

استفاده از شاخص نفوذ به عنوان معیاری جدید در ارزیابی سازه روسازی در سطح شبکه

منصور فخری*، دانشیار گروه عمران - راه و ترابری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

تهران

مرتضی قنبری، کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

تهران

Email: Fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲

چکیده

ارزیابی سازه روسازی یکی از بخش‌های مهم سیستم مدیریت روسازی در سطح شبکه و پروژه می‌باشد که به طور متداول با استفاده از دستگاه افت‌وخیزسنج ضربه‌ای (FWD) انجام می‌شود. در استفاده از دستگاه FWD معمولاً مقاومت لایه‌ها به روش محاسبات معکوس محاسبه می‌گردد. استفاده از این روش به دلیل پیچیدگی و نیازمند بودن به اطلاعات اولیه دقیق، برای مدیریت در سطح شبکه از لحاظ مالی و زمانی مقرون به صرفه نبوده و لذا بیشتر در سطح پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. نفوذسنج دینامیک (DCP) از دیگر تجهیزات مورد استفاده در ارزیابی سازه روسازی می‌باشد که به دلیل سرعت و ارزانی، استفاده از آن در سطح شبکه مناسب‌تر است. در این پژوهش، ۵۰ کیلومتر از راه‌های شریانی استان کرمانشاه با استفاده از دستگاه‌های FWD و DCP مورد آزمایش قرار گرفت که از نتایج آن همبستگی قابل قبولی بین شاخص نفوذ، به عنوان خروجی دستگاه DCP و داده‌های حاصل از دستگاه FWD برای لایه‌های روسازی به دست آمد. با بررسی نتایج حاصل از دستگاه‌های FWD و DCP، دامنه تغییرات شاخص نفوذ برای وضعیت‌های مختلف سازه‌ای روسازی در سطح شبکه ارائه گردید. نتایج حاصل از تحلیل شبکه با استفاده از هر دو روش نشان‌دهنده اعتبار قابل قبول معیار شاخص نفوذ به عنوان معیاری ساده و ارزان جهت ارزیابی سازه روسازی در سطح شبکه از مدیریت روسازی می‌باشد.

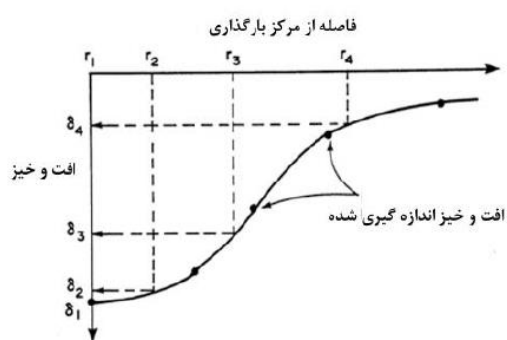
واژه‌های کلیدی: سیستم مدیریت روسازی، افت‌وخیزسنج ضربه‌ای، نفوذسنج دینامیک، ارزیابی سازه‌ای روسازی

۱. مقدمه

سطح شبکه و پروژه پیاده‌سازی می‌شود. بررسی وضعیت روسازی راه، به‌ویژه سازه آن، پیش‌نیاز اصلی برنامه‌ریزی برای تعیین اولویت و انتخاب روش یا روش‌های بهسازی در سیستم مدیریت روسازی است (شاهین، ۲۰۰۵). اندازه‌گیری افت‌وخیز روسازی با استفاده از دستگاه FWD یک روش استاندارد

سیستم مدیریت روسازی (PMS) ابزاری است هدفمند برای مدیران که به منظور افزایش کارایی در تصمیم‌گیری و یافتن استراتژی مؤثر و اقتصادی، جهت ارزیابی، ترمیم، تعمیر، حفظ و نگهداری روسازی‌ها در سطحی قابل قبول طراحی می‌شود. این سیستم در دو

سطح توزیع می‌گردد و هر ژئوفن افت و خیز بخشی از لایه‌های روسازی را ثبت می‌کند. فریم و همکاران (۱۹۸۷) اصطلاح وضعیت رفتار روسازی را همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده مطرح کرد. رفتار انواع روسازی‌ها تابعی از رفتار مجزای لایه‌ها و نحوه درگیری این لایه‌ها با یکدیگر می‌باشد. دامنه رفتاری روسازی از بسیار سخت تا بسیار انعطاف‌پذیر در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. حوضچه تغییرشکل حاصل از بارگذاری FWD (ایروین، ۱۹۷۹)

غیرمخرب جهت تحلیل و ارزیابی سازه روسازی می‌باشد. استفاده از این دستگاه در سیستم مدیریت روسازی بیشتر در سطح پروژه بوده که تحلیل نتایج آن در این سطح، پیچیده و نیازمند اطلاعات جانبی زیادی می‌باشد. به طور کلی، از دستگاه FWD کمتر در سطح شبکه استفاده شده است (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۲). روش‌های ساده و مستقیم تحلیل روسازی بر مبنای تعریف پارامترهایی از حوضچه تغییرشکل حاصل از دستگاه FWD توسعه یافته‌اند. در روش مستقیم، پارامترهای تعریف شده هر یک با بخش خاصی از لایه‌های روسازی در ارتباط بوده و بیانگر وضعیت سازه‌ای آن می‌باشد (هوراک، ۱۹۸۷). زمانی که روسازی تحت یک بار تغییرشکل می‌دهد تأثیر آن می‌تواند تا ۲ متر در سه بعد به صورت یک حوضچه تغییرشکل اندازه‌گیری گردد. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. ایروین (۱۹۷۹) نشان داد که تنش ناشی از بارگذاری دستگاه FWD با زاویه ۳۴ درجه نسبت به

جدول ۱. دامنه حداکثر افت و خیز و وضعیت سازه‌ای لایه‌های روسازی بر اساس حالت رفتار روسازی (فریم و همکاران،

۱۹۸۷)

توضیحات	بازه تغییرات حداکثر	
	افت و خیز (میلی‌متر)	رفتار روسازی
مدول الاستیسیته لایه‌ها بزرگتر از ۲۰۰۰ مگاپاسکال، روسازی مانند یک دال صلب عمل می‌کند	< 0.2	بسیار سخت ^۱
لایه‌های روسازی با مدول بیش از ۵۰۰ مگا پاسکال، وجود ترک‌های خفیف در لایه‌های روسازی و ایجاد بلوک‌های بزرگ	$0.2 - 0.4$	سخت ^۲
مدول الاستیسیته لایه‌ها بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال، ممکن است لایه‌های نپیت شده، به دلیل ایجاد ترک‌ها، به بلوک‌های کوچکتری تبدیل شوند	$0.4 - 0.6$	انعطاف‌پذیر ^۳
مدول الاستیسیته لایه‌ها کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال، به دلیل وجود لایه‌های ضعیف یا در معرض رطوبت زیاد به مدت طولانی	> 0.6	بسیار انعطاف‌پذیر ^۴

خط تأثیر ارائه شده توسط ایروین (۱۹۷۹) و رفتار سازه‌ای فریم و همکاران (۱۹۸۷) بنا نهاده شده است. پارامترهای ارائه شده توسط هوراک و همکاران (۱۹۸۹) در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

هوراک و همکاران (۱۹۸۹) حوضچه تغییرشکل را به سه ناحیه شامل ناحیه فوقانی (اساس)، ناحیه میانی (زیراساس) و ناحیه تحتانی (بستر و لایه‌های پایینی) تقسیم کردند و برای هر ناحیه پارامتر مرتبط با آن را ارائه دادند. روش هوراک و همکاران (۱۹۸۹) بر اساس

جدول ۲. پارامترهای حوضچه تغییرشکل (هوراک و همکاران، ۱۹۸۹)

پارامتر	رابطه	ارتباط با روسازی
(BLI)	D_0-D_{300}	بیانگر وضعیت سازه‌ای اساس روسازی
(MLI)	$D_{300}-D_{600}$	بیانگر وضعیت لایه زیراساس و دیگر لایه‌های میانی
(LLI)	$D_{600}-D_{900}$	بیانگر لایه‌های پایین روسازی شامل بستر و دیگر لایه‌ها

D_i = افت و خیز اندازه‌گیری شده برحسب میکرون در فاصله i میلی‌متر از مرکز بارگذاری

تغییرشکل حاصل از بارگذاری ۴۰ کیلونیوتن، برای سه نوع ساختار روسازی شامل اساس دانه‌ای، تثبیت شده با قیر و تثبیت شده با سیمان تعیین گردید. هوراک (۲۰۰۸) با تکیه بر کارهای قبلی ماری و بلکنز (۱۹۹۱) و انجام آزمایش‌های میدانی به‌وسیله آزمایشگاه شبیه-ساز وسایل نقلیه سنگین (HVS)، جدول ۳ را براساس پارامترهای حوضچه تغییرشکل به عنوان یک معیار ارزیابی کیفی سازه روسازی ارائه داد.

ماری و بلکنز (۱۹۹۱) انواع مختلف روسازی شامل روسازی با اساس دانه‌ای، تثبیت شده با قیر و تثبیت شده با سیمان را با استفاده از دستگاه FWD مورد بررسی قرار دادند. سازه روسازی‌ها به روش مکانیستیک مورد تحلیل قرار گرفت و عمر باقی‌مانده روسازی مشخص و همبستگی آن با پارامترهای حوضچه تغییرشکل اندازه‌گیری شده، بررسی شد. در نتیجه، عمر باقی‌مانده روسازی بر حسب تعداد محور استاندارد ۸/۲ تنی بر اساس پارامترهای حوضچه

جدول ۳. محدوده پارامترهای حوضچه تغییرشکل روسازی بر اساس وضعیت سازه‌ای برای سطح تنش ۵۶۶ کیلوپاسکال (هوراک، ۲۰۰۸)

دامنه رفتار روسازی	وضعیت کیفی روسازی	D_{max}	BLI (micron)	MLI (micron)	LLI (micron)	SN_{eff}	دامنه ترافیک (میلیون)
سخت تا بسیار سخت	مناسب	< 500	< 200	< 100	< 50	> 6	> 3
سخت	بحرانی	۵۰۰-۷۵۰	۲۰۰-۴۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۴-۶	۰/۸-۳
انعطاف‌پذیر تا بسیار انعطاف‌پذیر	نامناسب	> 750	> 400	> 200	> 100	< 4	$< 0/8$

D_{max} = حداکثر افت و خیز اندازه‌گیری شده برحسب میکرون در مرکز صفحه بارگذاری فاصله، SN_{eff} = عدد سازه‌ای مؤثر

مخروط به دست می آید. رابطه (۱) برای تمام خاک‌ها جز خاک‌های رسی، رابطه (۲) برای خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد (CH) و رابطه (۳) برای خاک‌های با خاصیت خمیری کم و $CBR < 10$ در ASTM D6951 ارائه شده است (ASTM, ۲۰۱۵):

$$CBR = \frac{292}{PI^{1.12}} \quad (1)$$

$$CBR = \frac{1}{0.002871 \times PI} \quad (2)$$

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 \times PI)^2} \quad (3)$$

تحقیقات اخیر در مورد همبستگی بین DCP و دیگر پارامترهای مکانیکی خاک بیانگر آن است که آزمایش DCP می‌تواند به عنوان یک ابزار کنترل کیفیت جایگزین روش‌های مرسوم مانند آزمایش‌های تراکم روی مصالح ریزدانه و دانه‌ای گردد (برنی و کایزر، ۲۰۱۲). به‌طور کلی، بیشترین کاربرد دستگاه DCP اندازه‌گیری مقاومت لایه‌های خاکی بر حسب CBR و یا مدول الاستیسیته بوده است. در این پژوهش، با بررسی همبستگی بین نتایج دستگاه DCP برای هر لایه و پارامتر حوضچه تغییرشکل حاصل از FWD برای همان لایه، سعی گردیده یک تقسیم‌بندی برای شاخص نفوذ به عنوان معیار جدید در ارزیابی لایه‌های روسازی ارائه گردد. ضمن بررسی همبستگی بین نتایج تحلیل دقیق و پارامترهای حوضچه تغییرشکل در روش مستقیم، دامنه تغییرات شاخص نفوذ (PI) برای شرایط سازه‌ای مختلف لایه‌های روسازی جهت ارائه به عنوان یک معیار جدید به دست آمده است.

درجه‌بندی به‌وسیله رنگ یک روش شناخته شده جهت نشان دادن وضعیت کیفی و کمی یک پارامتر می‌باشد که در بیشتر مواقع در سیستم مدیریت روسازی استفاده می‌شود. در دسته‌بندی جداول فوق، رنگ قرمز بیانگر شرایط نامناسب، رنگ نارنجی بیانگر وضعیت بحرانی و رنگ سبز بیانگر وضعیت مناسب سازه‌ای می‌باشد (هوراک، ۲۰۰۸).

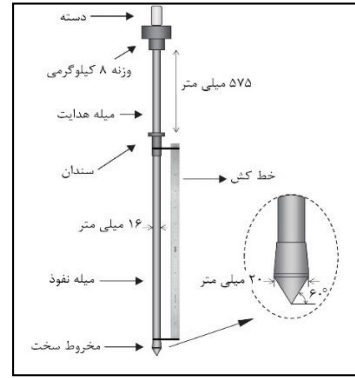
۲. دستگاه نفوذسنج دینامیک DCP

آزمایش نفوذسنج دینامیک به طور گسترده‌ای برای ارزیابی مقاومت لایه‌های روسازی به کار برده شده است. دستگاه DCP شامل یک وزنه استاندارد می‌باشد که از ارتفاع معینی بر میله‌ای که در انتهای آن یک مخروط فلزی با ابعاد استاندارد وصل شده، سقوط می‌کند. میزان نفوذ برای هر ضربه در مصالح مورد نظر ثبت و به صورت میلی‌متر در هر ضربه بیان می‌گردد. با توجه به نرخ نفوذ محاسبه شده، وضعیت لایه‌های روسازی از نظر مقاومت ارزیابی می‌گردد. شکل ۲، تصویر شماتیک این دستگاه را نشان می‌دهد (ASTM, ۲۰۱۵). از سال ۱۹۷۳، آفریقای جنوبی شروع به استفاده از دستگاه DCP جهت ارزیابی لایه‌های روسازی موجود نموده است. طی سال‌ها، سازمان‌های گوناگون از شاخص‌های مختلفی برای ارائه نتایج آزمایش DCP مانند نرخ نفوذ (PR)، عدد نفوذسنج دینامیک (DN)، شاخص نفوذسنج دینامیک (PI) و یا عدد ضربه (BN) استفاده کرده‌اند (مخیا - سانتیاگو و همکاران، ۲۰۱۵). در این تحقیق، معیار PI که عبارت است از نسبت نفوذ بر تعداد ضربه (mm/blow) مورد استفاده قرار گرفته است. مقاومت لایه‌ها معمولاً بر حسب نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و به‌وسیله روابط همبستگی موجود بین شاخص نفوذ و CBR تخمین زده می‌شود. این روابط توسط انجمن مهندسين ارتش آمریکا ارائه شده که در آنها CBR خاک بر اساس نفوذ

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. محورهای مورد مطالعه

در این پژوهش، دو محور بیستون - سنقر و سنقر - قروه واقع در شرق استان کرمانشاه در وضعیت به ترتیب کوهستانی و تپه ماهوری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تقسیم‌بندی ترافیکی نشریه ۲۳۴، این محورها با بار محوری هم‌ارز $10^4 \times 20$ در محدوده ترافیک متوسط قرار می‌گیرند. جدول ۴، موقعیت جغرافیایی ابتدا و انتهای محورها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. دستگاه نفوذسنج دینامیک

جدول ۴. موقعیت جغرافیایی ابتدا و انتهای محورهای بیستون- سنقر و سنقر- قروه

نام محور	طول کیلومتر	مختصات ابتدا		مختصات انتها	
		ارتفاع	طول	ارتفاع	عرض
بیستون- سنقر	۲۳/۵	۱۳۴۸/۱	۴۷,۳۷۴۶۹۳۳	۱۹۱۴	۳۴,۶۱۴۶۹۰
سنقر- قروه	۲۷/۳	۱۷۷۶	۴۷,۶۱۹۲۲۵	۱۹۳۶	۳۴,۹۵۶۴۲۸

۳-۲. روش تحقیق

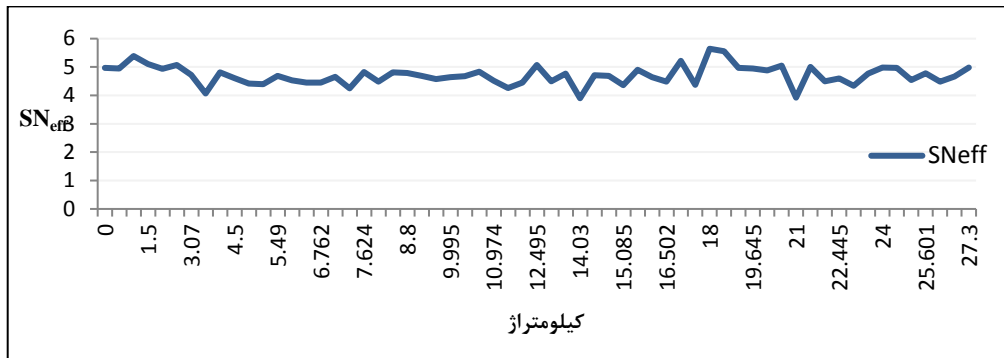
در این پژوهش، محور مذکور با استفاده از دستگاه FWD مدل Dynatest8000 مورد آزمایش قرار گرفته و افت خیز حاصل از بارگذاری ۴۰ کیلو نیوتن (تنش ۵۶۶ کیلو پاسکال) اندازه‌گیری گردید. پارامترهای حوضچه تغییر شکل بدون نیاز به اطلاعات اولیه همچون جنس و ضخامت لایه‌ها محاسبه می‌گردد. جدول ۵، نتایج مقطعی از محور بیستون- سنقر را نشان می‌دهد.

ضخامت لایه‌های به دست آمده از مغزه‌گیری و آزمایش نفوذسنج دینامیک، به همراه افت‌وخیزهای به دست آمده از دستگاه FWD با استفاده از نرم‌افزار ELMOD 6 مورد تحلیل قرار گرفته و مدول هر یک از لایه‌های روسازی به روش محاسبات معکوس محاسبه گردید. علاوه بر این، عدد سازه‌ای روسازی (SN) به روش آشتو (۱۹۹۳) از رابطه (۴) که به طور متداول در اکثر سازمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز محاسبه

گردید. در روش آشتو، برای تحلیل اطلاعات، کل سیستم روسازی به صورت دو لایه شامل لایه‌های زیرسازی و روسازی و خاک بستر فرض می‌شود. با تعیین ضخامت کل خیز در زیر صفحه بارگذاری FWD، مقدار E_p (مدول الاستیسیته کل سیستم روسازی) و عدد سازه‌ای مؤثر (SN_{eff}) به دست می‌آید. با داشتن مقادیر E_p و خیز مرکز صفحه بارگذاری (d_0)، ضخامت کل D ، فاصله تأثیر سیستم روسازی بر خیز ژئوفون‌ها و در نتیجه ژئوفونی که مقدار افت‌وخیز آن فقط متأثر از خاک بستر است، به دست می‌آید (آشتو، ۱۹۹۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ حسین و همکاران، ۲۰۰۰). شکل ۳، نمودار عدد سازه‌ای محاسبه شده از روش آشتو را در طول محور سنقر- قروه نشان می‌دهد.

$$SN_{eff} = 0.0045D\sqrt[3]{E_p} \quad (4)$$

استفاده از شاخص نفوذ به عنوان معیاری جدید در ارزیابی سازه روسازی در سطح شبکه

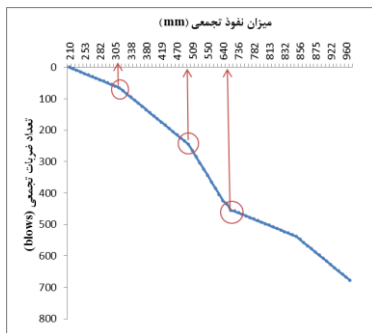


شکل ۳. عدد سازه‌ای محاسبه شده به روش آشتو (۱۹۹۳) برای محور سنقر- قروه

جدول ۵. محاسبه پارامترهای حوضچه تغییر شکل در روش مینا (بخشی از بیستون- سنقر)

ایستگاه (km)	تیش وارده (kpa)	بار وارده (KN)	افت و خیز اندازه گیری شده (میکرون)										پارامترهای حوضچه تغییر شکل (میکرون)		
			D	D	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	BLI
0.000	566	40	132	94	58	31	13	7	3	38	36	27			
0.100	566	40	161	114	64	30	14	7	3	47	50	34			
0.200	566	40	215	159	99	21	15	9	6	56	60	78			
0.310	566	40	224	159	94	52	26	10	11	65	65	42			
0.400	566	40	210	126	69	38	21	14	9	84	57	31			
0.500	566	40	187	131	77	41	22	9	11	56	54	36			
0.600	566	40	163	110	53	19	4	4	2	53	57	34			
0.700	566	40	185	102	40	5	3	3	4	83	62	35			
0.800	566	40	155	97	40	13	3	2	2	58	57	27			
0.900	566	40	187	131	58	14	9	8	5	56	73	44			
1.000	566	40	194	111	46	19	14	10	8	83	65	27			
1.100	566	40	285	159	73	34	12	7	4	126	86	39			
1.200	566	40	166	122	75	42	24	17	9	44	47	33			
1.300	566	40	231	162	89	47	24	12	12	69	73	42			
1.400	566	40	165	114	60	29	12	5	1	51	54	31			

آزمایش، تعداد و ضخامت لایه‌ها، با توجه به شیب منحنی، همانند شکل ۴، مشخص گردید. شاخص نفوذ PI، بر حسب میلی‌متر بر ضربه، برای هر لایه به صورت مجزا محاسبه گردید (جدول ۶).



شکل ۴. نمودار نفوذ تجمعی در مقابل تعداد ضربات تجمعی

جدول ۶. نتایج تحلیل داده‌های DCP

(محور سنقر- قروه کیلومتر ۵۱۵+۲۳)

PI (mm/blows)	ضخامت (mm)	شماره لایه
۱/۵	۱۰۶	اول
۱/۴	۱۷۹	دوم
۷/۵	۲۲۵	سوم

آزمایش نفوذسنج دینامیک با استفاده از دستگاه DCP مدل MATEST S051 بر اساس آیین‌نامه ASTM D-6951 و وزنه ۸ کیلوگرمی برای ۳۰ نقطه انتخابی انجام گردید. با رسم نمودار تجمعی ضربات در مقابل مقدار تجمعی، نفوذهای ثبت شده برای هر

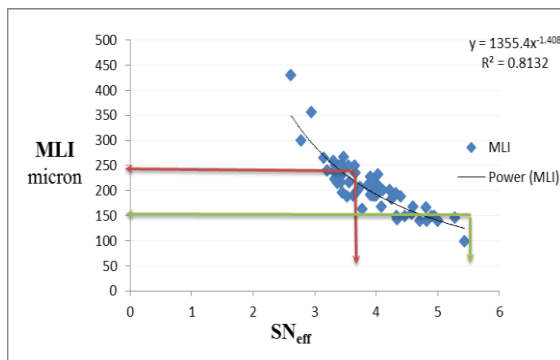
۴. تحلیل نتایج

۴-۱. بررسی همبستگی بین پارامترهای حوضچه

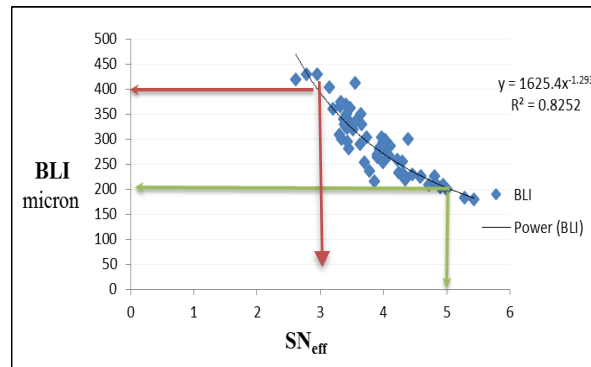
تغییر شکل و عدد سازه‌ای مؤثر

یکی از روش‌هایی که به وسیله آن می‌توان همبستگی بین دو متغیر را نشان داد نمودار پراکندگی‌ها می‌باشد. همبستگی بین پارامترهای حوضچه تغییر شکل و عدد سازه‌ای مؤثر روسازی با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel مورد بررسی قرار گرفت. برای

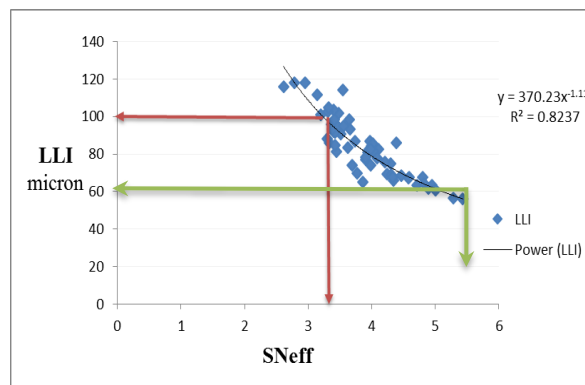
بررسی همبستگی بین پارامترهای حوضچه تغییر شکل و عدد سازه‌ای، منحنی‌های مختلف جهت برازش مورد آزمایش قرار گرفت و آن منحنی که بهترین همبستگی را داشت انتخاب گردید. نتایج این تحلیل حاکی از همبستگی مناسبی بین پارامترهای BLI (D₀-D₃₀₀)، MLI (D₃₀₀-D₆₀₀)، LLI (D₆₀₀-D₉₀₀) و عدد سازه‌ای مؤثر بود. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمودار همبستگی بین پارامتر MLI و SNeff



شکل ۵. نمودار همبستگی بین پارامتر BLI و SNeff



شکل ۷. نمودار همبستگی بین پارامتر LLI و SNeff

عدد سازه‌ای مؤثر بزرگتر از ۶ برای وضعیت بحرانی بین ۴ الی ۶ و برای وضعیت نامناسب (ضعیف) عدد سازه‌ای مؤثر کمتر از ۴ تعریف شده است. ارتباط قابل قبول بین پارامترهای حوضچه تغییر شکل با عدد سازه‌ای محاسبه شده بیانگر این واقعیت می‌باشد که با قابلیت اطمینان مناسبی می‌توان از پارامترهای مذکور جهت

همانطور که در شکل‌های ۵ الی ۷ با پیکان مشخص شده است، عدد سازه‌ای مؤثر معادل مرزهای تعریف شده برای پارامترهای حوضچه تغییر شکل در نمودارها تقریباً معادل عدد سازه‌ای است که در جدول ۳ برای سه وضعیت مناسب، بحرانی و نامناسب تعریف شده است. به طوری که برای وضعیت مناسب (خوب)

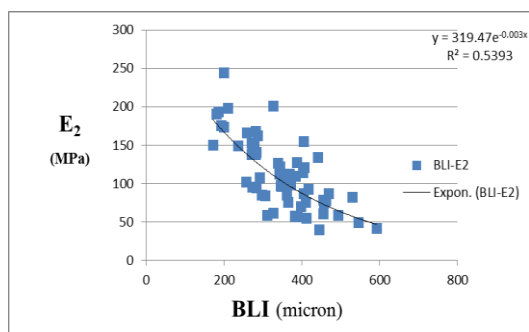
همبستگی نتایج آن با پارامترهای حوضچه تغییرشکل به وسیله نرم افزار Microsoft Excel مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۸ الی ۱۱ نشان داده شده است. مدول لایه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر به ترتیب با E_1 ، E_2 ، E_3 و E_{Subg} نشان داده شده است.

ارزیابی سازه روسازی استفاده کرد. نتایج به دست آمده مشابه نتایج تحقیقات هوراک و همکاران (۲۰۱۵) می باشد.

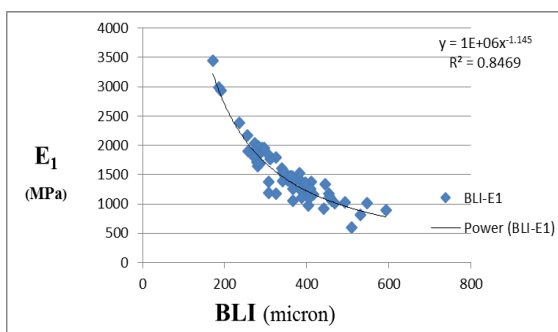
۴-۲. بررسی همبستگی بین پارامترهای حوضچه

تغییرشکل و مدول الاستیسیته لایه‌ها

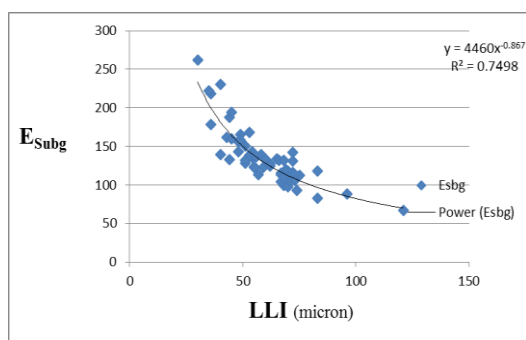
مدول الاستیسیته لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ELMOD و روش تطبیق حوضچه تغییرشکل محاسبه گردید و



شکل ۹. نمودار همبستگی بین پارامترهای BLI و E_2 (مدول لایه اساس)

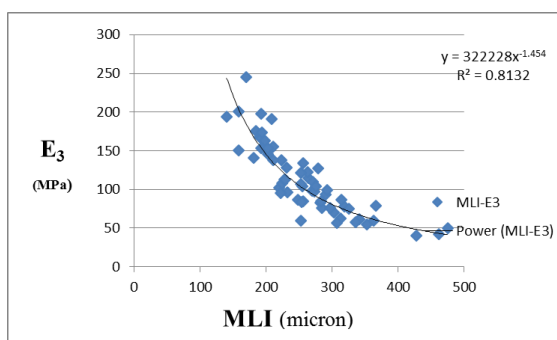


شکل ۸. نمودار همبستگی بین پارامترهای BLI و E_1 (مدول لایه آسفالت)



شکل ۱۱. نمودار همبستگی بین پارامترهای LLI و E_{Subg} (مدول بستر)

مدول لایه اساس (E_2) وجود نداشت ($R^2=0.54$) زیرا بخش زیادی از لایه اول را رویه آسفالتی در بر می گرفت. از این رو، پارامتر BLI همبستگی بالایی ($R^2=0.84$) با مدول لایه آسفالتی (E_1) نشان داد. همبستگی خوب بین مدول لایه زیراساس (E_3) به



شکل ۱۰. نمودار همبستگی بین پارامترهای MLI و E_3 (مدول لایه زیراساس)

همانطور که از نمودارهای فوق مشخص می باشد، همبستگی قابل قبولی بین پارامترهای حوضچه تغییرشکل و مدول لایه‌ها به دست آمد. به دلیل زیاد بودن ضخامت رویه آسفالتی در محورها (حدود ۲۰ الی ۳۰ سانتی متر) همبستگی مناسبی بین پارامتر BLI و

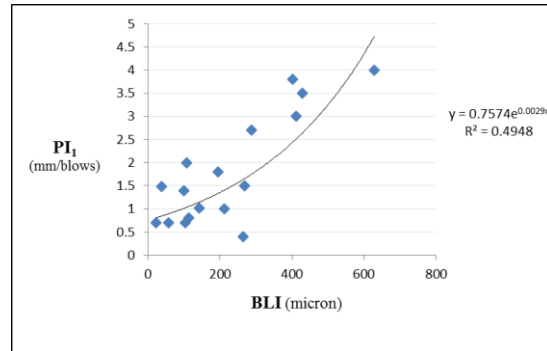
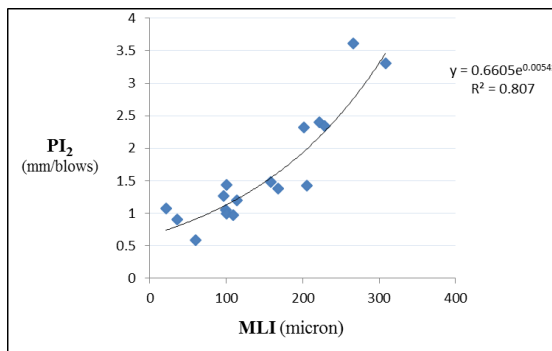
۳-۴. بررسی همبستگی بین پارامترهای حوضچه

تغییر شکل و شاخص نفوذ در لایه‌های

مختلف

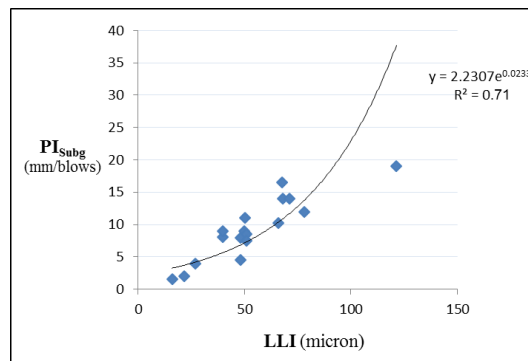
به منظور بررسی امکان استفاده از دستگاه نفوذسنج دینامیک در ارزیابی لایه‌های مختلف روسازی به عنوان یک معیار جدید، همبستگی بین شاخص نفوذ (PI) و پارامترهای حوضچه تغییر شکل مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج این بررسی در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ نشان داده شده است.

عنوان لایه میانی با پارامتر MLI نشان‌دهنده تأثیر زیاد مقاومت لایه‌های میانی بر افت و خیز ثبت شده در ژئوفون‌های D₃₀₀ و D₆₀₀ می‌باشد. البته لازم به ذکر است که ضخامت زیاد رویه آسفالتی در محورهای مورد مطالعه بر عمق تعریف شده برای لایه‌های میانی تا حدودی تأثیرگذار می‌باشد. پارامتر LLI به عنوان شاخصی از مقاومت لایه‌های تحتانی مانند بستر نیز همبستگی مناسبی ($R^2=0.75$) با مدول محاسبه شده برای بستر دارد.



شکل ۱۳. همبستگی بین پارامتر MLI و شاخص نفوذ در لایه زیر اساس

شکل ۱۲. همبستگی بین پارامتر BLI و شاخص نفوذ در لایه اساس



شکل ۱۴. همبستگی بین پارامتر LLI و شاخص نفوذ در بستر روسازی

زیاد رویه آسفالتی، پارامتر BLI بیشتر متأثر از لایه آسفالتی می‌باشد. لذا، BLI بیانگر وضعیت لایه‌های بالایی و بخشی از رویه آسفالتی می‌باشد. حال آنکه PI₁ شاخص نفوذ برای لایه اساس می‌باشد. بنابراین، BLI

همانطور که در نمودارها مشخص می‌باشد، همبستگی قابل قبولی بین شاخص نفوذ در هر لایه با پارامتر حوضچه تغییر شکل در همان لایه وجود دارد. همانطور که پیش‌تر به آن اشاره شد، به دلیل ضخامت

لایه‌های مختلف برای نقاط مورد آزمایش با روش میانگین‌گیری محاسبه و دامنه تغییرات آن مشخص گردید. دامنه شاخص نفوذ برای لایه‌های اساس، زیراساس و بستر به ترتیب با PI_1 ، PI_2 و PI_{Subg} (بر حسب mm/blows) در جدول ۷ نشان داده شده است. در ادامه، وضعیت سازه‌های محورهای بیستون- سنقر و سنقر- قروه با روش مستقیم (پارامترهای MLI ، BLI و LLI) و شاخص نفوذ براساس جدول ۷ مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن مقایسه می‌گردد. شکل‌های ۱۴ الی ۱۹، وضعیت سازه‌های لایه‌های مختلف روسازی را بر اساس پارامترهای حوضچه تغییرشکل حاصل FWD و شاخص نفوذ حاصل DCP نشان می‌دهند.

همبستگی کمی با شاخص نفوذ در لایه اساس نشان داده است.

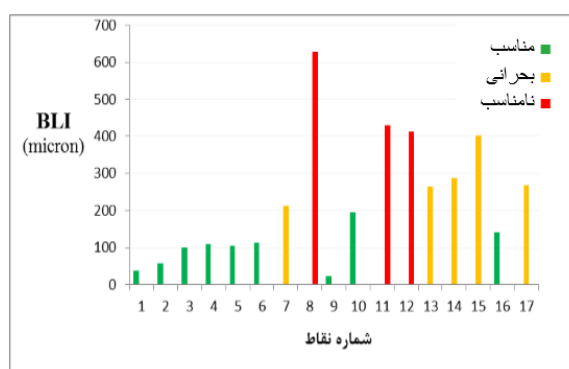
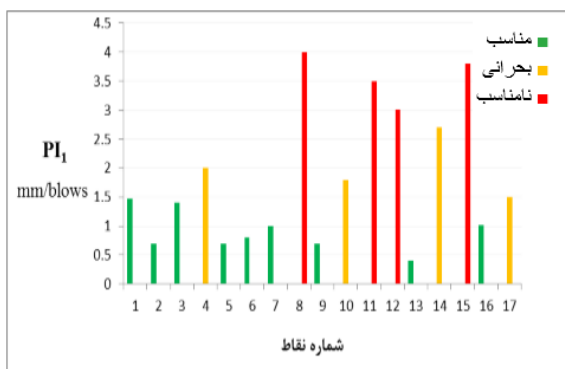
۴-۴. تعیین دامنه شاخص نفوذ برای لایه‌های

مختلف و تحلیل شبکه روسازی

با توجه به محدودیت تعداد آزمایش‌های ممکن برای دستگاه DCP ، با بررسی داده‌های مربوط به پارامترهای حوضچه تغییرشکل، نقاطی جهت انجام آزمایش انتخاب شدند که در آنها پارامترهای MLI و BLI مقدار مرزی را در معیار ارائه شده، داشته‌اند. به عنوان مثال، تعدادی نقطه که پارامتر BLI آنها ۴۰۰ میکرون بود جهت انجام آزمایش DCP انتخاب گردیدند. شاخص نفوذ معادل پارامترهای حوضچه افت و خیز در

جدول ۷. دامنه شاخص نفوذ و پارامترهای حوضچه تغییرشکل برای وضعیت‌های مختلف سازه‌های لایه‌های روسازی

وضعیت سازه‌ای روسازی	پارامترهای حوضچه تغییرشکل در روش مستقیم (میکرون)			شاخص نفوذ برای لایه‌های روسازی (ضربه / میلی‌متر)		
	BLI	MLI	LLI	PI_1	PI_2	PI_{Subg}
مناسب	< ۲۰۰	< ۱۰۰	< ۵۰	< ۱/۷	< ۱/۲	< ۸/۷
بحرانی	۲۰۰-۴۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۱/۲-۷/۹	۱/۲-۲/۱	۸/۱۷-۷
نامناسب	> ۴۰۰	> ۲۰۰	> ۱۰۰	> ۲/۹	> ۲/۱	> ۱۷

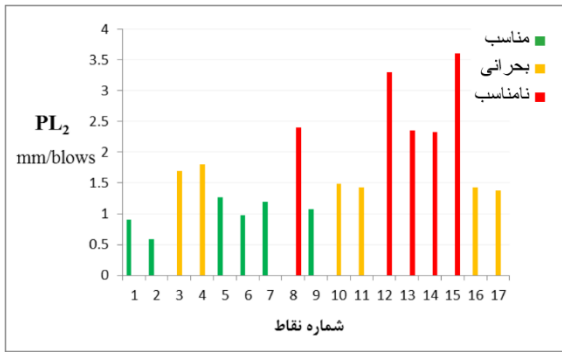


شکل ۱۵. وضعیت سازه‌های قسمت فوقانی لایه‌های خاکی بر

اساس PI_1

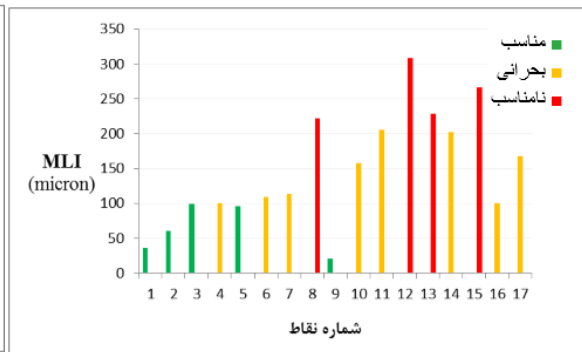
شکل ۱۴. همبستگی بین پارامتر LLI و شاخص نفوذ در بستر

روسازی



شکل ۱۷. وضعیت سازه‌ای قسمت میانی لایه‌های خاکی بر

اساس PI_2



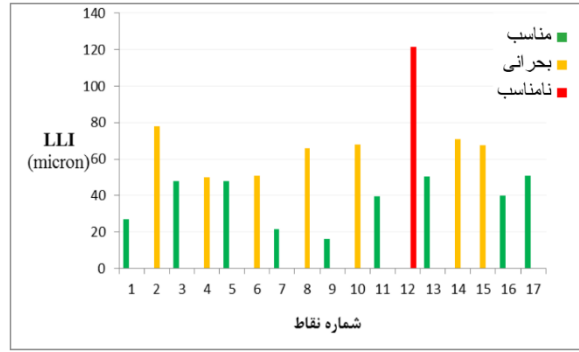
شکل ۱۶. وضعیت سازه‌ای قسمت میانی لایه‌های خاکی بر

اساس MLI



شکل ۱۹. وضعیت سازه‌ای قسمت زیرین لایه‌های خاکی و

بستر بر اساس PI_{subg}



شکل ۱۸. وضعیت سازه‌ای قسمت زیرین لایه‌های خاکی و

بستر بر اساس LLI

نقاط ۱۱ تا ۱۷ از شکل‌های ۱۴ الی ۲۰ مربوط به محور سنقر- قروه می‌باشند. این محور، ضمن داشتن خرابی‌های سطحی مانند ترک‌های خستگی، دارای شیارشدگی در طول مسیر می‌باشد. نمودارهای مربوط به پارامترهای حوضچه تغییرشکل نیز همین موضوع را نشان می‌دهد. به طوری که اکثر لایه‌های خاکی در این محور در شرایط بحرانی و ضعیف قرار دارند. از دلایل آن می‌توان به کیفیت نامطلوب مصالح و عدم زهکشی مناسب سطحی، نسبت به محور بیستون- سنقر، اشاره کرد.

شکل ۲۱، وضعیت نقطه شماره ۱۲ را نشان می‌دهد. همان طور که در تصویر مشاهده می‌شود، علاوه بر خرابی‌های سطحی، شامل ترک‌های پوست سوسماری و ترک‌های طولی و عرضی، ناهمواری و شیارشدگی مسیر چرخ ناشی از ضعف مصالح خاکی روسازی نیز وجود دارد. شاخص نفوذ

همانطور که در نمودارها مشخص می‌باشد، نتایج استفاده از شاخص نفوذ جهت ارزیابی سازه‌ای روسازی تقریباً در اکثر موارد مشابه نتایج پارامترهای حوضچه افت- و خیز در روش مستقیم می‌باشد. نقاط ۱ الی ۱۰ مربوط به محور بیستون- سنقر می‌باشد که در یک منطقه کوهستانی قرار دارد و مصالح مورد استفاده در لایه‌های خاکی دارای کیفیت مناسبی می‌باشند. در بررسی‌های میدانی می‌توان دریافت که ضمن وجود خرابی‌های سطحی، به دلیل مصالح با کیفیت مناسب، شیارشدگی و ناهمواری، که غالباً ناشی از ضعف مصالح زیرسازی و لایه‌های خاکی می‌باشد، در طول مسیر وجود ندارد. شکل ۲۰ وضعیت نقطه شماره ۳ را نشان می‌دهد که وضعیت آن مطابق وضعیتی است که در نمودارهای پیشین نشان داده شده است.

اساس محاسبه گردید. همچنین، شاخص نفوذ برای لایه ی زیراساس PI_2 و بستر روسازی PI_{Subg} همبستگی قابل قبولی (R^2 به ترتیب ۰/۸ و ۰/۷۱) با شاخص های MLI و LLI نشان داد.

د- همبستگی مناسب بین پارامترهای حوضچه تغییرشکل در لایه های مختلف با شاخص نفوذ بیانگر آن است که می توان از دستگاه DCP با قابلیت اطمینان مناسبی به عنوان یک معیار جدید جهت ارزیابی سازه روسازی در سطح شبکه از مدیریت روسازی استفاده کرد. محدوده تغییرات شاخص نفوذ برای وضعیت های مختلف سازه ای روسازی برای لایه های اساس، زیراساس و بستر روسازی به دست آمده و با استفاده از آن محورهای مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در اکثر موارد مشابه نتایج حاصل از پارامترهای حوضچه تغییرشکل بود.

ه- به علت محدودیت تعداد دستگاه های افت و خیزسنج ضربه ای در ایران، استفاده از دستگاه DCP، به دلیل ساده و ارزان بودن، برای ارزیابی سازه روسازی، به ویژه در سطح شبکه، برای سازمان های راهداری ضرورت داشته و سودمند خواهد بود.



شکل ۲۱. کیلومتر ۷/۵۰۹ از محور سنقر- قروه (نقطه شماره

(۱۲)

برای نقطه ۱۲ در شکل های ۱۴ الی ۱۹ نیز وضعیت نامطلوب سازه ای را برای این نقطه نشان می دهد.

۵. نتیجه گیری

الف- بین پارامترهای BLI، MLI و LLI حوضچه تغییرشکل و عدد سازه ای روسازی، همبستگی قابل قبولی برقرار می باشد. برای هر سه مورد، ضریب همبستگی حدوداً ۰/۸ به دست آمد.

ب- در بررسی همبستگی بین پارامترهای BLI، MLI و LLI حوضچه تغییرشکل با مدول الاستیسیته لایه ها، پارامتر BLI همبستگی خوبی ($R^2=0.84$) با مدول لایه آسفالتی و همبستگی کمی ($R^2=0.54$) با مدول لایه اساس نشان داد. همبستگی زیاد با مدول لایه آسفالتی احتمالاً به دلیل ضخامت زیاد رویه آسفالتی و تأثیر بیشتر آن نسبت به لایه اساس بوده است. پارامترهای MLI و LLI با ضریب به ترتیب $R^2=0.83$ و $R^2=0.79$ همبستگی خوبی با مدول لایه های زیراساس و بستر نشان دادند.

ج- شاخص نفوذ برای لایه اساس PI_1 همبستگی کمی با پارامتر BLI نشان داد ($R^2=0.49$) که احتمالاً به دلیل تأثیرپذیری زیاد BLI از لایه ضخیم آسفالتی در این محورها بوده است. حال آنکه، شاخص نفوذ برای لایه



شکل ۲۰. کیلومتر ۸/۸۸۵ از محور بیستون- سنقر (نقطه

شماره ۳)

- AASHTO. 1993. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures". Retrieved from https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=1HRB12tBQNM&oi=fnd&pg=PR7&dq=AASHTO+Guide+for+Design+of+Pavement+Structures,+1993&ots=RrzpRydWze&sig=zQEIIkmnuLHcIBYnM1k9R_jNbdQ.
- ASTM D6951/D6951M-09. 2015. "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Berney IV, E. and Kyzar, J. 2012. "Evaluation of nonnuclear soil moisture and density devices for field quality control". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2310: 18-26.
- Carvalho, R., Stubstad, R., Briggs, R., Selezneva, O., Mustafa, E. and Ramachandran, A. 2012. "Simplified techniques for evaluation and interpretation of pavement deflections for network-level analysis". No. FHWA-HRT-12-023.
2. Freeme, C. R., De Beer, M. and Viljoen, A. W. 1987. "The behaviour and mechanistic design of asphalt pavements". *In: Proceedings, University of Michigan, July 13-17, Ann Arbor, MI*, pp. 333-343.
- Horak, E. 1987. "The use of surface deflection basin measurements in the mechanistic analysis of flexible pavements". *Proceedings of the Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA*.
- Horak, E. 2008. "Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters". *J. South Afr. Inst. Civ. Eng.*, 50(2): 2-9.
- Horak, E., Maree, J. and van Wyk, A. 1989. "Procedures for using impulse deflectometer (IDM) measurements in the structural evaluation of pavements". *Annual Transportation Convention*. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1180855>.
- Horak, E., Emery, S. and Maina, J. 2015. "Review of falling weight deflectometer deflection benchmark analysis on roads and airfields". *Conference on Asphalt Pavements, South Africa (CAPSA), Sun City, August*. Retrieved from http://www.profemery.info/papers/2015_FWDbenchmark.pdf
- Hossain, M., Chowdhury, T., Chitrapu, S. and Gisi, A. J. 2000. "Network-level pavement deflection testing and structural evaluation". *J. Test. Eval.*, 28(3): 199-206.
- Irwin, L.H., "Equipment and Methods for Deflection-Based Structural Evaluation of Pavements". *Proceedings – Forest Service Geotechnical Workshop – Ames, Iowa, 1979*.
- Maree, J. H. and Bellekens, R. J. L. 1991. "The effect of asphalt overlays on the resilient deflection bowl response of typical pavement structures". *Research Report RP 90/102, Department of Transport, Chief Directorate National Roads, Pretoria, South Africa*.
- Mejías-Santiago, M., García, L. and Edwards, L. 2015. "Assessment of material strength using dynamic cone penetrometer test for pavement applications". *In: Airfield and Highway Pavements 2015, American Society of Civil Engineers, Reston, VA*, pp. 837-848. <https://doi.org/10.1061/9780784479216.074>.
- Shahin, M. 2005. "Pavement management for airports, roads, and parking lots". Vol. 41). Retrieved from <http://extras.springer.com/2005/978-0-387-23464-9/Pamphlet/2011-01> Pamphlet Pavement Management.pdf.
- Zhang, Z., Manuel, L., Damnjanovic, I. and Li, Z. 2003. "Development of a new methodology for characterizing pavement structural condition for network-level applications". *Texas Department of Transportation, Austin, TX*.

