

ارزیابی سازه‌ای روسازی با استفاده از پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز حاصل از دستگاه FWD

آرمین بامداد زیکساری، شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

در ارزیابی سازه‌ای روسازی راه با استفاده از دستگاه FWD تنش‌ی معادل بار چرخ محور استاندارد به روسازی اعمال و افت‌وخیز ناشی از آن در ۷ یا ۹ نقطه از امتداد محور راه اندازه‌گیری می‌شود. نمودار افت‌وخیز اندازه‌گیری شده در مقابل فاصله از مرکز بارگذاری، به عنوان کاسه انحناء افت‌وخیز روسازی شناخته می‌شود. با استفاده از پارامترهای D_{max} , SCI , BDI , BCI , $AREA$, $AUPP$, ISM , CDr که از کاسه انحناء افت‌وخیز روسازی تعیین می‌شوند، می‌توان وضعیت سازه‌ای روسازی را در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد. بدین منظور روسازی یک محور بطور نمونه انتخاب و پارامترهای کاسه انحنای افت‌وخیز در آن محاسبه شد. پس از تحلیل نتایج، مشخص گردید که تفسیر درست پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز روسازی در غیاب ضخامت لایه‌ها و انجام محاسبات بازگشتی، اطلاعات مفیدی از وضعیت سازه‌ای روسازی و بستر روسازی در اختیار قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: دستگاه FWD، کاسه انحناء افت‌وخیز، ارزیابی سازه‌ای.

عمق‌های مختلف و یافتن محل ضعف روسازی را میسر می‌سازد.

۱- مقدمه

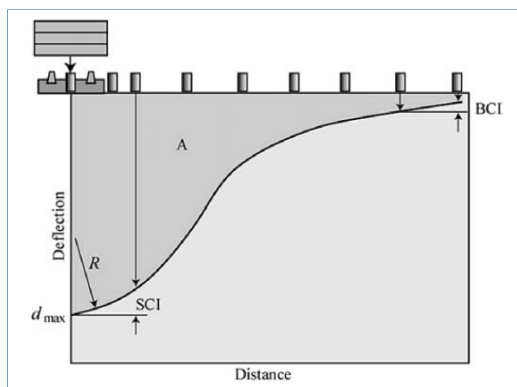
امروزه ارزیابی سازه‌ای روسازی راه به منظور ارائه طرح مناسب بهسازی با استفاده از دستگاه FWD انجام می‌شود. در ایران نیز طرح بهسازی روسازی راه در آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴ ویرایش ۱۳۹۰) با استفاده از دستگاه FWD و روش طراحی AASHTO93 انجام می‌شود [۱]. این دستگاه تنش معادل بار چرخ محور استاندارد به روسازی اعمال و افت‌وخیز ناشی از آن را در ۷ یا ۹ نقطه در امتداد حدود ۲ متر از مرکز بارگذاری اندازه‌گیری می‌کند. کاسه انحنای افت‌وخیز روسازی ناشی از اعمال تنش، در واقع نمودار افت‌وخیز اندازه‌گیری شده در مقابل فاصله از مرکز بارگذاری می‌باشد. بررسی شکل کاسه انحنای افت‌وخیز روسازی با استفاده از پارامترهای مختلف آن امکان ارزیابی سازه‌ای در

۲- دستگاه FWD

این دستگاه به منظور شبیه‌سازی واقعی حرکت چرخ کامیون، تنش‌ی در طی زمان ۱۰ الی ۴۰ میلی‌ثانیه به روسازی اعمال و افت‌وخیز ناشی از آن را از طریق تعدادی ژئوفون اندازه‌گیری می‌کند. زمان بارگذاری از طریق لاستیک‌های فشرده‌ای^۱ که در محل سقوط وزنه‌ها قرار گرفته به بار اعمال می‌شود. در شکل ۱ نمودار تغییرات تنش در نقطه A ناشی از حرکت چرخ وسیله نقلیه نشان داده شده است که حداکثر مقدار آن هنگامی اتفاق می‌افتد که چرخ درست در بالای نقطه A قرار می‌گیرد (شکل نیمه سینوسی). دلیل استفاده از لاستیک‌های فشرده در محل

1- Rubber Buffer

مورد استفاده قرار داد. پارامترهای مختلفی برای ارزیابی لایه‌ها و بستر روسازی از کاسه انحنای افت‌وخیز قابل استخراج است که در شکل ۳ تعدادی از آنها نشان داده شده است [2].

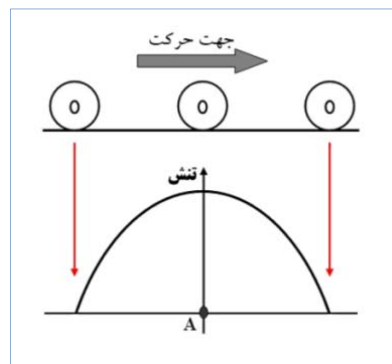


شکل ۳- کاسه انحنای افت‌وخیز و پارامترهای آن [2]

۳-۱- پارامتر D_{max}

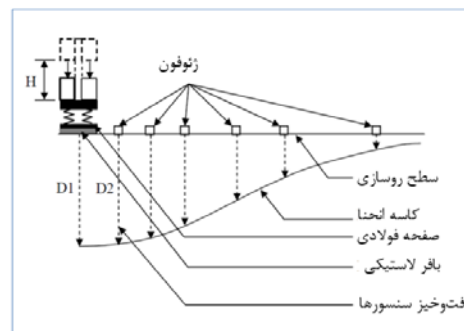
این پارامتر مقدار افت‌وخیز ژئوفون مرکزی دستگاه FWD است که درست در مرکز صفحه بارگذاری قرار دارد. D_{max} یکی از مهمترین پارامترهای کاسه انحنای افت‌وخیز محسوب می‌شود که در ارزیابی سطح شبکه و پروژه از آن بطور گسترده استفاده می‌گردد. این پارامتر به دمای لایه آسفالتی وابسته است و معمولاً در تحلیل، از مقدار اصلاح شده آن در دمای مرجع (۲۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌شود. این پارامتر پاسخ سازه‌ای کل سیستم روسازی را نشان می‌دهد، بنابراین هر گونه ضعف در لایه‌های روسازی و بستر باعث افزایش مقدار آن می‌گردد. در طرح بهسازی روسازی راه به روش AASHTO93 از افت‌وخیز اصلاح شده مرکز بارگذاری برای تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی (SN_{eff}) استفاده می‌گردد. با استفاده از نمودار تفاضلات تجمعی مقدار D_{max} می‌توان روسازی را به قطعات سازه‌ای همگن تقسیم نمود.

سقوط وزنه‌ها شبیه‌سازی بهتر تغییرات تنش در عمق روسازی ناشی از حرکت چرخ وسیله نقلیه می‌باشد.



شکل ۱- تغییرات تنش در نقطه A حین حرکت چرخ وسیله نقلیه

در شکل ۲ نمودار کاسه انحنای افت‌وخیز روسازی ناشی از بارگذاری با دستگاه FWD ارائه گردیده است. در برداشت میدانی هر نقطه از روسازی حداقل ۳ مرتبه بارگذاری می‌شود و از بارگذاری آخر برای محاسبات بازگشتی و تحلیل نتایج استفاده می‌گردد. آزمایش با دستگاه FWD در مسیر چرخ خارجی وسایل نقلیه انجام می‌شود و در هر نقطه حدود ۲ دقیقه بطول می‌انجامد. فاصله بین نقاط مورد آزمایش در طول راه به نوع پروژه بستگی دارد که معمولاً برای تحلیل‌های سطح پروژه ۵۰ تا ۲۰۰ متر و در سطح شبکه بیشتر از ۵۰۰ متر است.



شکل ۲- مکانیزم کار دستگاه FWD و کاسه انحنای افت‌وخیز روسازی

۳- پارامترهای کاسه انحنای افت‌وخیز

داده‌های افت‌وخیز بدست آمده از دستگاه FWD را می‌توان برای ارزیابی سازه‌ای اولیه روسازی و لایه‌های آن

۳-۲- پارامتر SCI

پارامتر SCI^۲ نشان دهنده انحناء کاسه افت‌وخیز در بخش ابتدایی آن است و سختی لایه‌های بالای روسازی تا عمق ۲۰ سانتی‌متر را بیان می‌کند. این پارامتر با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$SCI = d_0 - d_{200} \quad (۱)$$

$$SCI = d_0 - d_{300} \quad (۲)$$

که در آن d_0 مقدار افت‌وخیز در مرکز بارگذاری و d_{200} ، d_{300} به ترتیب مقدار افت‌وخیز در فاصله ۲۰۰ و ۳۰۰ میلیمتری از مرکز بارگذاری بر حسب میکرون می‌باشند. در ضخامت‌های کم لایه آسفالتی از رابطه ۱ استفاده می‌شود. با ترسیم نمودار SCI در طول پروژه می‌توان وضعیت سازه‌ای لایه آسفالتی را مورد ارزیابی قرار داد. مقدار زیاد این پارامتر در مقایسه با d_0 نشان دهنده ضعف در لایه آسفالتی است.

۳-۳- پارامتر BDI

پارامتر BDI^۳ وضعیت سازه‌ای لایه‌های میانی مانند اساس و زیراساس را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این پارامتر از اختلاف افت‌وخیز ژئوفونهای قرار گرفته در فواصل ۳۰۰ و ۶۰۰ میلیمتری از مرکز بارگذاری با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (۳)$$

با ترسیم نمودار BDI در طول پروژه و مقایسه آن با افت‌وخیز مرکزی می‌توان لایه میانی را از نظر سازه‌ای مورد ارزیابی قرار داد.

۳-۴- پارامتر BCI

پارامتر BCI^۴ وضعیت سازه‌ای لایه‌های تحتانی مانند لایه‌های غیرچسبنده زیر اساس و بستر روسازی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این پارامتر از اختلاف افت‌وخیز ژئوفونهای قرار گرفته در فواصل ۶۰۰ و ۹۰۰ میلیمتری از مرکز بارگذاری با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. رابطه ۵ و ۶ به ترتیب در کشورهای فنلاند و استونی برای محاسبه این پارامتر استفاده می‌شود.

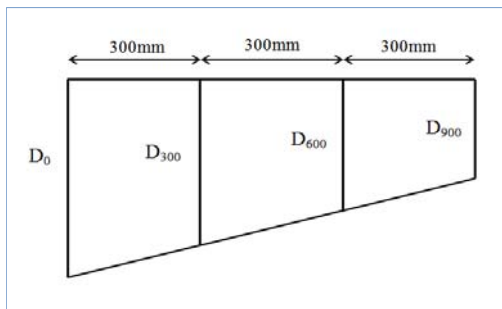
$$BCI = d_{600} - d_{900} \text{ (used in USA)} \quad (۴)$$

$$BCI = d_{900} - d_{1200} \text{ (used in Finland)} \quad (۵)$$

$$BCI = d_{1200} - d_{1500} \text{ (used in Estonia)} \quad (۶)$$

۳-۵- پارامتر AREA

یکی دیگر از پارامترهای مهم کاسه انحناء افت‌وخیز، AREA می‌باشد که بر خلاف واژه آن بر حسب میلیمتر یا اینچ گزارش می‌گردد. دلیل این مساله نرمال‌سازی این پارامتر با تقسیم مساحت بدست آمده از کاسه انحناء افت‌وخیز بر افت‌وخیز مرکزی است.



شکل ۴- کاسه انحناء افت‌وخیز برای تعیین پارامتر AREA

برای محاسبه این پارامتر از داده‌های افت‌وخیز ۴ ژئوفون (قرار گرفته در فواصل 0, 300, 600 and 900mm) مطابق شکل ۴ استفاده می‌گردد. مقدار پارامتر AREA با استفاده از رابطه ۷ بر حسب میلیمتر محاسبه می‌شود.

$$AREA = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0} \quad (۷)$$

2- Surface Curvature Index

3- Base Damage Index

4- Base Curvature Index

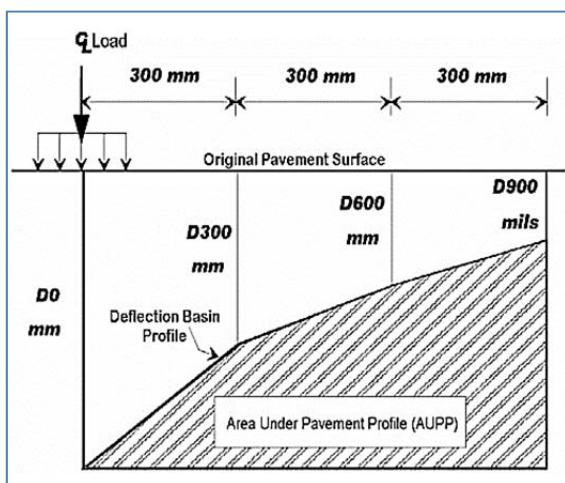
جدول ۲- تفسیر پارامتر AREA و افت و خیز مرکزی

تفسیر نتایج	AREA (mm)	D _{max} (micron)
روسازی ضعیف و بستر مقاومت بالایی دارد	کم	کم
روسازی ضعیف و بستر مقاومت پایینی دارد	کم	زیاد
روسازی و بستر مقاومت بالایی دارند	زیاد	کم
مقاومت روسازی بالا و بستر ضعیف است	زیاد	زیاد

۳-۶- پارامتر AUPP

پارامتر AUPP معرف مساحت بخشی از نمودار است که پایین پروفیل افت و خیز قرار دارد (سطح هاشور خورده شکل ۵) و از رابطه ۹ محاسبه می‌گردد. برای محاسبه این پارامتر از داده‌های افت و خیز ۴ ژئوفون (قرار گرفته در فواصل 0, 300, 600 and 900mm) استفاده می‌شود. پارامتر AUPP بیانگر سختی روسازی است و هرچه مقدار آن کمتر باشد، سختی روسازی بیشتر خواهد بود و برعکس.

$$AUPP = \frac{5d_0 - 2d_{300} - 2d_{600} - d_{900}}{2} \quad (9)$$



شکل ۵- کاسه انحناء افت و خیز برای تعیین پارامتر AUPP

۳-۷- پارامتر ISM

پارامتر سختی ضربه‌ای معرف مقدار نیروی مورد نیاز (P) جهت ایجاد یک واحد تغییر شکل حداکثر روسازی (D_{max}) می‌باشد (رابطه ۱۰). هر چه روسازی از نظر سازه‌ای قویتر باشد، مقدار نیروی بیشتری جهت ایجاد یک واحد

در صورتی که مقدار افت و خیز هر ۴ ژئوفون با هم برابر باشند ($d_0 = d_{300} = d_{600} = d_{900}$)، حداکثر مقدار 900 میلیمتر برای این پارامتر محاسبه می‌شود که نشان دهنده یک روسازی بتنی با توان باربری بالا می‌باشد. همچنین در یک روسازی تک لایه نیمه بینهایت همگن نسبت افت و خیز در فاصله r به افت و خیز مرکزی با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\frac{d_r}{d_0} = \frac{a}{f \times r} \quad (8)$$

که در آن a شعاع بارگذاری (برابر ۱۵ سانتی‌متر)، f ضریب توزیع تنش برابر ۲ در حالت توزیع یکنواخت و r فاصله از مرکز بارگذاری می‌باشد. با توجه به رابطه ۸ در یک سیستم تک لایه نیمه بینهایت همگن نسبت‌های $\frac{d_{300}}{d_0}$ ، $\frac{d_{600}}{d_0}$ و $\frac{d_{900}}{d_0}$ به ترتیب برابر 0.25، 0.125 و 0.083 خواهند شد که بر اساس آن پارامتر AREA 275 میلیمتر محاسبه می‌گردد. برای تعیین پارامتر AREA می‌توان از نرم‌افزار FWDAREA متعلق به دپارتمان حمل و نقل ایالت واشینگتن استفاده کرد. پارامتر AREA وضعیت سازه‌ای روسازی را نسبت به بستر نشان می‌دهد. در جدول ۱ رده روسازی‌های مختلف بر اساس پارامتر AREA ارائه شده است. همچنین با مقایسه مقدار AREA و افت و خیز مرکزی روسازی مطابق جدول ۲ وضعیت روسازی و بستر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

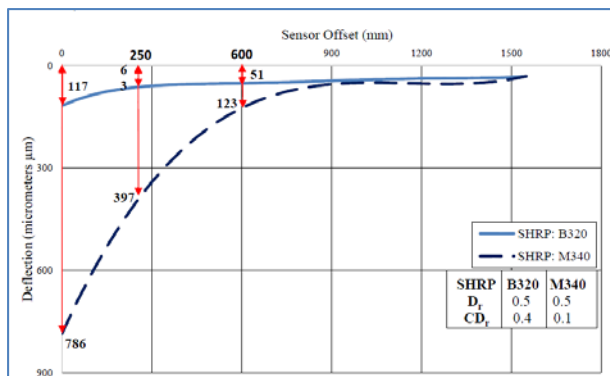
جدول ۱- رده‌بندی شاخص AREA

شاخص AREA (mm)	نوع روسازی
۶۱۰-۸۴۰	روسازی بتنی (صلب)
۵۳۰-۷۶۰	روسازی انعطاف‌پذیر با ضخامت لایه آسفالتی بزرگتر از ۱۰۰ میلی‌متر
۴۱۰-۵۳۰	روسازی انعطاف‌پذیر با ضخامت لایه آسفالتی کوچکتر از ۱۰۰ میلی‌متر
۳۸۰-۴۳۰	آسفالت حفاظتی (BST)
۳۰۰-۳۸۰	آسفالت حفاظتی ضعیف

5- Area Under Pavement Profile

6- Impulse Stiffness Modulus

لایه‌های دانه‌ای میانی در این شاخص در نظر گرفته نمی‌شود. در شکل ۶ کاسه انحنای افت‌وخیز دو مقطع روسازی با ضخامت‌های مختلف ارایه شده است. افت‌وخیز حداکثر روسازی M340 برابر ۷۸۶ و روسازی B320 برابر ۱۱۷ میکرون اندازه‌گیری شده است. مقدار شاخص D_r برای دو مقطع برابر ۰/۵ محاسبه می‌شود که وضعیت سازه‌ای مشابه دو مقطع را نشان می‌دهد در حالی که کاسه انحنای افت‌وخیز دو مقطع از نظر ظاهری کاملاً متفاوت است و روسازی B320 سختی بیشتری نسبت به روسازی M340 دارد.



شکل ۶- تاثیر نوع روسازی بر شاخص D_r

بمنظور رفع این مسئله نسبت افت‌وخیز جامع یا CD_r معرفی شده تا تاثیر لایه‌های دانه‌ای میانی بر رفتار روسازی در نظر گرفته شود. این پارامتر مشابه D_r است و تنها از افت‌وخیز در فاصله ۶۰ سانتی‌متری (D_{600}) بجای D_{250} استفاده می‌شود. در جدول ۴ وضعیت سازه‌ای روسازی بر اساس شاخص CD_r ارایه شده است.

جدول ۴- رده‌بندی سازه‌ای از نظر شاخص CD_r

شاخص CD_r	وضعیت سازه‌ای روسازی
بزرگتر از ۰/۵	خوب
۰/۳-۰/۵	متوسط
کوچکتر از ۰/۳	ضعیف

مقدار پارامتر CD_r برای دو روسازی B320 و M340 (مطابق شکل ۶) به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۴ محاسبه شده که

تغییر شکل آن مورد نیاز است. به عنوان مثال اگر پارامتر ISM یک نقطه از آزمایش FWD برابر ۵۰ نیوتن بر میکرون باشد، بیانگر آن است که یک میکرون تغییر شکل ژئوفون مرکزی با اعمال نیرویی به میزان ۵۰ نیوتن ایجاد خواهد شد.

$$ISM = \frac{P}{D_{max}} \quad (10)$$

تجربیات گذشته نشان می‌دهد که مقدار ISM در روسازی‌های آسفالتی از ۵۰ نیوتن بر میکرون برای روسازی بسیار ضعیف تا ۸۰۰ نیوتن بر میکرون برای روسازی با مقاومت بالا تغییر می‌کند. در روسازی‌های بتنی نیز این شاخص از ۴۰۰ نیوتن بر میکرون در روسازی ضعیف تا ۱۵۰۰ نیوتن بر میکرون در روسازی بتنی بالا مقاومت بالا متغیر است.

۳-۸- پارامتر نسبت افت‌وخیز جامع^۷

پارامتر نسبت افت‌وخیز یا D_r توسط اداره حمل‌ونقل کشور استرالیا و طبق رابطه ۱۱ بصورت نسبت افت‌وخیز در فاصله ۲۵۰ میلی‌متری مرکز بارگذاری به افت‌وخیز مرکزی جهت ارزیابی سازه‌ای روسازی استفاده می‌شود.

$$D_r = \frac{D_{250}}{D_{max}} \quad (11)$$

در جدول ۳ رده روسازی‌های مختلف بر اساس شاخص D_r ارایه شده است.

جدول ۳- رده‌بندی روسازی بر اساس شاخص D_r

شاخص D_r	نوع روسازی
بزرگتر از ۰/۸	روسازی آسفالتی
۰/۶-۰/۸	روسازی شنی با کیفیت خوب
کوچکتر از ۰/۶	روسازی شنی ضعیف

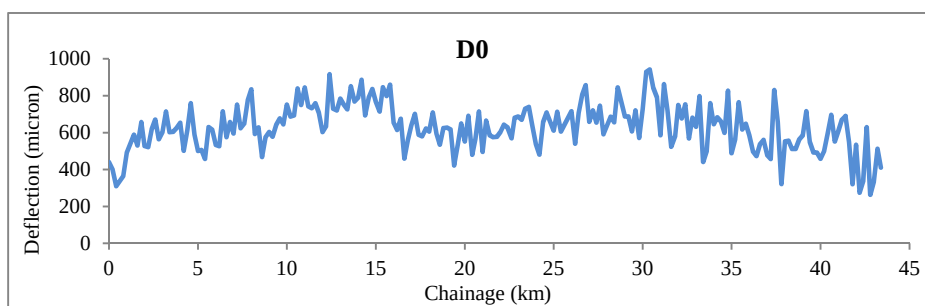
استفاده از این شاخص با اشکالاتی همراه می‌باشد. بدلیل نزدیکی افت‌وخیز D_{250} به محل بارگذاری تاثیر

راهنمای طراحی روسازی آشتو ۱۹۹۳ انجام می‌شود. در ادامه یک محور بطور نمونه انتخاب و از نظر پارامترهای کاسه انحنای افت‌وخیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. روسازی این محور دارای دولایه آسفالت به ضخامت کل ۱۰ سانتی‌متر و مجموع ضخامت لایه‌های اساس و زیر اساس ۳۰ سانتی‌متر است. در شکل ۷ نمودار افت‌وخیز مرکزی در طول محور با فواصل برداشت ۲۰۰ متری با دستگاه FWD ارائه شده است. میانگین مقدار افت‌وخیز مرکزی در این محور ۶۳۰ میکرون در اثر تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال (معادل تنش ناشی از چرخ محور استاندارد) می‌باشد که در رده افت‌وخیز زیاد قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر این محور از نظر سازه‌ای، ضعیف رده‌بندی می‌شود. این مطلب بخصوص در مقایسه با ترافیک بالای آن (تعداد محور عبوری معادل ۸۰ میلیون محور استاندارد در دوره طرح ۱۰ ساله) بوضوح اثبات می‌گردد.

روسازی M340 در رده ضعیف و روسازی B320 در رده متوسط از نظر سازه‌ای قرار می‌گیرد. لذا شاخص CD_r ارزیابی صحیح‌تری در مقایسه با شاخص D_r نتیجه می‌دهد که علت آن در نظر گرفتن رفتار لایه‌های دانه‌ای روسازی بر رفتار سازه‌ای آن است [4].

۴- تفسیر پارامترهای کاسه انحناء

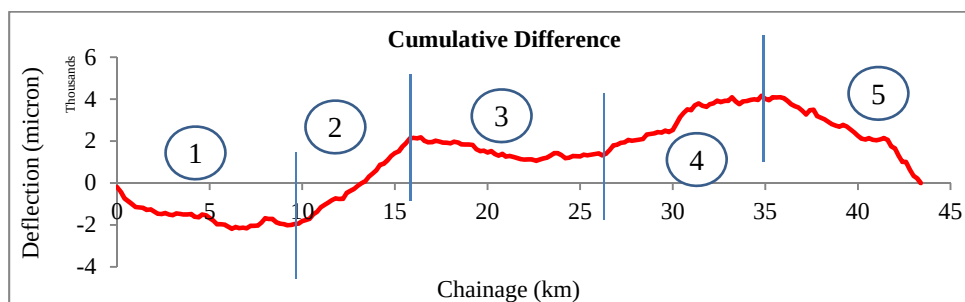
در این تحقیق ۸ مورد از پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز تشریح گردید که از آنها برای ارزیابی سازه‌ای لایه‌های مختلف روسازی استفاده می‌گردد. افت‌وخیز مرکزی مهمترین پارامتر کاسه انحناء افت‌وخیز می‌باشد که پاسخ سازه‌ای روسازی و بستر آن را مشخص می‌کند. از این پارامتر بیشتر برای قطعه‌بندی راه به منظور تعیین قطعات همگن سازه‌ای استفاده می‌شود. قطعه‌بندی با استفاده از روش تفاضلات تجمعی مطابق با پیوست J از



شکل ۷- نمودار افت‌وخیز مرکزی (افت‌وخیز حداکثر) در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

۱۹۹۳ می‌توان نمودار تفاضلات تجمعی را برای این محور ترسیم و قطعات همگن سازه‌ای را تعیین نمود [3].

با استفاده از مقدار میانگین افت‌وخیز مرکزی و روش مندرج در پیوست J از راهنمای طراحی روسازی آشتو

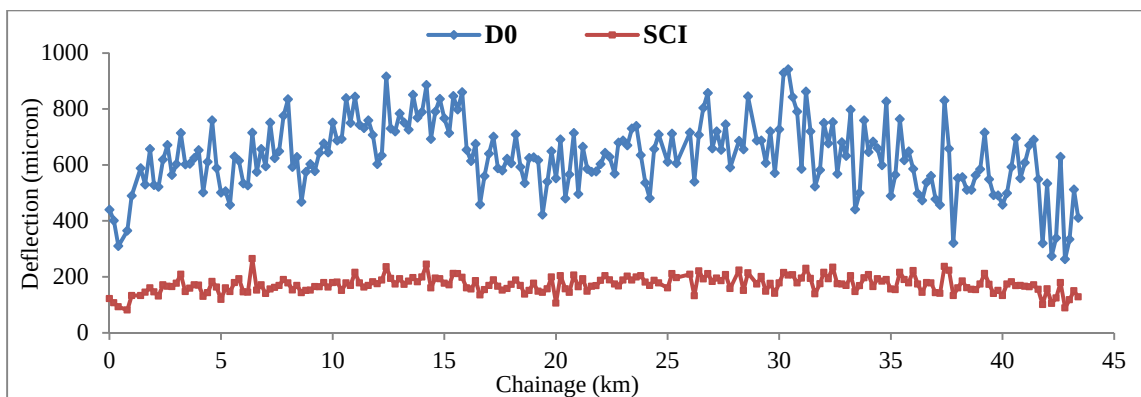


شکل ۸- قطعه‌بندی افت‌وخیز مرکزی (افت‌وخیز حداکثر) در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

مرکزی برای بررسی سازه‌ای کل سیستم روسازی و قطعه‌بندی آن استفاده می‌گردد.

به منظور بررسی وضعیت سازه‌ای لایه آسفالتی در شکل ۹ نمودار شاخص SCI به همراه افت‌وخیز مرکزی ترسیم شده است. برای ترسیم نمودار شاخص SCI با توجه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متری لایه‌های آسفالتی، از افت‌وخیز مرکز و افت‌وخیز در فاصله ۲۰ سانتی‌متری استفاده شده است.

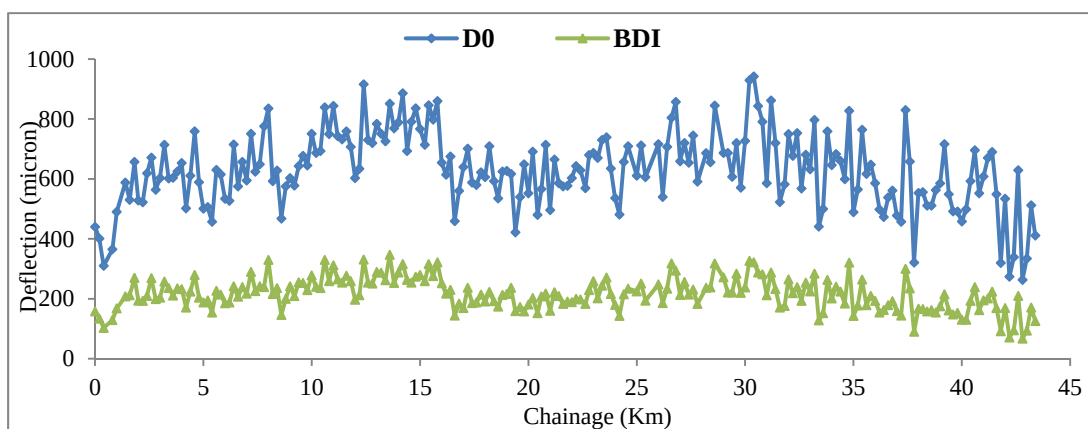
با توجه به نمودار شکل ۸ مشخص می‌گردد که محور مورد بررسی به ۵ قطعه همگن از نظر سازه‌ای تقسیم می‌شود که تحلیل هر یک از آنها بایستی بطور مجزا انجام شود. پس از انجام تحلیل و بررسی نتایج ممکن است تغییراتی در تعداد قطعات ایجاد شود. به عنوان مثال قطعه ۳ و ۴ در مرحله ارائه گزینه نگهداری ادغام و تعداد قطعات به ۴ تقلیل یابد. بنابراین از داده‌های افت‌وخیز



شکل ۹- نمودار شاخص SCI و افت‌وخیز مرکزی در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

ضعف روسازی حذف نمود. در شکل ۱۰ نمودار افت‌وخیز مرکزی و شاخص BDI (با استفاده از افت‌وخیز در فاصله ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از مرکز بارگذاری) ترسیم شده است. این شاخص وضعیت سازه‌ای لایه‌های دانه‌ای را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

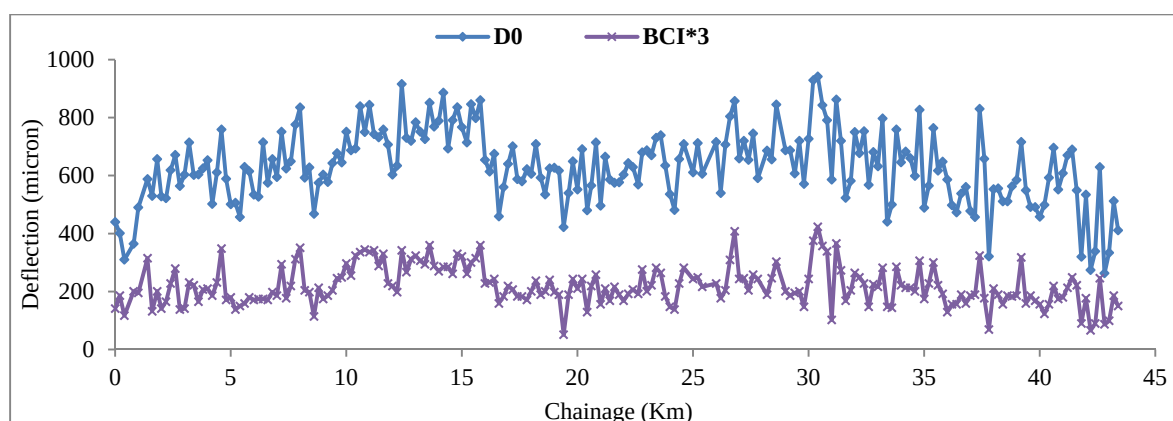
شاخص SCI نشان‌دهنده افت‌وخیز در لایه آسفالتی است که در محور مورد بررسی مقدار آن در محدوده ۲۰۰ میکرون نوسان دارد. شکل نمودار SCI چندان به رفتار کل سیستم روسازی و بستر (نمودار افت‌وخیز حداکثر) شباهت ندارد. لذا تا حدودی می‌توان لایه آسفالتی را از علت



شکل ۱۰- نمودار شاخص BDI و افت‌وخیز مرکزی در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

BCI که وضعیت سازه‌ای زیراساس و بستر را نشان می‌دهد در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در این شکل برای مشاهده بهتر مقدار شاخص BCI در طول راه در عدد ۳ ضرب شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود روند تغییرات دو شاخص مشابه یکدیگر است. لذا با بررسی شاخص‌ها مشخص می‌گردد که لایه‌های دانه‌ای روسازی دلیل اصلی ضعف سیستم می‌باشند.

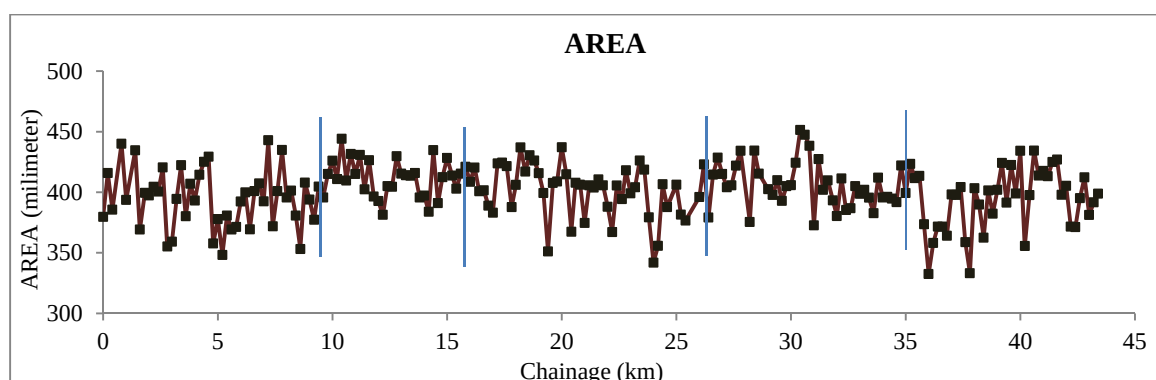
با وجود اینکه افت‌وخیزهای مورد استفاده در محاسبه شاخص BDI نسبت به شاخص SCI فاصله بیشتری از مرکز بارگذاری دارند اما در نمودار شکل ۱۰ شاخص BDI بزرگتر می‌باشد که نشان دهنده ضعف در لایه‌های دانه‌ای است. از طرف دیگر نمودار شاخص BDI تطابق بیشتری با نمودار افت‌وخیز مرکزی به عنوان رفتار کل سازه روسازی دارد. لذا می‌توان دلیل ضعف روسازی را در لایه‌های دانه‌ای جستجو کرد. روند مشابهی برای شاخص



شکل ۱۱- نمودار شاخص BCI و افت‌وخیز مرکزی در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

آسفالت حفاظتی (BST) طبقه‌بندی می‌شود. از طرف دیگر مطابق با جدول ۲ و با توجه به مقدار کم شاخص AREA و مقدار زیاد افت‌وخیز مرکزی، سازه روسازی و بستر این محور ضعیف ارزیابی می‌گردد.

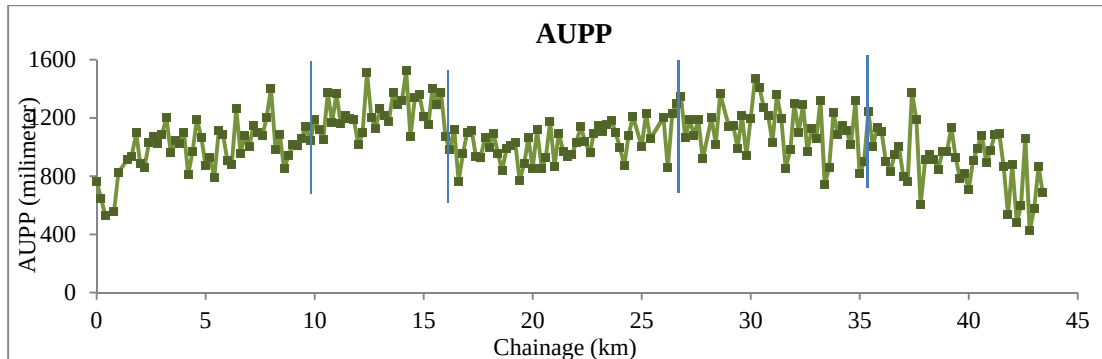
در شکل ۱۲ نمودار شاخص AREA در محور مورد بررسی ترسیم شده است. شاخص AREA وضعیت سازه‌ای روسازی را در مقابل بستر نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که مقدار این شاخص در حدود ۴۰۰ میلیمتر است. با توجه به جدول ۱ این روسازی در رده



شکل ۱۲- نمودار شاخص AREA در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

روسازی را نشان می‌دهد. شاخص AUPP قطعات همگن سازه‌ای ۲ و ۴ (مطابق شکل ۸) در مقایسه با سایر قطعات بیشتر است که ضعف بیشتر آن قطعات را نشان می‌دهد.

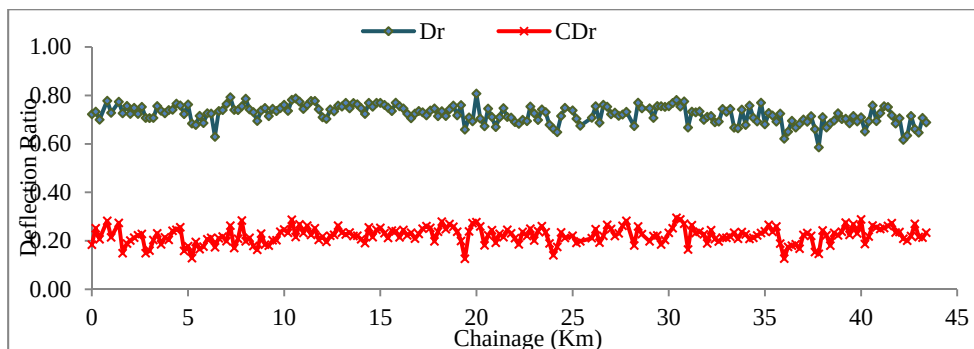
نمودار شاخص AUPP روسازی در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. میانگین این شاخص در تمامی قطعات همگن سازه‌ای از ۹۰۰ میلی‌متر بیشتر است که ضعف کل



شکل ۱۳- نمودار شاخص AUPP در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

با کیفیت خوب طبقه‌بندی می‌نماید. مقدار شاخص CD_r در طول محور از عدد ۰/۳ کمتر است که نشان‌دهنده وضعیت سازه‌ای ضعیف روسازی است.

بمنظور ارزیابی وضعیت سازه‌ای لایه‌های روسازی نمودار شاخص D_r و CD_r در شکل ۱۴ ترسیم شده است. مقدار شاخص D_r در طول محور از ۰/۷ الی ۰/۸ متغیر است که طبق جدول ۳ روسازی را در رده روسازی شنی

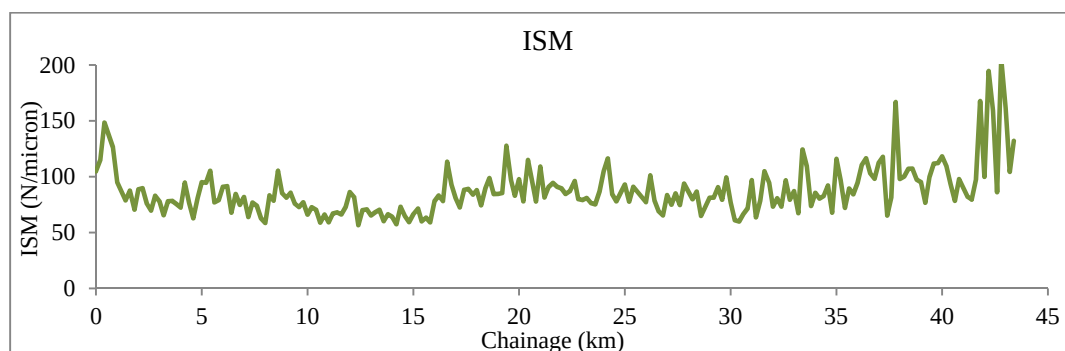


شکل ۱۴- نمودار شاخص CD_r و D_r در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال

ارائه شده است. قطعه‌بندی در طرح بهسازی روسازی راه بر اساس افت‌وخیز مرکزی انجام می‌شود. اما از نگاه کلان با توجه به مقادیر زیاد افت‌وخیز مرکزی و مقدار کم شاخص AREA می‌توان کل محور را در رده ضعیف طبقه‌بندی نمود. نتایج سایر پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز (ISM ، CD_r و AUPP) نیز موید ضعف سازه‌ای محور می‌باشد.

شاخص ISM که بیانگر مقدار نیروی لازم جهت ایجاد یک واحد افت‌وخیز حداکثر روسازی است، در شکل ۱۵ ارایه شده است. این شاخص در طول محور از ۴۰ تا ۱۵۰ نیوتن بر میکرون متغیر است که ضعف سازه‌ای قابل توجه روسازی را نشان می‌دهد.

در جدول ۵ مقادیر میانگین پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز در قطعات همگن سازه‌ای (بر اساس شکل ۸)



شکل ۱۴- نمودار شاخص ISM در سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال (معادل نیرویی برابر ۴۰/۳ کیلونیوتن)

جدول ۵- مقادیر پارامترهای کاسه انحناء در قطعات همگن سازه‌ای (سطح تنش ۵۷۰ کیلوپاسکال)

قطعه	ابتدا (km)	انتهای (km)	D_{max} (micron)	SCI (micron)	BDI (micron)	BCI (micron)	AREA (mm)	ISM (N/micron)	AUPP	CD_r
1	0	8.8	585	156	211	66	395	72	983	0.205
2	8.8	15.8	746	184	269	96	410	55	1218	0.228
3	15.8	26	615	173	203	68	401	67	1021	0.225
4	26	34.8	701	187	242	82	409	59	1145	0.230
5	34.8	43.4	552	165	175	62	395	78	927	0.223

۶- مراجع

[۱] آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه شماره ۲۳۴، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، تجدید نظر اول، ۱۳۹۰

- [2] Doré, G., Zubeck, H. K., 2009, Cold Regions Pavement Engineering, American Society of Civil Engineers, ASCE PRESS, MC Graw Hill.
- [3] AASHTO guide for design of pavement structure, American association of state highway and transportation official, 1983
- [4] Souliman, M., Romanoschi, S. and Dessouky, S., 2018, Simplified Approach for Structural Evaluation of Flexible Pavements at the Network Level, Transportation Consortium of South – Central States, Louisiana State University.

۵- نتیجه گیری

طرح بهسازی روسازی راه بر اساس نشریه شماره ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور با عنوان آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران ویرایش ۱۳۹۰ با استفاده از داده‌های افت‌وخیز دستگاه FWD انجام می‌شود. در این آیین نامه به منظور محاسبه SN_{eff} بایستی داده‌های افت‌وخیز و ضخامت لایه‌های روسازی در دسترس باشد. در این یادداشت فنی، ۸ پارامتر مهم از پارامترهای کاسه انحناء افت‌وخیز روسازی شامل D_{max} , SCI, BDI, BCI, AREA, ISM, AUPP و CD_r تشریح و تفسیر این شاخص‌ها در یکی از محورهای کشور به منظور ارزیابی سازه‌ای لایه‌های روسازی ارائه گردید. به کمک این شاخص‌ها می‌توان بدون داشتن ضخامت لایه‌های روسازی و انجام محاسبات بازگشتی پاسخ سازه‌ای لایه‌های روسازی و بستر را مورد ارزیابی قرار داد و علل ضعف سیستم روسازی را تعیین نمود.