



Research Article

Evaluation of Pavement Condition Index and Aging Using Spectroscopy Analysis of Asphalt Samples and Sentinel-2 Satellite Images (Case Study: Sabzevar- Shahrood Road)

Mehran Rostami^a, Saeid Gharechelou^b , Hosein Ghasemzadeh Tehrani^c

^a MSc. in Road and Transportation, Department of Geotechnics, Road and Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology Shahrood, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Department of Geotechnics, Road and Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology Shahrood, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Geotechnics, Road and Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology Shahrood, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-10

Revised: 2025-02-05

Accepted: 2025-02-08

Keywords:

Asphalt aging;
Spectral analysis;
PCI prediction;
Pavement distress;
Sentinel -2 image.

ABSTRACT

Predicting the budget for road construction and maintenance has been one of the most significant issues in government budget allocation. Early identification of road problems through preventive measures increases their lifespan and reduces maintenance costs. This study focuses on a 35-kilometer stretch of the Sabzevar-Shahrood road, located in a hot and dry region and serving as a transit path from east to west, where asphalt damage is frequently observed. To forecast the Pavement Condition Index (PCI) based on pavement age (AGE), systematic random sampling of asphalt was conducted at designated locations using GPS, followed by spectral analysis in a physics laboratory with a spectrometer. Optical images from Sentinel-2 were processed, utilizing green, blue, red, and near-infrared bands due to their 10-meter resolution and wavelengths ranging from 440 to 900 nanometers, which correspond closely to the asphalt response spectrum. Subsequent analyses involved extracting pixel values from the corresponding bands at the asphalt sampling sites within the Sentinel-2 satellite images and conducting statistical evaluations. The inverse relationship between AGE and PCI indicates that field analyses and calculations of distress indices were performed accurately, with their extension in band analysis as dependent variables being appropriately selected. In examining the relationship between the PCI and satellite imagery spectroscopy for predicting distress indices, the near-infrared band (B8) exhibited superior performance with a coefficient of determination ($R^2 = 0.48$) compared to other bands, demonstrating relatively high accuracy that can be extended to other distress indicators such as the Pavement Serviceability Index (PSI). Given the average spatial resolution of 10 meters for the selected bands from Sentinel-2, a relatively low convergence coefficient ($R=0.323$) was observed in this analysis concerning pavement distress dimensions. Furthermore, in assessing the relationship between pavement age (AGE) and satellite imagery spectroscopy for predicting pavement age, the near-infrared band (B8) outperformed other bands with a coefficient of determination $R^2 = 0.55$. In this analysis, higher convergence coefficients ($R=0.56$) were noted, suggesting that higher wavelength numbers in spectroscopy indicate younger pavement conditions. Traffic load significantly influences pavement distress; additionally, employing existing criteria for random sample selection plays a crucial role in determining distress indices and final analytical outcomes. Therefore, Sentinel-2 satellite images in the near-infrared band with a resolution of 10 meters demonstrated better correlation with age and distress indices of roads. However, these images will perform more effectively on roads wider than 10 meters.

* Corresponding author

E-mail address: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

How to cite this article: Gharechelou, S. , Rostami, M. and Ghasemzadeh Tehrani, H. (2025). Evaluation of pavement condition index and aging using spectroscopy analysis of asphalt samples and Sentinel-2 satellite images (Case Study: Sabzevar- Shahrood Road). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 75-94. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35864.1698>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص خرابی و سن روسازی راه با استفاده از تحلیل طیف‌سنجی نمونه‌های آسفالتی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (مطالعه موردی: جاده سبزوار- شاهرود)

مهران رستمی^۱، سعید قره‌چلو^{۲*}، حسین قاسم‌زاده طهرانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد راه و ترابری، گروه ژئوتکنیک- راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

^۲ استادیار، گروه ژئوتکنیک- راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

^۳ استادیار، گروه ژئوتکنیک- راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

چکیده

پیش‌بینی بودجه ساخت و تعمیر راه‌ها یکی از مهمترین مسائل در تخصیص بودجه دولت‌ها بوده است. شناسایی زودهنگام مشکلات راه‌ها با اقدامات پیشگیرانه باعث افزایش عمر و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها می‌شود. در این پژوهش، ۳۵ کیلومتر از محور سبزوار- شاهرود به دلیل قرار گرفتن در منطقه گرم و خشک و مسیر ترانزیت شرق به غرب، که همواره خرابی‌های آسفالتی در آن مشهود است، در نظر گرفته شد. به منظور پیش‌بینی شاخص خرابی روسازی (PCI) براساس عمر روسازی و عمر روسازی (AGE)، ابتدا در محل‌های تعیین‌شده با استفاده از GPS به‌صورت تصادفی سیستماتیک و نظر کارشناسی نمونه‌های آسفالت برداشت شد و در آزمایشگاه فیزیک آنالیز طیفی با استفاده از دستگاه اسپکترومتر صورت پذیرفت. تصاویر آپتیکی سنتینل-۲ پردازش شد و سپس از باندهای سبز، آبی، قرمز و مادون‌قرمز نزدیک به علت توان تفکیک ۱۰ متری و طول موج بین ۴۴۰ تا ۹۰۰ نانومتر، که مشابه طیف پاسخ آسفالت بود، استفاده گردید. در ادامه، با استفاده از نتایج طیف‌سنجی نمونه‌های آسفالت و استخراج ارزش پیکسلی باندهای متناظر در محل نمونه‌های آسفالت از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ استخراج و تحلیل‌های آماری انجام شدند. رابطه معکوس بین AGE و PCI نشان‌دهنده این است که تحلیل‌های میدانی و محاسبه شاخص‌های خرابی به درستی صورت گرفته است و بسط آنها نیز در تحلیل باندها به عنوان متغیرهای وابسته درست انتخاب شده است. در ارتباط بین شاخص خرابی راه (PCI) و طیف‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی شاخص خرابی، باند مادون قرمز نزدیک (B8) با ضریب تعیین ($R^2=0/48$) عملکرد بهتری نسبت به سایر باندها داشته و از دقت نسبتاً بیشتری برخوردار بود که می‌توان آن را به سایر شاخص‌های خرابی مانند شاخص عملکرد روسازی (PSI) بسط داد. با توجه به توان تفکیک مکانی متوسط (۱۰ متر) باندهای انتخاب شده ماهواره سنتینل-۲ در مقایسه با ابعاد خرابی‌های روسازی، ضریب همگرایی نسبتاً کم ($R=0/323$) در این تحلیل وجود داشت. در ارتباط بین شاخص سن روسازی (AGE) و طیف‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی سن روسازی باند مادون قرمز نزدیک (B8) با ضریب تعیین ($R^2=0/55$) عملکرد بهتری نسبت به سایر باندها داشت. در این تحلیل، ضرایب همگرایی ($R=0/56$) بیشتر بوده و می‌توان عنوان کرد که اعداد طول موج‌های بالای طیف‌سنجی، سن کمتر روسازی را نشان می‌دهند. در بررسی خرابی‌های روسازی، عبور بار ترافیکی نقش مهمی دارد. همچنین، استفاده از معیارهای موجود انتخاب نمونه‌های تصادفی نقش مهمی در تعیین شاخص‌های خرابی و نتایج نهایی تحلیل دارند. لذا تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در باند مادون قرمز نزدیک با اندازه تفکیک ۱۰ متر، همبستگی بهتری با شاخص‌های سن و خرابی راه نشان دادند. البته این تصاویر در جاده‌های با عرض بیشتر از ۱۰ متر، برای پیش‌بینی خرابی عملکرد، کارایی مناسب‌تری خواهند داشت.

واژگان کلیدی:

سن روسازی آسفالتی،

پیش‌بینی خرابی،

طیف‌سنجی باندی،

شاخص خرابی روسازی،

داده‌های ماهواره سنتینل-۲

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

استناد به این مقاله: قره چلو، سعید، رستمی، مهران و قاسم زاده طهرانی، حسین. (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص خرابی و سن روسازی راه با استفاده از تحلیل طیف سنجی نمونه های آسفالتی و تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ (مطالعه موردی: جاده سبزوار -شاهرود). مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۴)

۹۴-۷۵، <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35864.1698>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

ساخت راه‌ها و روسازی آنها یکی از پرهزینه‌ترین زیرساخت‌های کشور می‌باشد که پیش‌بینی بودجه آن در هر دوره و تأمین اعتبار کافی برای این منظور چالشی است که مدیران عالی همواره با آن مواجه هستند. مدیریت روسازی جاده‌ها یک فرآیند ملی محسوب می‌شود که بخش قابل ملاحظه‌ای از بودجه صرف بهسازی، حفظ و نگهداری آنها می‌شود (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از انواع اقدامات نگهداری باعث می‌شود تا روسازی دیرتر از حد معمول دچار خرابی گردد یا سرعت تخریب روسازی کاهش یابد که این امر بدون در نظر گرفتن اقدامات مدیریتی امکان‌پذیر نخواهد بود. در این راستا، عملیات حفظ و نگهداری باید در اولویت قرار گیرد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۹). لذا برای آنکه مدیریت و نگهداری روسازی در سطح و کیفیت قابل قبولی صورت پذیرد نیاز به یک سیستم پشتیبانی مدیریتی می‌باشد (جلیل‌هاشمی و دیواندری، ۱۳۹۷). یکی از بزرگترین مشکلات در مدیریت روسازی و زیرساخت‌های آن تشخیص و پیش‌بینی خرابی برای استفاده از اقدامات پیشگیرانه و تعمیرات اولیه به موقع است. شناسایی زود هنگام خرابی‌های نیازمند تعمیر با اقدامات پیشگیرانه، باعث افزایش عمر مفید روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود (نوبخت و میناگر، ۱۳۹۰). از جمله مهمترین عوامل طبیعی و انسانی که موجب آسیب رسانیدن به آسفالت می‌شود می‌توان به سن آسفالت، اکسیداسیون، دمای بسیار زیاد و بسیار کم، بار ترافیکی سنگین و کیفیت مواد مورد استفاده در آسفالت اشاره کرد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، بررسی بعضی از خرابی‌ها مانند ترک‌خوردگی، پیرشدگی و شیارشدگی فقط با بازرسی‌های میدانی از جاده‌ها جهت بهبود و حفظ کارایی انجام می‌شود. در سال‌های گذشته،

به منظور پایش خرابی‌های موجود در سطح روسازی راه از بازدیدها و نمونه‌برداری‌های میدانی استفاده می‌شد که بسیار زمان‌بر و پرهزینه بود (فخری و شهنی دزفولیان، ۱۳۹۷). در سال‌های اخیر از آزمون‌های غیرمخرب مانند آزمون‌های GPR، RSP و FWD استفاده می‌شود. هم‌اکنون استفاده از داده‌های سنجش از دور در مدیریت روسازی گسترش پیدا کرده است که به بررسی تغییرات کیفیت روسازی با استفاده از پردازش تصاویر می‌پردازد. استفاده از داده‌های با دقت زیاد سنجش از راه دور جهت تکمیل مطالعات میدانی و کاهش خطرات بالقوه می‌تواند بسیار کارآمد باشد (متاس و همکاران، ۲۰۲۰). در این زمینه، محققین زیادی در داخل و خارج از کشور به مطالعه پرداخته‌اند برای مثال، تقی‌پور و همکاران در سال (۱۳۹۷)، با بررسی تصاویر پهپادی به پدیده فرسودگی آسفالت و خرابی‌های پیری و شیارشدگی در روستای الوار سفلی تبریز پرداختند. آنها از تصاویر طیفی که شامل باندهای سبز، قرمز، آبی و مادون قرمز نزدیک که در محدوده امواج مرئی بودند، برای پیری آسفالت استفاده کردند و همچنین از تصاویر پهپادی برای بررسی پدیده تنش و برای شیب عرضی از لایه مدل رقوم سطحی (DSM 1) استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تصاویر تهیه شده توسط پهپاد برای اهداف ارزیابی و ترمیم آسفالت جاده‌ها قابل کاربرد می‌باشند. نتایج صحت‌سنجی مبتنی بر ماتریس خطا، ضریب کاپا و صحت کلی انطباق ۹۵ درصدی بین نتایج طبقه‌بندی و مطالعات میدانی بود که دقت بالا و صحت نتایج بر اساس نمونه‌های میدانی را نشان می‌داد. شهبان‌مقدم و همکاران (۱۳۹۶) به تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی آسفالتی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل پرداختند. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی نشان داد که طبقه‌بندی تصاویر

¹⁻ Digital Surface Model

آسفالت‌ها و همچنین نقشه‌برداری از شرایط آسفالت می‌باشد (شاهی و همکاران، ۲۰۱۵).

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی و تحلیل پاسخ طیفی بانندی روسازی آسفالتی در محل‌های نمونه‌برداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در راستای دست یافتن به کیفیت و سن روسازی در محدوده ۳۵ کیلومتر از محور سبزوار- شاهرود می‌باشد. بنابراین، با مقایسه و ارتباط داده‌های طیف‌سنجی باندها با کیفیت واقعی روسازی می‌توان جهت بررسی پیشینه خرابی راه و عمر روسازی و همچنین پیش‌بینی خرابی با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. محدوده مورد مطالعه

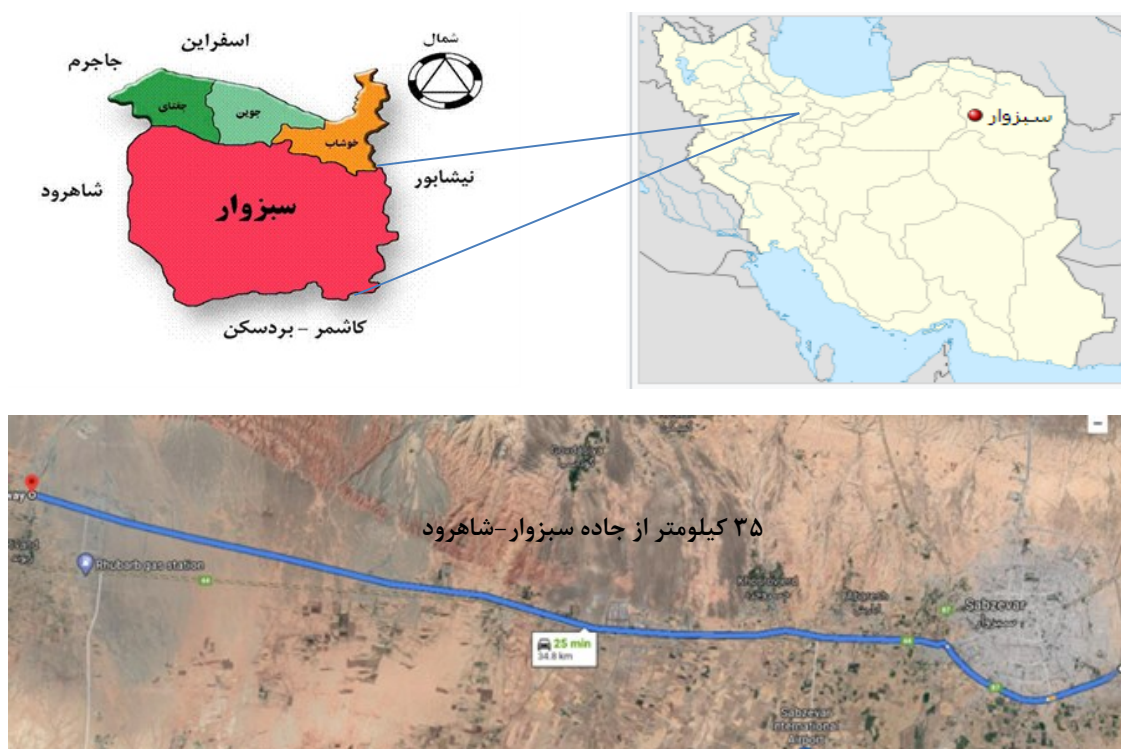
شهرستان سبزوار در غرب استان خراسان رضوی، با مختصات جغرافیایی ۳۶° شمالی و ۵۷° شرقی در شمال شرق ایران واقع شده، که بر اساس آخرین تقسیمات کشوری دارای دو بخش مرکزی و روداب است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل ۳۵ کیلومتر از ابتدای کمربندی باند شمالی محور سبزوار- شاهرود تا ابتدای روستای ریوند است (شکل ۱). جنس روکش از آسفالت گرم بوده که عرض کمترین قسمت جاده ۷/۲ متر و بیشترین عرض آن ۱۰ متر می‌باشد. این مسیر به دلیل واقع شدن در مسیر جاده ابریشم و جزیی از محور اصلی شرق به غرب کشور دارای بارهای ترافیکی و ترانزیتی زیاد و سنگین می‌باشد.

۲-۲. آماده‌سازی داده‌ها و روش تحقیق

پس از بازرسی‌های میدانی و ارزیابی خرابی‌های موجود، شاخص خرابی جاده (PCI) و عمر روسازی (AGE) برای تمامی مسیر مورد مطالعه محاسبه شد.

خرابی توسط آنالیز بافت تصویر در حوزه تبدیل نسبت به حوزه مکان نتایج دقیق‌تری دارد. دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل به طور میانگین برابر با ۶۷ درصد بوده، در حالی که دقت طبقه‌بندی داده‌های خرابی مبتنی بر استخراج ویژگی‌های بافتی در حوزه مکان برابر با ۴۹/۷۶ درصد بود. ریگ-آبادی و همکاران (۲۰۲۱)، به توسعه مدل پیش‌بینی دمای روسازی بر اساس داده‌های سنجنش از دور و شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از آزمون افت فشار سطح پرداختند. آنها داده‌های ورودی ماهواره را برای توسعه سه مدل شبکه عصبی خطی، غیرخطی و مصنوعی در عمق‌های ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر در لایه‌های مختلف روسازی آسفالت مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که دمای پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به دمای اندازه‌گیری شده از داده‌های سنجنش از دور بوده است که ضرایب همبستگی آن بین ۰/۷۹ تا ۰/۹۹ قرار داشت. پن و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از تصاویر سنجنش از دور فراطیفی به بررسی شکاف‌های موجود در روسازی آسفالتی پرداختند که به دلیل فرسودگی سطحی، ترکیبات شیمیایی متفاوتی داشتند. آنها دریافتند که خصوصیات مواد سطح جاده منجر به ایجاد یک کتابخانه طیفی می‌شود که به راحتی در تصاویر فراطیفی قابل تشخیص است که این شرایط تشخیص ترک‌ها و چاله‌ها را تسهیل می‌کند. متاس و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از تصاویر سنجنده لندست-۷ به بررسی نقایص موجود در راه‌های آسفالتی شهر پافوس در قبرس پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که پیری آسفالت با شدت بازتاب از سطح آسفالت رابطه معکوس دارد، به‌طوری که آسفالت جوان بازتاب بیشتری نسبت به آسفالت پیر دارد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بیشترین استفاده از داده‌های سنجنش از دور به منظور طیف‌سنجی برای مطالعه بر سطوح ترک‌خوردگی

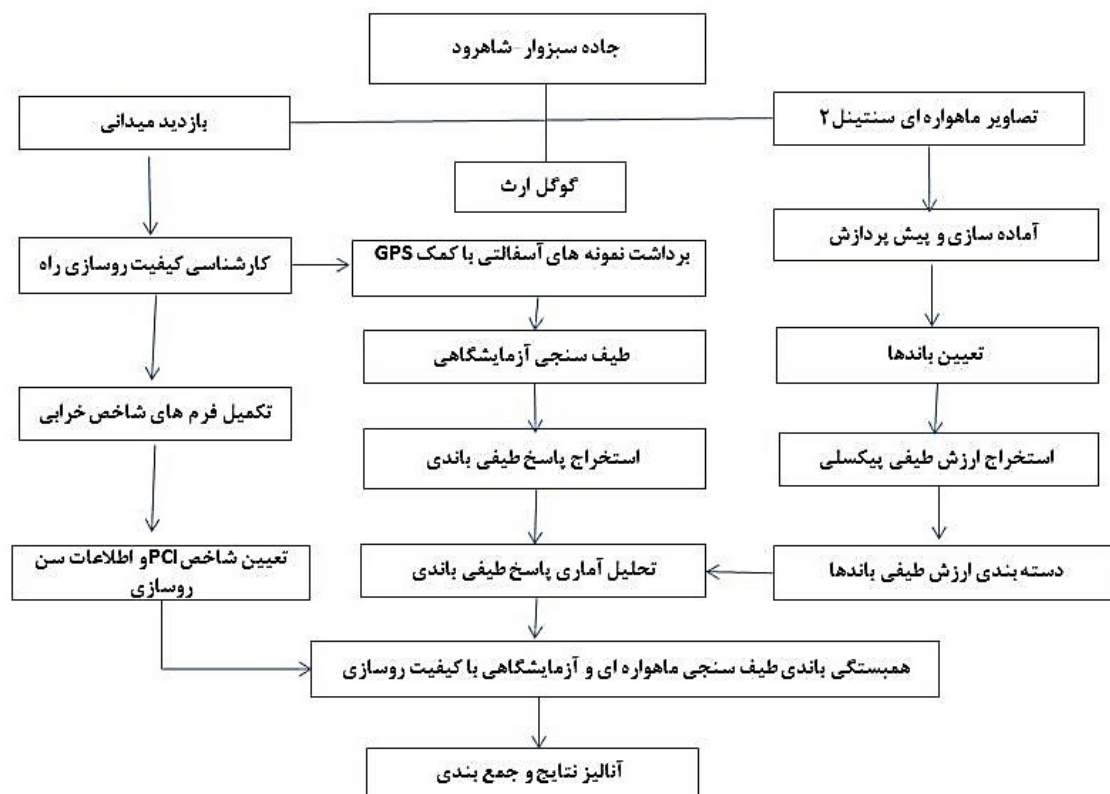
^۱- Pavement Condition Index



شکل ۱. موقعیت شهرستان سبزوار و محدوده مسیر مورد مطالعه از شهر سبزوار در شرق تصویر تا روستای ریوند در غرب (۳۵ کیلومتر از جاده سبزوار-شاهرود) که روی تصویر گوگل ارث نمایش داده شده است

خطاهای موجود و افزایش آشکارسازی جزئیات بر تصاویر صورت گرفت، مقدار طیف بازتاب برای نقاط منتخب استخراج شده و با شاخص خرابی و عمر روسازی محاسبه شده مقایسه گردید. در شکل ۲، مراحل انجام تحقیق نشان داده است.

از باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ که به ترتیب باندهای قرمز، سبز، آبی و مادون قرمز نزدیک با تفکیک مکانی ۱۰ متری (پیکسل‌های تصویر ابعاد ۱۰×۱۰ متر هستند) و طول موج‌های بین ۴۴۰ تا ۹۰۰ نانومتر که نزدیک به طیف بازتاب آسفالت بودند استفاده شد. بعد از اینکه تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفریک جهت حذف



شکل ۲. فلوچارت کلی مراحل انجام تحقیق

بررسی در این پژوهش می‌باشد. مساحت اولیه برای هر نمونه حدود ۲۸۰ تا ۳۰۰ متر مربع بود که با توجه به عرض ۱۰ متری جاده، برای هر نمونه طول ۳۰ متر انتخاب شد. واحدهای نمونه به صورت قطعات منظم و با فاصله ۶۰ متری از هم دسته‌بندی شدند. در هر واحد نمونه، جزئیات وضعیت روسازی سنجیده شده و مختصات جغرافیایی تمام خرابی‌های موجود به کمک GPS^۱ با خطای کمتر از ۵۰ سانتی‌متر ثبت شدند. در شکل ۳، تصویر تعدادی از خرابی‌های مورد بررسی نشان داده شده است.

به منظور محاسبه شاخص PCI، بررسی‌های میدانی و برداشت و ثبت اطلاعات خرابی‌های روسازی موجود الزامی می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق، تمام مسیر با در نظر گرفتن بار ترافیکی، عمر روسازی و نحوه روکش و تعمیر و نگهداری به هشت قطعه حدود چهار تا شش کیلومتر تقسیم شد و در هر قطعه واحدهای نمونه به صورت تصادفی انتخاب شدند. برای نمونه‌برداری، از قطعه شماره یک در ابتدای مسیر سبزوار-شاهرود شروع گردید. این قطعه به علت متصل بودن به شهر سبزوار و عبور بارهای ترافیکی سنگین، جزو مهمترین نقاط مورد

^۱ - Global Positioning System



شکل ۳. نمونه خرابی‌های ثبت شده در قطعه شماره یک در ابتدای مسیر مورد مطالعه در جاده سبزوار- شاهرود

۳-۲. شاخص شرایط روسازی

شاخص وضعیت روسازی (PCI) عددی بدون بعد برای اندازه‌گیری سلامت روسازی است که مورد پذیرش استاندارد (ASTM)^۱ می‌باشد. اساس نمره‌دهی آن در محدوده بین صفر تا ۱۰۰ می‌باشد که صفر نمایانگر راه با کیفیت بسیار پایین و ۱۰۰ نشان‌دهنده روسازی بدون نقص است (هرولد و همکاران، ۲۰۰۸). هر خرابی در سه سطح کم، متوسط و زیاد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با محاسبه میزان کاهش کیفیت مربوط به هر خرابی در نهایت نمره‌دهی روسازی تعیین می‌شود (وو، ۲۰۱۵). این شاخص بر اساس انواع خرابی‌ها از جمله ترک‌های روسازی، شیارها، چاله و قیرزدگی می‌باشد (فخری و شهنی دزفولیان، ۱۳۹۷). بنابراین محاسبه آن نیازمند جمع‌آوری اطلاعات در باره معایب روسازی، اندازه و شدت آنهاست. این شاخص در بسیاری از کشورهای دنیا برای اندازه‌گیری سلامت انواع راه‌ها کاربرد دارد. شاخص وضعیت روسازی راه نخستین بار توسط ارتش آمریکا معرفی شد. اما فرایند محاسبه آن امروزه توسط ASTM

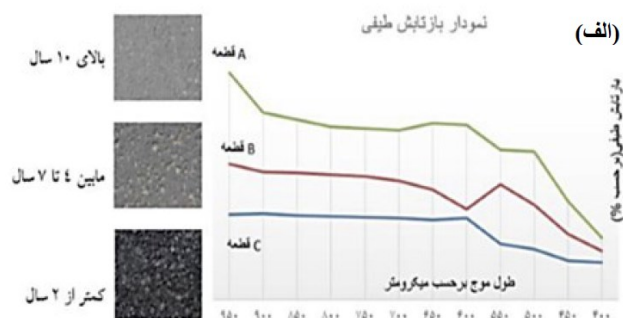
استانداردسازی شده است (عبدالطیف و همکاران، ۲۰۱۹). برای محاسبه PCI لازم است که برای هر نوع خرابی و هر سطح شدت آن (درصد خرابی) ضرایب کاهندگی را از منحنی‌های مربوط به ضرایب کاهندگی هر نوع خرابی استخراج نمود و پس از آن برحسب تعداد ضرایب کاهندگی مجاز و سایر مراحل درج شده در نشریه ۲۹۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی در خصوص نحوه محاسبه PCI، تحلیل هر نمونه انجام می‌گردد. پس از آن با PCI متوسط می‌توان اظهار نظر کارشناسی را در خصوص وضعیت روسازی راه اعلام کرد (وو، ۲۰۱۵) که در این تحقیق نیز بر همین اساس اقدام شده است. به عبارت دیگر، تأثیر خرابی‌ها به‌دست می‌آید و بدین صورت عمل می‌کند که هرچه CDV^2 (ضریب کاهندگی اصلاح شده) بزرگتر باشد خرابی‌های کوچکتر کمتری در محاسبه PCI دخالت داده می‌شود (رادوپولو و بریلاکیس، ۲۰۱۵). سپس این چرخه آنقدر ادامه پیدا می‌کند که بیشترین CDV به‌دست آمده از عدد ۱۰۰ کم می‌شود. روابط (۱) و (۲) نحوه محاسبه PCI را نشان می‌دهند

^۱- American Society for Testing and Materials

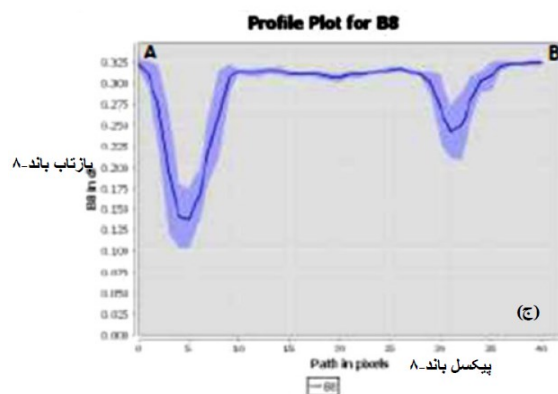
^۲- Corrected Deduct Value

را از دست داده و روشن‌تر می‌شود و در نتیجه بازتاب سطحی آن بیشتر می‌شود. برعکس آسفالت قدیمی‌تر که تیره‌تر است بازتاب طیفی کمتری از خود نشان می‌دهد و این موضوع در تحقیق سایر محققان نیز اشاره شده است. (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷ و نیکولائو، ۲۰۱۶).

را بر روی باند ۸ سنتینل-۲ نشان می‌دهد. از رفتار بازتاب طیفی نمودار می‌توان نتیجه گرفت که اولاً رفتار بازتاب طیفی دو نوع آسفالت با توجه به سن و شرایط سطح رویه آسفالت متفاوت است، چون در ترکیب آسفالت قیری که استفاده شده پس از گذشت مدتی کیفیت خود



(بازتاب سطح روسازی با عمر زیاد < بازتاب سطح روسازی با عمر متوسط < بازتاب سطح روسازی با عمر کم) (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷)



شکل ۵. نمودار طیف‌سنجی در پاسخ به سه نمونه آسفالت مورد بررسی بر حسب سن روسازی (الف)، اجرای پروفیل بر روی باند ۸ تصویر ماهواره سنتینل-۲ جاده سبزوار-شاهرود (ب) و ترسیم پروفیل تصویر سنتینل-۲ در نرم افزار SNAP

۲-۵. پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره سنتینل-۲ در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان فضایی اروپا (ESA^۱) به فضا پرتاب شد (وانگ و آتکینسون، ۲۰۱۸). این ماهواره دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی^۲ (Visible)، مادون قرمز نزدیک (NIR^۳) و مادون قرمز کوتاه (SWIR^۴) می‌باشد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، دو تصویر با درصد ابرناکی کم از ماهواره سنتینل-۲ در فصل گرم و در فصل سرد با فاصله زمانی چهار سال دانلود گردید که در جدول ۱ نشان داده شده است. خطای رادیومتریکی بر اثر تغییرات انرژی الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده ناشی از سایه

پستی و بلندی‌های سطح زمین یا پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی به وجود می‌آید، که اغلب نتایج نهایی را دچار مشکل می‌کند (دیمیترا و همکاران، ۲۰۱۹). پس از حذف خطاهای رادیومتریکی، نیاز است که خطاهای ناشی از جذب و پخش اتمسفری از روی تصاویر حذف گردند (ژو و همکاران، ۲۰۱۹) به منظور حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی در محدوده امواج مرئی و مادون قرمز و جهت بالا بردن کیفیت و افزایش بازتاب تصاویر تصحیح رادیومتریکی رادیانس^۵، سپس تصحیح اتمسفری QUAC^۶ بر تصاویر اعمال گردید و همچنین حاشیه‌های تصویر که ارزش پیکسل صفر داشتند، حذف گردید (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۱. مشخصات تصاویر جمع‌آوری شده ماهواره سنتینل-۲

تاریخ تصویربرداری	نوع سنجنده	درصد ابرناکی
2020/06/25	S2B, S2MSI2A	۰٪
2016/12/08	S2A, S2MSI1C	۱٪

۲-۶. استخراج بازتاب طیفی پیکسلی تصویر

سنتینل-۲

مختصات تمامی خرابی‌های ثبت شده قطعات و نمونه‌ها در نرم‌افزار SNAP^۷ جهت ایجاد خط مسیر و استخراج بازتاب طیفی خرابی‌های موجود پیاده‌سازی شدند (شکل

۶). ارزش پیکسل هر خرابی برای هر چهار باند (قرمز، سبز، آبی و مادون قرمز نزدیک) برای تمام نمونه‌ها استخراج شد و با مقادیر PCI و AGE محاسبه شده در جدول ۲ مقایسه گردید (به دلیل زیاد بودن تعداد نمونه‌ها، فقط هشت مورد جهت نمونه در این جدول آورده شده است).

جدول ۲. مقادیر بازتاب طیفی خرابی‌ها در چهار باند در مقایسه با مقادیر AGE و PCI

AGE (year)	شماره نمونه					
	PCI B8:842 nm	B4:665 nm	B3:560 nm	B2:490 nm		
12	48	0.142	0.1311	0.1225	0.1366	1
12	44	0.1254	0.1211	0.1174	0.1286	2
12	60	0.1229	0.1172	0.1173	0.1285	3
12	46	0.1298	0.1207	0.1192	0.1283	4
12	50	0.1431	0.1235	0.1173	0.1312	5
12	53	0.1453	0.1283	0.12	0.1293	6
12	49	0.1446	0.1385	0.1287	0.137	7
12	48	0.1491	0.1337	0.1324	0.1377	8

⁵- Radiance

⁶- Quick Atmospheric Correction

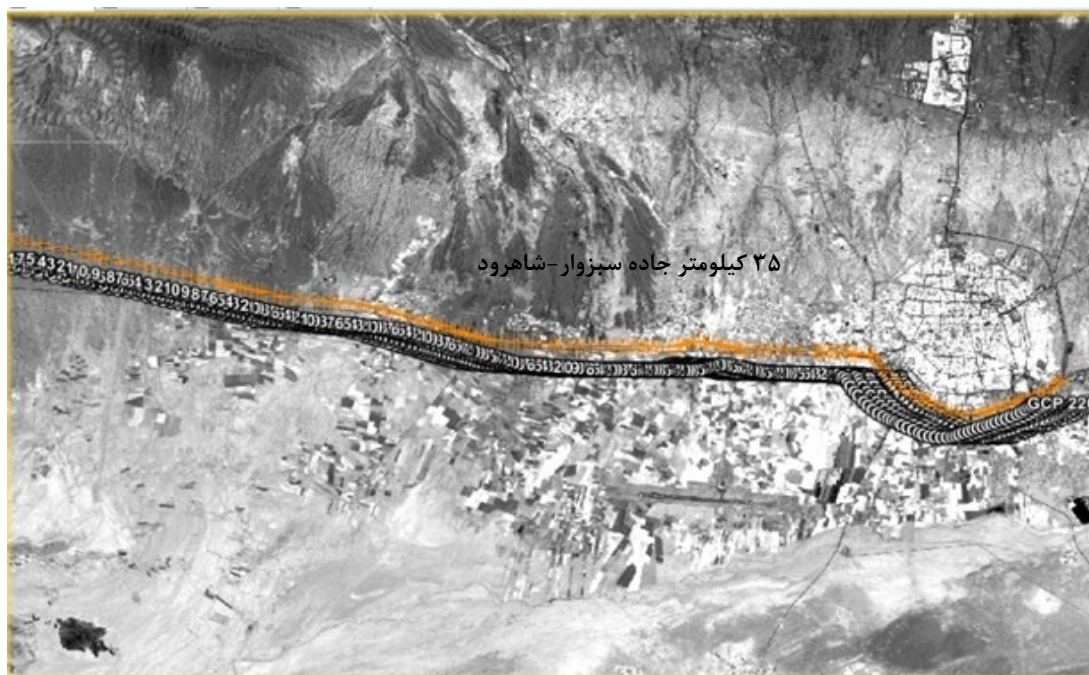
⁷- Sentinel Application Platform

¹- European Space Agency

²- Visible

³- Near Infra-Red

⁴- Short Wave Infra-Red



شکل ۶. پیاده‌سازی ۳۵ کیلومتر مسیر راه مورد مطالعه سبزوار-شاهرود در نرم‌افزار SNAP و استخراج ارزش پیکسلی بازتاب طیفی خرابی‌ها در محل‌های نمونه برداری از باندهای تصویر ماهواره سنتینل-۲

۳-۱. ارتباط بین شاخص AGE و PCI

برای بررسی میزان ارتباط بین سن روسازی و مقادیر PCI از ماتریس همبستگی (جدول ۳) استفاده شده است.

۳. نتایج

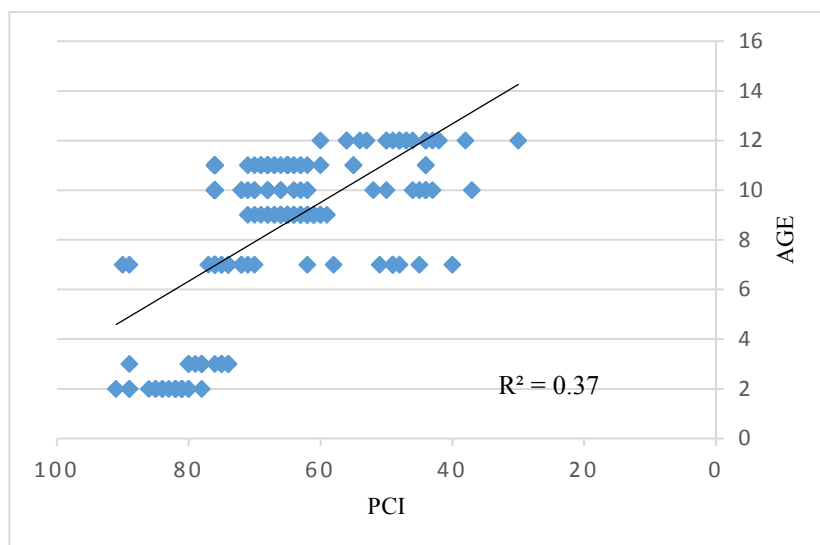
به منظور تحلیل و بررسی نتایج خروجی باندهای تصویر ماهواره در مسیر مورد مطالعه، PCI_s و AGE از داده‌های (جدول ۲) تمامی ستون‌ها با همدیگر مقایسه شدند که برای تحلیل از نرم‌افزار SPSS V.16 استفاده شد.

جدول ۳. ضریب همبستگی شاخص‌های خرابی روسازی آسفالتی با سن روسازی

متغیر	تعداد	ضریب همبستگی	سطح معناداری
خرابی روسازی با سن روسازی	۲۰۷	-۰/۶۱۲	۰/۰۱

می‌دهد که هر چه سن روسازی بیشتر باشد شاخص کیفیت کاهش پیدا می‌کند.

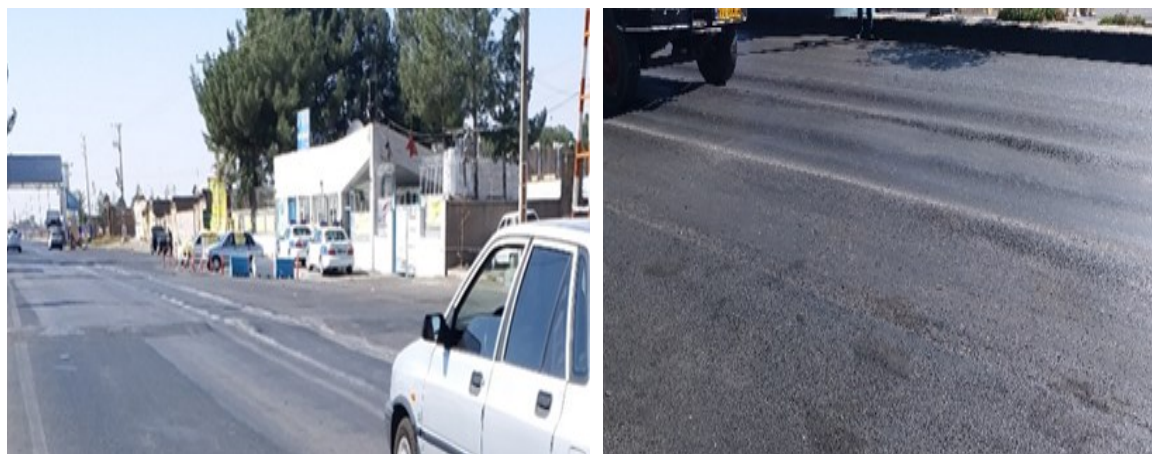
نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که بین شاخص‌های خرابی روسازی آسفالتی با شاخص سن روسازی رابطه منفی و معناداری در سطح ۰/۰۱ وجود دارد. این نتیجه نشان



شکل ۷. نمودار پراکندگی PCI در مقابل AGE

وجود بار ترافیکی زیاد، تردد و ترمز ناوگان سنگین و شاید مربوط به کیفیت پایین روکش باشد که با عبور بار ترافیک کم دچار خرابی شده است. به عنوان نمونه، در پلیس‌راه سبزوار، با وجود اینکه روکش عمر کمی دارد ولی مشاهده می‌شود که کیفیت روسازی پایین می‌باشد (شکل ۸).

از پراکندگی داده‌های نمودار شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت روسازی نسبت عکس با سن روسازی دارد. به معنای دیگر، هر چه روسازی دارای عمر بیشتری باشد، کیفیت آن پایین‌تر می‌آید. همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده، در نمونه‌هایی با سن روسازی کمتر، PCI کمتری نیز مشاهده شده است که این موارد نقص به علت



شکل ۸. کیفیت پایین روسازی در محل پلیس راه سبزوار با وجود سن کم روکش آسفالت

ارتباط بین نتایج باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای با شاخص خرابی روسازی PCI با استفاده از ماتریس همبستگی در جدول ۴ نشان داده شده است.

۲-۳. ارتباط بین PCI و باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای

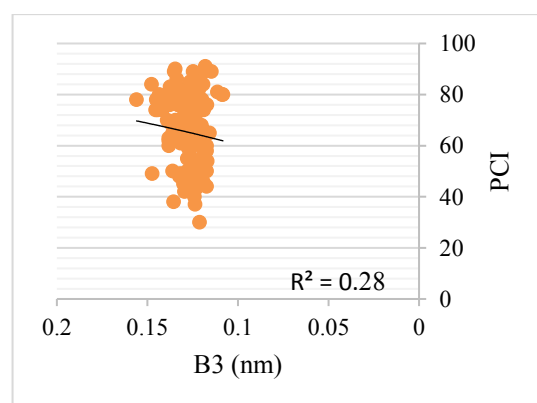
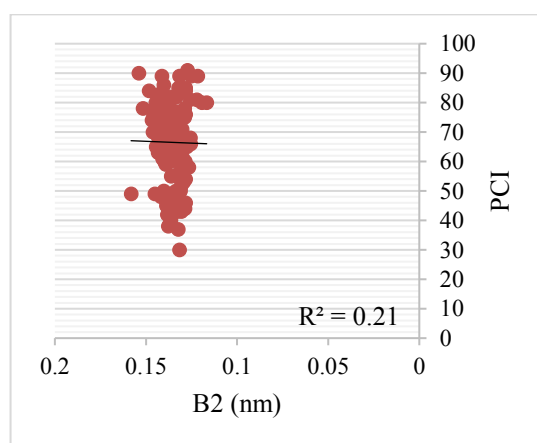
جدول ۴. ماتریس همبستگی شاخص‌های طیف‌سنجی ماهواره‌ای با PCI

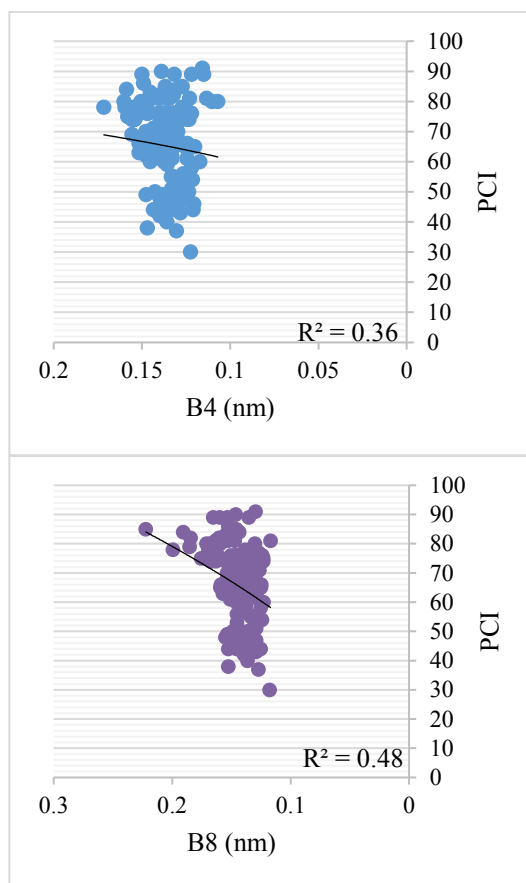
متغیر	۱	۲	۳	۴	۵
PCI	۱				
B2	۰/۰۱۲	۱			
B3	۰/۰۹۴	**۰/۸۳۸	۱		
B4	۰/۰۷۹	**۰/۷۰۳	**۰/۸۷۶	۱	
B8	**۰/۲۹۳	**۰/۳۹۱	**۰/۵۹۸	**۰/۶۰۶	۱

*p = ۰/۰۵ **p = ۰/۰۱

موج‌های مختلف با یکدیگر رابطه معناداری در سطح ۰/۰۱ وجود دارد. در شکل ۹، نمودارهای پراکندگی باندهای طیفی دو (B2)، سه (B3)، چهار (B4) و هشت (B8) از ماهواره سنتینل-۲ نسبت به PCI نشان داده شده است.

نتایج ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که بین طول موج باند هشت (B8) با شاخص خرابی روسازی آسفالتی رابطه مستقیم و معناداری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که با بالا رفتن طول موج باند هشت میزان شاخص PCI و یا کیفیت روسازی نیز بالا می‌رود. همچنین، با توجه به نتایج جدول ۴، بین طول





شکل ۹. پراکندگی باندهای طیفی دو، سه، چهار و هشت از ماهواره سنتینل-۲ در مقایسه با PCI

۳-۳. ارتباط بین شاخص AGE و باندهای طیفی
ارتباط بین نتایج باندهای تصاویر ماهواره‌ای مسیر مورد
نظر با شاخص AGE و پیرشدگی روسازی آسفالتی با
تصاویر ماهواره‌ای
استفاده از روش ماتریس همبستگی در جدول ۵ نشان
داده شده است.

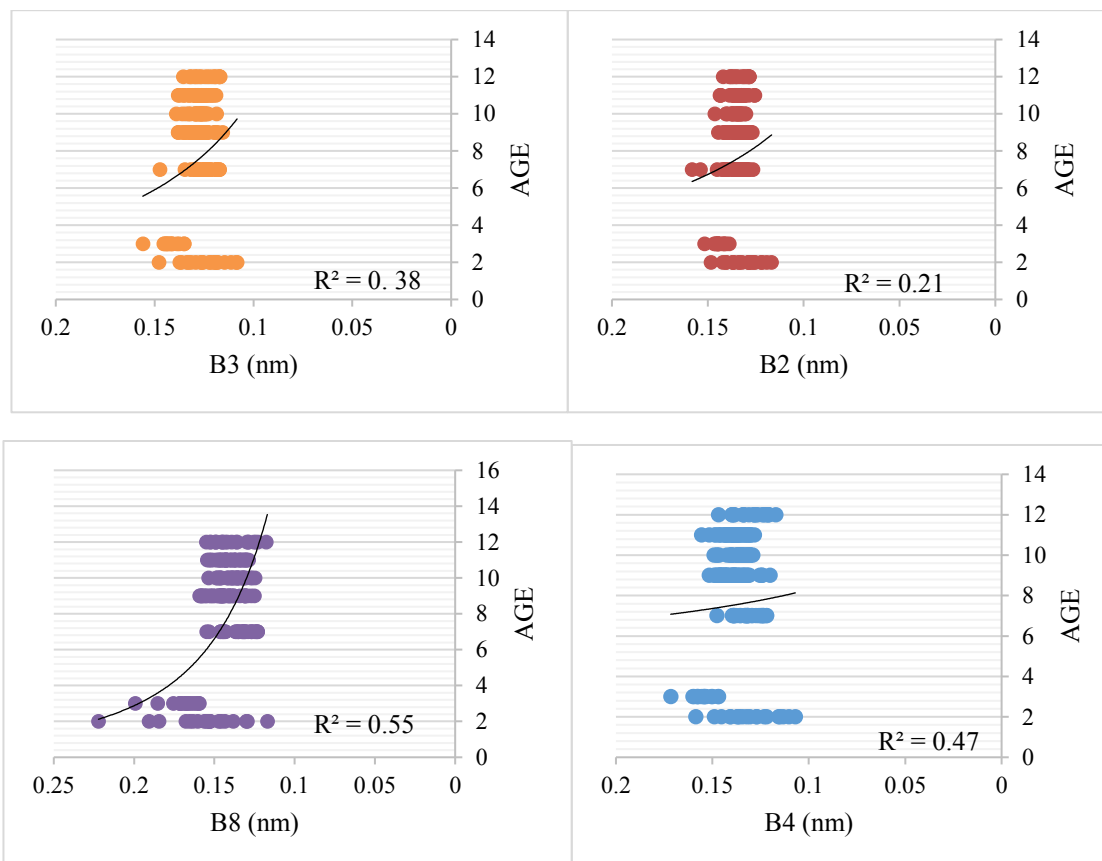
جدول ۵. ماتریس همبستگی شاخص‌های طیف‌سنجی ماهواره‌ای با سن روسازی AGE

متغیر	۱	۲	۳	۴	۵
AGE	۱				
B2	$^{*}-.۰/۱۴۸$	۱			
B3	$^{**}-.۰/۱۹۷$	$^{**}۰/۸۳۸$	۱		
B4	$-.۰/۰۹۹$	$^{**}۰/۷۰۳$	$^{***}۰/۸۷۶$	۱	
B8	$^{**}-.۰/۴۸۲$	$^{**}۰/۳۹۱$	$^{**}۰/۵۹۸$	$^{**}۰/۶۰۶$	۱

* $p = ۰/۰۵$ ** $p = ۰/۰۱$

می‌یابد. همچنین، براساس نتایج جدول ۵، بین طول موج‌های مختلف با هم رابطه معناداری در سطح ۰/۰۱ وجود دارد. در شکل ۱۰، نمودارهای پراکندگی باندهای طیفی دو، سه، چهار و هشت از ماهواره سنتینل-۲ نسبت به AGE نشان داده شده است.

نتایج ماتریس همبستگی در تحلیل عددی نمایانگر این موضوع است که بین طول موج باندهای دو، سه و هشت با شاخص سن روسازی (AGE) رابطه منفی و معناداری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که با بالا رفتن طول موج باندهای دو (B2)، سه (B3) و هشت (B8) میزان شاخص سن روسازی کاهش



شکل ۱۰. پراکندگی باندهای طیفی دو، سه، چهار و هشت از ماهواره سنتینل-۲ در مقایسه با AGE

معنادار باندهای طیفی ماهواره‌ای در معادله رگرسیون است ($p \leq 0/05$). همانطور که ملاحظه می‌شود، در پیش‌بینی شاخص‌های روسازی R^2 محاسبه شده ۰/۱۰۴ است. این بدان معنی است که متغیر طیف‌سنجی ماهواره‌ای ۰/۱۰۴ درصد از واریانس شاخص خرابی روسازی آسفالت را تبیین می‌کند.

۳-۴. اعتبارسنجی تصاویر ماهواره‌ای در تخمین PCI

در جدول ۶، نتایج مقدار واریانس تبیین شده و معناداری مدل شاخص‌های خرابی روسازی آسفالتی (PCI) نشان داده شده است. نسبت F و سطح معناداری آن بیانگر اثر

جدول ۶. خلاصه نتایج رگرسیون شاخص‌های خرابی روسازی آسفالتی (PCI)

مدل	R	R ²	F	DF1	DF2	SIG
همزمان	۰/۳۲۳	۰/۱۰۴	۵/۸۷۱	۴	۲۰۲	۰/۰۰۱

بر اساس نتایج (جدول ۷) طول موج باند هشت (B8) پیش‌بینی‌کننده معنادار شاخص خرابی روسازی آسفالت است. با توجه به علامت مثبت بتا می‌توان گفت که یک واحد افزایش در طول موج باند هشت، انحراف معیار متغیر خرابی روسازی آسفالت را ۰/۳۷۱ واحد افزایش می‌دهد.

جدول ۷. نتایج معناداری ضرایب مستقیم پیش‌بینی کننده شاخص خرابی روسازی (PCI)

متغیر	B	SE	BETA	T	SIG
ثابت	۵۶/۴۰۶	۱۹/۲۸۱		۲/۹۲۵	۰/۰۰۴
B2	-۲۱۹/۲۱۶	۲۶۴/۴۹۰	-۰/۱۰۵	-۰/۸۲۹	۰/۴۰۸
B3	۱۶۹/۶۸۲	۳۲۰/۴۴۹	۰/۱۰۰	۰/۵۳۰	۰/۵۹۷
B4	-۱۹۵/۳۶۵	۱۷۳/۷۲۱	-۰/۱۵۹	-۱/۱۲۵	۰/۲۶۲
B8	۳۱۱/۳۴۶	۷۳/۳۹۲	۰/۳۷۱	۱/۲۴۲	۰/۰۰۱

طیف‌سنجی ماهواره‌ای در معادله رگرسیون است ($p \leq ۰/۰۵$). همانطور که ملاحظه می‌شود، در پیش‌بینی شاخص سن روسازی R² محاسبه شده ۰/۳۱۵ است. این بدان معنی است که متغیر طیف‌سنجی ماهواره‌ای ۰/۳۱۵ درصد از واریانس سن روسازی آسفالت را تبیین می‌کند.

۳-۵. اعتبارسنجی تصاویر ماهواره‌ای در تخمین

AGE

در جدول ۸، نتایج مقدار واریانس تبیین شده و معناداری مدل شاخص سن روسازی (AGE) نشان داده شده است. نسبت F و سطح معناداری آن بیانگر اثر معنادار

جدول ۸. خلاصه نتایج رگرسیون شاخص سن روسازی آسفالت (AGE)

مدل	R	R ²	F	DF1	DF2	SIG
همزمان	۰/۵۶۲	۰/۳۱۵	۲۳/۲۶۹	۴	۲۰۲	۰/۰۰۱

سن روسازی آسفالت می‌شود. همچنین، یک واحد افزایش در طول موج باند هشت (B8) باعث ۰/۶۵۷ واحد کاهش در انحراف معیار متغیر سن روسازی آسفالت می‌شود.

بر اساس نتایج (جدول ۹) طول موج باندهای چهار (B4) و هشت (B8) پیش‌بینی‌کننده معنادار شاخص سن روسازی آسفالت است. با توجه به علامت منفی بتا می‌توان گفت که یک واحد افزایش در طول موج باند چهار، باعث ۰/۵۳۳ واحد کاهش در انحراف معیار متغیر

جدول ۹. نتایج معناداری ضرایب مستقیم پیش‌بینی کننده شاخص سن روسازی (AGE)

متغیر	B	SE	BETA	T	SIG
ثابت	۲۴/۴۲۴	۴/۳۶۱		۵/۶۰۱	۰/۰۰۱
B2	-۶۹/۹۱۷	۵۹/۸۱۸	-۰/۱۲۹	-۱/۱۶۹	۰/۲۴۴
B3	-۷۱/۵۰۷	۷۲/۴۷۳	-۰/۱۶۳	-۰/۹۸۷	۰/۳۲۵
B4	۱۶۸/۸۷۷	۳۹/۲۸۹	-۰/۵۳۳	۴/۲۹۸	۰/۰۰۱
B8	-۱۴۲/۷۹۱	۱۶/۵۹۹	-۰/۶۵۷	-۸/۶۰۳	۰/۰۰۱

۴. نتیجه‌گیری

تحلیل و مدیریت روسازی با کمک پردازش تصاویر ماهواره‌ای نیازمند سرمایه‌گذاری در سطح کلان و نیز حمایت‌های دولتی و دانشگاهی دارد. با توجه به دقت مورد نیاز و برداشت حجم بالای شبکه راه‌ها، در زمان کوتاه سیستم‌های مکانیزه برای شناخت راه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این استفاده از ماهواره مناسب با توان تفکیکی مکانی بالا برای استخراج اطلاعات از مسیرها نیز بسیار با اهمیت بوده و باید به آنها توجه ویژه‌ای داشته باشیم. رابطه معکوس بین AGE و PCI نشان‌دهنده این است که تحلیل‌های میدانی و محاسبه شاخص‌های خرابی به درستی صورت گرفته است و بسط آنها نیز در تحلیل باندها به عنوان متغیرهای وابسته درست انتخاب شده است. در ارتباط بین شاخص خرابی راه (PCI) و باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی شاخص خرابی، باند مادون قرمز نزدیک (B8) با ضریب تعیین ($R^2 = ۰/۴۸$) عملکرد بهتری نسبت به سایر باندها داشته و از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار بود که می‌توان آن را به سایر شاخص‌های خرابی مانند شاخص عملکرد روسازی (PSI) بسط داد. با توجه به توان تفکیک مکانی متوسط (۱۰ متر) باندهای انتخاب شده در مقایسه با ابعاد خرابی‌های روسازی ضریب همگرایی نسبتاً پایین ($R = ۰/۳۲۳$) در این تحلیل وجود

داشت. بایستی این نکته را در نظر داشت که عرض راه بین ۷ تا ۱۰ متر است بنابراین، در هر پیکسل ۱۰ متری ممکن است علاوه بر خصوصیات بازتاب طیفی آسفالت، خاک اطراف راه نیز وجود دارد که به شدت در دقت طیفی و تحلیل‌ها اثر گذار بوده است. در ارتباط بین شاخص سن روسازی (AGE) و آنالیز طیفی تصاویر ماهواره‌ای در پیش‌بینی سن روسازی باند مادون قرمز نزدیک (B8) با ضریب تعیین ($R^2 = ۰/۵۵$) عملکرد بهتری نسبت به سایر باندها داشت. در این تحلیل ضرایب همگرایی ($R = ۰/۵۶۲$) بالاتر بوده و می‌توان عنوان کرد که اعداد طول موج‌های بالا سن کمتر روسازی را نشان می‌دهند. در بررسی خرابی‌های روسازی عبور بار ترافیکی نقش مهمی دارد همچنین استفاده از معیارهای موجود انتخاب نمونه‌های تصادفی نقش بسزایی در تعیین شاخص‌های خرابی و نتایج نهایی تحلیل دارند. نوع اقلیم و مصالح بکاربرده شده در روسازی راه نیز از نکاتی است که باید مورد توجه قرار گرفته شود. با توجه به اقلیم گرم و خشک سبزوار، قیر در سطح روسازی بیشتر بوده و طیف بازتاب را تحت تاثیر قرار می‌دهد به طوریکه در مناطق سرد و رطوبتی نتایج تحلیل طیف‌سنجی تغییر خواهند کرد. روند تشخیص خرابی‌های سطح آسفالت به کمک تصاویر سنجش از دور به علت وابستگی به شرایط اقلیمی، اندازه تفکیک مکانی تصاویر دارای اختلاف

می‌باشند که با بررسی و نمونه‌گیری‌های میدانی و می‌توان
 امکان خطا را تا حد ممکن کاهش داد. همچنین پیشنهاد
 می‌شود از داده‌های ماهواره‌ای با دقت مکانی بالاتر با
 اندازه پیکسل کمتر از ۶ متر استفاده شود که البته این داده
 ها بطور رایگان در اختیار قرار ندارند. به نظر می‌رسد با
 استفاده از تصاویر با دقت مکانی بالا و وضوح بیشتر بتوان
 یک مدل پیش‌بینی خرابی راه قابل اعتماد و کاربردی را
 به‌دست آورد.

۵. مراجع

- Taghipour, A., Rasouli, H., and Famil, A. 2018. "Investigating the capability of high-precision drone imagery in assessing asphalt deterioration phenomenon (Case study: Alvar Sofla village, near Tabriz city)". *Transportation Infrastructure Engineering*, 4(3): 99–116. (In persian)
- Jalil Hashemi, S. A., and Divandari, H. 2018. "Application of geographic information system (GIS) in pavement management". In *Proceedings of the International Congress on Engineering Sciences and Sustainable Urban Development*. (In persian)
- Chatrsimab, Z. 2016. "Investigating land use changes using satellite imagery and remote sensing techniques to study desertification (Case study: Rig Matin)". *Application of Remote Sensing and GIS in Planning*, 6(4): 53–72. (In persian)
- Ranjbar, S., Moghaddas Nejad, F., and Zakeri, H. 2020. "Detection and classification of pavement cracks using deep convolutional networks". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9): 2255–2278. (In persian)
- Ranjbar, S., Moghaddas Nejad, F., and Zakeri, H. 2021. "Evaluation of asphalt pavement stripping failure using deep learning and wavelet transform". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(11): 4577–4598. (In persian)
- Shafabakhsh, Gh., Nadarpour, H., and Fasihi, F. 2010. "Selecting the optimal neural network algorithm for analyzing flexible road pavements". *Modeling in Engineering*, 8(21): 45–57. (In persian)
- Shahabian Moghaddam, R., Sahaf, S. A., Mohammadzadeh Moghaddam, A., and Pourreza, H. 2017. "Automatic detection and classification of pavement distresses based on image texture analysis in spatial and transform domains". *Transportation Quarterly*, 9(35): 121–142. (In persian)
- Fakhri, M., and Shahni Dezfolian, R. 2018. "Determining effective pavement structural number based on roughness index and surface distress using regression and neural network models". *Transportation Research Journal*, 15(4): 207–221. (In persian)
- Malmirian, H. 2001. Principles and fundamentals of remote sensing (Part four)". *Geographical Information Journal 'Sepehr'*, 8(32): 8–10. (In persian)
- Nobakht, Sh., & Minagar, M. 2011. "Using geographic information system (GIS) in pavement management". In *Proceedings of the National Seminar on GIS Applications in Economic, Social, and Urban Planning*. Tehran, Iran. (In persian)
- Abdellatif, M., Peel, H., Cohn, A. G. and Fuentes, R. 2019. "Hyperspectral imaging for autonomous inspection of road pavement defects". In *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (pp. 384-392).
- Diamanti, N. and Redman, D. 2012. "Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks". *J. Appl. Geophys.*, 81: 106-116.
- Dimitra, T., Stavros, S., Zina M. and Nektarios C. 2019. "Detailed urban surface characterization using spectra from enhanced spatial resolution Sentinel-2 imagery and a hierarchical multiple endmember spectral mixture analysis approach". *J. Appl. Remote Sens.*, 13(1): 016514.
- Djamai, N. and Fernandes, R. 2018. "Comparison of SNAP-derived Sentinel-2A L2A product to ESA product over Europe". *Remote Sens.*, 10(6): 926.
- Dumoulin, J., Ibos, L., Ibarra-Castanedo, C., Mazioud, A., Marchetti, M., Maldague, X. and Bendada, A. 2010. "Active infrared thermography applied to defect detection and characterization on asphalt pavement samples: comparison between experiments and numerical simulations". *J. Mod. Optic.*, 57(18): 1759-1769.
- Herold, M., Roberts, D., Noronha, V. and Smadi, O. 2008. "Imaging spectrometry and asphalt road surveys". *Transport. Res. Part C: Emerg. Tech.*, 16(2): 153-166.
- Metas, C., Agapiou, A., Themistocleous, K., Neocleous, K., Hadjimitsis, D. and Michaelides, S. 2016. "Risk provision using field spectroscopy to identify spectral regions for the detection of defects in flexible pavements". *Nat. Hazards*, 83(1): 83-96.

- Metts, C., Evagorou, E., Agapiou, A. and Hadjimitsis, D. 2020. "The use of colorimeters to support remote sensing techniques on asphalt pavements". *Remote Sens.*, 12(23): 3911.
- Mousavi, S. H., Ranjbar, A. and Haseli, M. 2016. "Monitoring and trending of land use changes in Abarkooh basin using satellite images (1976-2014)". *Sci.-Res. Quart. Geog. Data (SEPEHR)*, 25(97): 129-146.
- Nikolaou, A. 2016. "Study of asphalt pavement deterioration through remote sensing". Master's Thesis, Department of Civil Engineering and Geomatics, Cyprus University of Technology.
- Pan, Y., Zhang, X., Jin, X., Yu, H., Rao, J., Tian, S. and Li, C. 2016. "Road pavement condition mapping and assessment using remote sensing data based on MESMA". In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (34 (1), 012023). IOP Publishing.
- Radopoulou, S. C. and Brilakis, I. 2015. "Patch detection for pavement assessment". *Automat. Constr.*, 53: 95-104.
- Rigabadi, A., Rezaei Zadeh Herozi, M. and Rezagholilou, A. 2021. "An attempt for development of pavements temperature prediction models based on remote sensing data and artificial neural network". *Int. J. Pavement Eng.*, 1-10.
- Shahi, K., Shafri, H. Z. M., Taherzadeh, E., Mansor, S. and Muniandy, R. 2015. "A novel spectral index to automatically extract road networks from WorldView-2 satellite imagery". *The Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, 18(1): 27-33.
- Wang, Q. and Atkinson, P. M. 2018. "Spatio-temporal fusion for daily Sentinel-2 images". *Remote Sens. Environ.*, 204, 31-42.
- Wang, J., Yang, D., Xie, Z., Wang, H., Hao, Z., Zhou, F. and Wang, X. 2024. "Research progress of optical satellite remote sensing monitoring asphalt pavement aging". *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 90(8): 471-482.
- Wu, K. 2015. "Development of PCI-based pavement performance model for management of road infrastructure system". Arizona State University.
- Zhou, Y., He, B., Xiao, F., Feng, Q., Kou, J. and Liu, H. 2019. "Retrieving the lake trophic level in Wuhan, China". *Remote Sens.*, 11(4): 457.

