از روشهای پیشنهاد شده آشتو هستند، ولی به دلیل تفاوت در روش محاسبه ضریب، همبستگی کمی ($R^2=0/49$) با هم دارند.

۲- مزیت روش ELMOD نسبت به روش Visual استفاده از پاسخ سیستم روسازی (مدول لایه‌ها) برای تعیین ضرایب قشر روسازی به جای خرابی سطحی و وضعیت لایه‌های دانه‌ای است. روش ELMOD همبستگی بهتری ($R^2=76/0$) با روش NDT آشتو دارد. در این تحقیق به دلیل مقادیر بزرگ تر روش EL-

۷. مراجع

- AASHTO (1986) "Guide for design of pavement structures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.

- BAKFAA(2008) "Computer program for backcalculation of airport pavement properties" <http://www.airtech.tc.faa.gov/naptf/download/Readme.htm>

- COST 336—Falling Weight Deflectometer (1998) "Information gathering report, task group 2 FWD at Network Level", Cooperation in Science and Technology, Final Draft Report.

- Crook, A. L, Montgomery, S. R. and Guthrie, W.S. (2012) "Using falling-weight deflectometer data for network-level flexible pavement management", Transportation Research Board, 91st Annual Meeting, Washington, D.C., USA.

- Donovan, P. and E. Tutumluer (2009) "Falling weight deflectometer testing to determine relative damage in asphalt pavement unbound aggregate layers", In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board of the National Academies, No. 2104, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA, pp. 12-23

قرار گرفت. روش NDT آشتو که تمام روشها با آن مقایسه شدند، دارای محاسبات بازگشتی و انجام سعی و خطا برای یافتن ژئوفونی است که افت و خیز بستر روسازی را اندازه گیری می کند، بنابراین زمان زیادی را برای تحلیل در سطح شبکه صرف می کند. این در حالی است که ارزیابی سازه ای روسازی در سطح شبکه نیاز به دقت زیاد ندارد. سه روش مطالعه شده در این رده دارای ضریب تعیین بالای ۰/۸ بوده و از دقت مناسبی برخوردار می باشند.

۸- در رده بدون استفاده از ضخامت روسازی روش Jameson با ضریب همبستگی ۰/۷۱ و در روش با اطلاع از ضخامت روسازی، روش Wimsatt با ضریب همبستگی ۰/۹۲ بهترین نتیجه را در تعیین عدد سازه ای مؤثر روسازی ارائه کردند. همچنین استفاده از این روشها نیاز به محاسبات بازگشتی لازم در روش آشتو را حذف می کند. بنابراین این روشها را می توان به راحتی برای تعیین عدد سازه ای مؤثر در مدیریت روسازی سطح شبکه مورد استفاده قرار داد.

۶. پی نوشتها

- 1- Project level
- 2- Network level
- 3- Falling Weight Deflectometer
- 4- Effective Structural Number
- 5- Ground Penetrating Radar
- 6- Deflection Basin Parameters
- 7- Area Under Pavement Profile
- 8- Surface Curvature Index
- 9- Structural Index of Pavement
- 10- Surface Seal
- 11- Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design

تأثیر میزان اطلاع از ضخامت لایه‌ها در تعیین عدد سازه‌ای (SN) روسازیهای آسفالتی با استفاده از نتایج دستگاه FWD

- Murphy, M. R. and Zhang. Z. (2010) "Validation and implementation of the structural condition index (SCI) for network-level pavement evaluation", Research Report FHWA/TX-11/5-4322-01-1, Texas Department of Transportation, USA.
- Noureldin, A. S. (1993) "New scenario for back-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
- Rohde, G.T. (1994) "Determining pavement structural number from FWD testing", Transportation Research Record 1448, Washington, DC, USA.
- Shahin, M. Y. (2005) "Pavement management for airports, roads and parking lots", Second Edition, Springer publication, New York, USA
- Schnoor, H. and Horak, E. (2012) "Possible method of determining structural number for flexible pavements with the falling weight deflectometer", Proceedings of the 31th Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa.
- Technical Advisory (2009) "FAQ's: Network-level falling weight deflectometer (FWD) data collection",
- Diefenderfer, B. K. (2008) "Network-level pavement evaluation of Virginia's interstate system using the falling weight Deflectometer", VTRC 08-R18. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville.
- FWD Owner's Manual (2008) "DYNATEST FWD/HWD test systems", Dynatest International A/S, Version 2.4.2, pp. 1-3, Denmark
- Hoffman, M. S. (2003) "Direct method for evaluating structural seeds of flexible pavements with falling-weight deflectometer deflections", Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1860, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, pp. 41-47
- Huang, Y. (2004) "Pavement analysis and design", Second Edition. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Irwin, L. H. (1983) "User's guide to Modcomp2, Version 2.1., Local Roads Program", Cornell University, Ithaca, NY, USA.
- Jameson, G. W. (1997) "Use of FWD to program works based on HDM III; COST 336 workshop on FWD at Network Level", Lisbon.

Texas Department of Transportation, Austin, TX,
USA.

- Ullidtz, Per (1998) "Modeling flexible pavement response and performance", Denmark: Lyngby

- IRI. Presidency Office for Strategic Planning and Supervision (2011) "Iran highway asphalt paving code No. 234", first revision.

- Wimsatt, A. (1998) "Improving the Texas Department of Transportation pavement rehabilitation program," Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.

- Wu, Z., Shekharan, R., Chowdhury, T. and Diefenderfer, B. K (2009) Development and implementation of network-level selection of pavement maintenance and rehabilitation strategy: Virginia practice. Compendium of papers, 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA.