Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Winter Maintenance of Ultra-Thin Bonded Wearing Course (UTBWC): A Case Study in Minnesota

Mohammadreza Sabouri* and Ali Ruhi

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* corresponding author:(sabouri@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 27 November 2024

Revised: 15 April 2025

Accepted: 20 April 2025

Keywords:

Pavement management and maintenance,
ultra-thin bonded wearing course (UTBWC),
winter maintenance.

Abstract

Ultra-Thin Bonded Wearing Course (UTBWC) is utilized as a preventive maintenance option to extend pavement life by postponing the need for rehabilitation or reconstruction operations. UTBWC usually consists of a thin open-graded asphalt mixture over a polymer-modified emulsion membrane, which is applied by special pavers. Regarding the open-graded structure and rough texture of UTBWC, their winter maintenance differs from conventional pavements, leading to some challenges in the maintenance process. In this regard, this study aims to investigate the winter maintenance of UTBWC overlays through a comprehensive literature review, case study evaluation of a UTBWC section in Minnesota (performance and economic assessments), and field survey on the experiences with the UTBWC winter maintenance from Department of Transportation (DOT) specialists of some US states that are located in cold regions. The results showed that the winter maintenance of UTBWC sections, due to their porous structure and open-graded aggregate texture, which promotes greater accumulation of snow and ice, requires more deicing materials and more frequent snow plowing, which results in higher winter maintenance costs. Also, to avoid the accumulation of blown snow on the UTBWC surface, it is recommended to avoid the use of UTBWC in rural windy environments where the roadway runs in a direction perpendicular to the common wind direction. Economic assessment of the UTBWC section shows that the winter maintenance of UTBWC was more costly than the conventional mixtures and overlays. On the other hand, the results of the case study showed that the performance of UTBWC, in terms of Ride Quality Index (RQI), was better than the conventional Hot Mix Asphalt (HMA) overlay, which can reduce the overall maintenance cost and make UTBWC an economical preventive maintenance option. Therefore, decision-making regarding the management and maintenance of these overlays can be facilitated by considering a multifaceted approach, including technical, economic, and environmental performance. Also, a better understanding of the behavior of UTBWC and its maintenance methods can help to make more effective and better decisions for the implementation of this type of wearing course in the cold regions.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Sabouri, M.R. and Ruhi, A. 2026. Winter maintenance of ultra-thin bonded wearing course (UTBWC): a case study in minnesota, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 51-58. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65732.3390

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

نگهداری زمستانی لایه‌ی روکش آسفالتی بسیار نازک (UTBWC): (مطالعه‌ی موردی ایالت مینسوتا)

محمدرضا صبوری* و علی روحی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (sabouri@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

واژگان کلیدی:

مدیریت و نگهداری روسازی،

لایه‌ی روکش آسفالتی بسیار نازک،

نگهداری زمستانی.

چکیده

روکش‌های آسفالتی بسیار نازک (UTBWC) به‌عنوان یک لایه‌ی محافظتی برای به تأخیرانداختن عملیات بهسازی روسازی استفاده می‌شوند. نگهداری آن‌ها در زمستان به‌دلیل دانه‌بندی باز و بافت آن با روکش‌های آسفالتی متراکم متفاوت است، و فرآیند نگهداری آن را با چالش‌هایی همراه می‌کند. بدین منظور، در پژوهش حاضر با مرور پژوهش‌های پیشین، بررسی موردی روکش‌های آسفالتی اجراشده در یکی از راه‌های ایالت مینسوتا در آمریکا و مصاحبه با متخصصان اداره‌های حمل‌ونقل برخی از ایالت‌های سردسیر آمریکا به بررسی نگهداری روکش‌های UTBWC در زمستان پرداخته شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نگهداری UTBWC در زمستان، نسبت به روکش‌های آسفالتی متراکم نیاز به مواد یخ‌زدا و تعداد دفعه‌های عملیات برف‌روبی بیشتری دارد، که هزینه‌ی نگهداری آن را افزایش می‌دهد. ارزیابی اقتصادی نیز نشان می‌دهد که هزینه‌ی نگهداری زمستانی UTBWC بیشتر از روکش‌های معمول است. اما از سوی دیگر، نتایج بررسی موردی نشان می‌دهد که عملکرد UTBWC نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متراکم بهتر است و باعث کاهش هزینه‌ی نگهداری کلی آن در طول دوره‌ی بهره‌برداری می‌شود.

۱. مقدمه

لایه‌های روسازی آسفالتی محافظتی برای بهبود سطح روسازی و به تأخیرانداختن عملیات بهسازی و بازسازی روسازی مورد توجه صنعتگران و پژوهشگران هستند. روکش آسفالتی فوق نازک (UTBWC)[1] ، یک لایه‌ی روسازی محافظتی است، که در آن یک غشاء نسبتاً ضخیم از امولسیون (معمولاً اصلاح‌شده با پلیمر) روی سطح روسازی موجود پاشیده و بلافاصله با یک لایه‌ی نازک مخلوط آسفالتی داغ، معمولاً با دانه‌بندی باز پوشیده می‌شود.[۱] رویکرد اخیر می‌تواند به کاهش ضعف روسازی در برابر پوسته‌شدن، ترک‌های از بالا به پایین، و ترک‌های انعکاسی منجر شود و سطح هموارتر و بهتری را برای استفاده فراهم سازد.[۲] علاوه‌بر این، ساختار نسبتاً متخلخل روکش‌های نازک، امکان زهکشی بهتر، کاهش آلودگی صوتی، کاهش خلوص گازهای خروجی ماشین‌ها، و خنک‌شدن بیشتر روسازی را فراهم می‌کند.[۳] برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات تیتانویم دی‌اکسید (TiO_2) به روکش‌های آسفالتی نازک، علاوه بر بهبود دوام می‌تواند به کاهش آلاینده‌های ناشی از اگزوز وسائط نقلیه از طریق خاصیت فتوکاتالیستی و همچنین خنک‌شدن بیشتر روسازی کمک کند.[۳ و ۴] ضخامت نهایی روکش مذکور تا حد زیادی به ضخامت غشاء امولسیونی و اندازه‌ی بیشینه‌ی اسمی سنگدانه‌های استفاده‌شده بستگی دارد، اما معمولاً بین ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر است.[۵]

لایه‌ی محافظتی UTBWC در گذر سال‌ها با نام‌ها و جزئیات فنی نسبتاً متفاوت در کشورها و ایالت‌های مختلف آمریکا استفاده شده است.[۶ و ۷] در ایالت مینسوتا در آمریکا، معمولاً سه دانه‌بندی مختلف به نام‌های A، B، و C، برای UTBWC استفاده می‌شود، که اندازه‌ی بیشینه‌ی اسمی سنگدانه در آن‌ها به‌ترتیب برابر ۴/۷۵، ۹/۵، و ۱۲/۵ میلی‌متر است. استفاده از دانه‌بندی B در ایالت مینسوتا متداول‌تر بوده و حدود کارگاهی دانه‌بندی آن در جدول ۱ ارائه شده است. براساس پژوهش‌ها، در بخش غشاء امولسیونی، یک لایه قیر امولسیونی در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در بخش لایه‌ی نازک آسفالتی، یک مخلوط آسفالتی با ۵/۲ تا ۵/۸ درصد قیر (در ایالت مینسوتا ۴/۸ تا ۶ درصد)، میزان هوای ۱۰٪، ضخامت قشاء قیری حدوداً ۱۰ میکرون، دمای اختلاط بین ۱۴۳ تا ۱۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای تراکم بالاتر از ۸۵ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده می‌شود.[۵-۸] در شکل ۱، نمایی شماتیک از روکش UTBWC مشاهده می‌شود.

برای اجرای UTBWC از دستگاه فینیشر اصلاح‌شده (اصطلاحاً Spray Paver) استفاده می‌شود، که بتواند ابتدا غشاء امولسیونی و سپس مخلوط آسفالتی را در یک بار عبور دستگاه اجرا کند.[۵-۹] سطح نهایی UTBWC، عملیات اجرا، و نمای مقطع آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

[1] Ultra- Thin Bonded Wearing Course

استناد به این مقاله:

صبوری، محمدرضا و روحی، علی، ۱۴۰۴. نگهداری زمستانی لایه‌ی روکش آسفالتی بسیار نازک (**UTBWC**): (مطالعه‌ی موردی ایالت مینسوتا) . مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۵۱-۵۸. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65732.3390

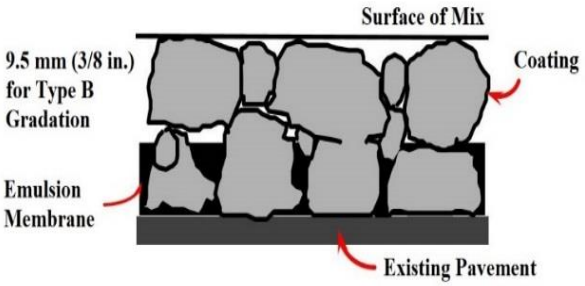
حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

جدول ۱. حدود دانه‌بندی کارگاهی B استفاده‌شده در ایالت مینسوتا برای UTBWC.

Sieve Size	Passing (%)
1/2 in (12.5 mm)	100
3/8 in (9.5 mm)	85-100
No. 4 (4.75 mm)	28-42
No. 8 (2.36 mm)	21-33
No. 16 (1.18 mm)	14-24
No. 30 (0.60 mm)	9-20
No. 100 (0.15 mm)	5-11
No. 200 (0.075 mm)	3-7



شکل ۱. نمایی شماتیک از لایه‌ی روکش آسفالتی بسیار نازک (منبع: اداره‌ی حمل‌ونقل ایالت مینسوتا (MnDOT)[1]).



شکل ۲. سطح نهایی، عملیات اجرا، و نمای مقطع UTBWC (منبع: اداره‌ی حمل‌ونقل فدرال (FHWA)[1] ، اداره‌ی حمل‌ونقل ایالت مینسوتا).

علی‌رغم مزایای استفاده از UTBWC، به‌دلیل بافت متخلخل و ویژگی‌های خاص آن، نگهداری UTBWC در زمستان که روسازی را در معرض یخبندان، برف، و سایر مسائل آب‌وهوایی قرار می‌دهد، با چالش‌هایی همراه است.[۱ و ۱۰]

با توجه به مطالب ذکرشده، در پژوهش حاضر به بررسی روش‌های مختلف برای نگهداری زمستانی UTBWC پرداخته شده است. نوشتار حاضر، خلاصه‌ای از دو گزارشی است که با حمایت مالی MnDOT انجام شده است.[۱ و ۱۱] شناخت بهتر از رفتار روکش‌های آسفالتی UTBWC در زمستان و روش‌های نگهداری آن‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری مؤثرتر و بهتر در جهت اجرای آن در مناطق سردسیر کشور کمک کند.

۲. مرور ادبیات فنی

در بخش حاضر، به مرور پژوهش‌های موجود در زمینه‌ی نگهداری UTBWC در زمستان و همچنین اثر باد در آن‌ها و ارزیابی اقتصادی پرداخته شده است.

۲.۱. نگهداری UTBWC در زمستان

برخلاف مزایای متعدد عملکرد روکش آسفالتی UTBWC، نگهداری آن در زمستان می‌تواند با چالش‌هایی مواجه شود؛ از جمله نیاز به زمان برف‌روبی، تعداد دفعه‌های برف‌روبی، و مقدار مواد یخ‌زدای بیشتر است. مشکل‌های اخیر بیشتر به دلیل بافت متخلخل و درشت UTBWC به‌وجود می‌آید، که همچنین باعث می‌شود یخ و برفی که با باد جابجا می‌شوند، در آن‌ها جمع شوند.

به مکانیزم تشکیل یخ و برف و ذوب آن‌ها در روکش‌های آسفالتی UTBWC کمتر توجه شده است. با وجود این، با توجه به شباهت قابل‌توجه میان بافت سطحی و ساختار UTBWC و مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز، می‌توان درک بهتری از رفتار UTBWC در شرایط برف و یخبندان به‌دست آورد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که دانه‌بندی باز مخلوط‌ها، که منجر به کاهش ۳۰ تا ۶۰ درصدی رسانایی حرارتی می‌شود، باعث می‌شود که دمای سطحی آن‌ها چند درجه سردتر از مخلوط آسفالتی متناظر با دانه‌بندی متراکم در شرایط یکسان باشد.[۱۲] همچنین، پس از رسیدن دمای سطح آن‌ها به زیر صفر، روکش‌های با دانه‌بندی باز نسبت به آسفالت‌های متراکم، عموماً تحت اثر افزایش دمای هوا، دیرتر گرم می‌شوند و یخ‌زدایی آن‌ها نیاز به زمان بیشتری دارد.[۱۳]

در ادبیات فنی موجود به روش‌های مختلفی برای نگهداری روسازی‌های آسفالتی در شرایط برف و یخبندان اشاره شده است، که در ادامه به متداول‌ترین آن‌ها اشاره شده است.[۱]

- **استفاده از ضد یخ:** افزودن مواد شیمیایی به سطح راه قبل از بارش برف یا وقوع یخبندان به‌منظور جلوگیری از تشکیل یخ (پیشگیری).
- **یخ‌زدایی:** افزودن مواد شیمیایی به راه در حین یا بعد از بارش برف و وقوع یخبندان به‌منظور جلوگیری از متراکم‌شدن برف یا بهبود عملیات برف‌روبی.
- **نمک و شن‌پاشی:** افزودن نمک به مصالح دانه‌ای و پاشش مخلوط حاصل روی سطح جاده برای تسهیل شروع فرآیند ذوب یخ.
- **برف‌روبی:** فرآیند مکانیکی کنارزدن برف و یخ از سطح راه.

از بین موارد اخیر، استفاده از روش نمک و شن‌پاشی یا نمک‌پاشی مستقیم در روسازی‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز توصیه نمی‌شود؛ چرا که مواد مذکور می‌توانند در خلل‌وفرج سطحی نفوذ کنند و نفوذپذیری آن‌ها را، که به‌منظور حفظ عملکرد موردانتظار در کاهش لغزش و پاشش آب ضروری است، به‌طرز قابل‌توجهی کاهش دهد. برف‌روبی در این نوع روسازی‌های آسفالتی نیز باید با دقت بیشتری انجام شود؛ چرا که لبه‌ی تیز برف‌روب می‌تواند به بافت متخلل سطح روسازی آسیب بزند. مواد یخ‌زدای شیمیایی به راحتی از طریق خلل‌وفرج سطح راه زهکشی می‌شوند و از این بابت باید در نرخ‌های بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متراکم استفاده شوند. همچنین، به کاربردن مواد پیشگیرانه‌ی ضد یخ نیز باید بسیار به موقع باشد؛ چراکه استفاده‌ی دیرهنگام از آن‌ها می‌تواند باعث تشکیل و متراکم‌شدن برف و یخ در خلل‌وفرج مخلوط آسفالتی شود.[۱۴] علاوه‌بر این، گزارش شده است که مخلوط‌های آسفالتی با

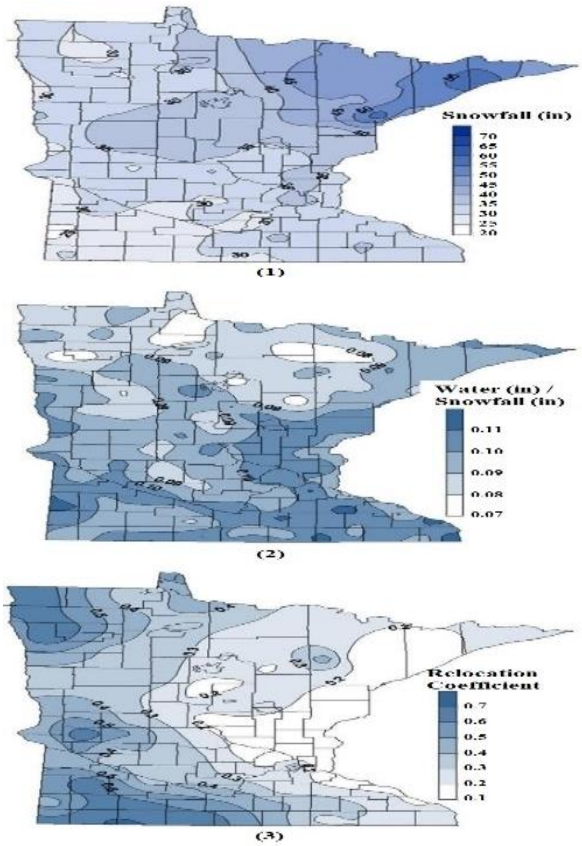
دانه‌بندی باز نیاز به حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد نمک و حدود ۳۰٪ مواد ضد یخ بیشتری دارند.[۱۵]

۲.۲. اثر باد در لایه‌ی روکش UTBWC

باد می‌تواند برف محیط اطراف روسازی را به سطح روسازی منتقل کند. برف منتقل‌شده با باد باعث کاهش دید رانندگان می‌شود و می‌تواند به سطح UTBWCبچسبد، که مستقیماً باعث افزایش تعداد دفعات و زمان عملیات نگهداری و مواد استفاده‌شده در آن‌ها می‌شود. مشکلات ناشی از اثر باد در مسیرهایی که عمود بر جهت غالب باد هستند، نمود بیشتری پیدا می‌کند. همچنین، خطرهای ایمنی بیشتری در این‌گونه مسیرها مشاهده شده است. بنابراین، معمولاً استفاده از UTBWC در مسیرهایی که در معرض هجوم شدید برف‌های منتقل‌شده با باد هستند، پیشنهاد نمی‌شود. شاخص‌های مختلفی برای تشخیص پتانسیل انتقال برف به سطح روسازی وجود دارند،که در ادامه معرفی شده‌اند.[۱۶]

۲.۲.۱. میانگین بارش برف

اولین شاخص، میانگین بارش برف است. به‌صورت کلی استفاده از UTBWC در مناطقی که مقدار بارش برف زیادی دارند، توصیه نمی‌شود. در شکل ۳- الف، میانگین بارش برف فصلی در ایالت مینسوتا در بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ میلادی مصادف با ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۸ شمسی مشاهده می‌شود. مطابق شکل اخیر، مناطق شمال شرقی ایالت مینسوتا در معرض بارش برف زیادی بوده‌اند. همچنین، مقدار میانگین بارش برف فصلی از حدود ۵۰ اینچ در مناطق شمالی تا حدود ۳۰ اینچ در مناطق جنوبی کاهش پیدا کرده است.



شکل ۳. نقشه‌ی پراکنش شاخص‌های: (۱) میانگین بارش برف؛ (۲) نسبت آب به ازاء برف؛ (۳) ضریب جابجایی در ایالت مینسوتا آمریکا.[۱ و ۱۶]

۲.۲.۲. شاخص آب به ازاء برف (SWE)[1]

شاخصSWE ، نشانگر چگالی برف است و به‌صورت نسبت عمق آبی که در نتیجه‌ی ذوب کامل برف به‌دست می‌آید، به عمق اولیه‌ی برف تعریف می‌شود. مقدار بزرگ‌تر SWE ، بیانگر چگال‌تربودن برف است. از سوی دیگر، اثر چگالی برف در میزان برف جابجاشده توسط باد نسبت به عمق برف بیشتر است. بنابراین، شاخص SWE نشانگر بهتری برای پتانسیل انتقال برف به سطح روسازی است. در شکل ۳- ب، پراکنش شاخص SWE در سطح ایالت مینسوتا بین ۰/۰۷تا ۰/۱۱ اینچ بر اینچ مشاهده می‌شود.

۲.۲.۳. ضریب جابجایی

شاخص ضریب جابجایی، براساس میزان آب متناظر با مقدار برفی که توسط باد جابجا می‌شود، تعریف می‌شود؛ که شاخص کامل‌تری برای بیان میزان برف منتقل‌شده توسط باد است. برخلاف دو شاخص میانگین بارش برف و SWE ، که فقط براساس میزان برف و چگالی آن تعریف می‌شدند، ضریب جابجایی مشخصه‌های محیطی دیگری، از جمله سرعت باد، توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی، و کاربری زمین را در نظر می‌گیرد.

در پژوهشی، ضریب جابجایی در سطح ایالت مینسوتا محاسبه شده است، که در شکل ۳- ج مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن،، ضریب جابجایی در ایالت مینسوتا بین ۰/۱ تا ۰/۷ متغیر است. همچنین با توجه به شکل مذکور، اگرچه میانگین میزان بارش برف و شاخص SWE در مناطق شمال شرقی بیشتر است، اما خصوصیات توپوگرافی و کاربری زمین در مناطق شمال غربی و جنوب غربی باعث شده است تا میزان انتقال برف توسط باد در مناطق اخیر بیشتر باشد. مقدار میانگین ضریب جابجایی در ایالت مینسوتا تقریباً برابر با ۰/۳۵ است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر برف، یخبندان، و باد در نگهداری UTBWC در زمستان است. برای این منظور، از مرور پژوهش‌های موجود، بررسی موردی عملکردی و اقتصادی جاده‌های ساخته‌شده با روکش آسفالتی UTBWC، و همچنین انجام مصاحبه با متخصصان این حوزه استفاده شده است.

۲.۳. هزینه‌ی نگهداری UTBWC در زمستان

بنا بر گزارش‌های FHWA، تقریباً ۲۰٪ بودجه‌ی اداره‌ی حمل‌ونقل هر ایالت صرف نگهداری زمستانی می‌شود.[۱۷] در جدول ۲، هزینه‌ی نگهداری زمستانی راه‌های ایالت‌های مختلف آمریکا و کشور فنلاند (با تبدیل نرخ یورو به دلار) بر حسب دلار بر مایل (آمارها مربوط به سال ۲۰۱۹ میلادی) ارائه شده است؛ که مطابق آن، هزینه‌ی حدودی نگهداری زمستانی راه‌ها بین ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ دلار بر مایل راه است، که بستگی به سیاست‌های اتخاذشده توسط مسئولان هر

جدول ۲. هزینه‌ی نگهداری زمستانی راه‌ها در ایالت‌های مختلف آمریکا و کشور فنلاند در سال ۲۰۱۹ میلادی بر حسب دلار بر مایل راه. [۱۱]

State/Country	Cost ($ per mile)
Michigan	3100
Minnesota	3503
Pennsylvania	3229
Wisconsin	2537
Finland	2733

[1] Snow Water Equivalent

منطقه دارد. هزینه‌ی نگهداری زمستانی، شامل مصالح، تجهیزات، و نیروی انسانی است، که با توجه به سردسیربودن ایالت‌ها و مناطق می‌تواند بسیار زیاد باشد.

استفاده از روکش UTBWC، علی‌رغم مزایا و چالش‌های ذکرشده، می‌تواند به‌دلیل نیاز به تمهیدات متفاوت، از لحاظ اقتصادی نیز چالش‌برانگیز باشد.

۳. روش انجام پژوهش

در راستای اهداف پژوهش حاضر، ابتدا نگهداری روکش UTBWC در زمستان براساس پژوهش‌های موجود ارزیابی شده است. در ادامه، یک بررسی موردی روی جاده‌ی US169 انجام شده است؛ که هر دو روکش آسفالتی UTBWC و آسفالتی متراکم را دارد، که امکان مقایسه را فراهم می آورد. همچنین، با متخصصانی از اداره‌های حمل‌ونقل درباره‌ی تجربه‌ی میدانی آن‌ها در مواجهه با برف و یخبندان روکش UTBWC مصاحبه شده است. ایشان از مناطق مختلف ایالت مینسوتا و همچنین برخی ایالت‌های دیگر آمریکا، از جمله ایالت‌های سردسیر ویسکانسین، داکوتای شمالی، داکوتای جنوبی، ورمونت، مین، کلرادو و ایالت گرمسیر تگزاس انتخاب شده‌اند. در انتها، تحلیل اقتصادی از هزینه‌ی عملیات نگهداری روکش UTBWC در زمستان در ایالت مینسوتا ارائه شده است.

در بررسی موردی پژوهش حاضر، از شاخص کیفیت سواری (RQI) [2] استفاده شده است؛ که نشانگر میزان پستی و بلندی روسازی است و کیفیت راه را در مقیاس صفر تا ۵ نشان می‌دهد. مقدار بالاتر شاخص RQI به‌منزله‌ی تجربه‌ی سواری بهتر مسافران حین عبور از روسازی است. معمولاً مقدار شاخص RQI را مساوی ۲/۵ برای تشخیص زمان اجرای عملیات بهسازی در نظر می‌گیرند.

برای محاسبه‌ی شاخص RQI ، ابتدا باید شاخص ناهمواری بین‌المللی [3] (IRI)محاسبه شود؛ که معمولاً با استفاده از حسگرهای لیزری به‌صورت مقدار تغییرات عمودی بر حسب متر در هر کیلومتر از مسیر راه تعریف می‌شود. سپس، مقدار شاخص RQI برای روسازی‌های آسفالتی و بتنی به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

$$RQI = 5.697 - 2.104IRI \quad (1)$$

$$RQI = 6.634 - 2.183IRI \quad (2)$$

که در آن‌ها، RQI شاخص کیفیت رانندگی در مقیاس صفر تا ۵ و IRI شاخص ناهمواری بین‌المللی بر حسب متر بر کیلومتر است.

۴. نتایج، تحلیل، و بحث

در بخش حاضر، به نتایج پژوهش پرداخته شده است، که شامل ارزیابی نگهداری UTBWC در زمستان براساس ادبیات فنی موجود، بررسی موردی روکش آسفالتی UTBWC اجراشده در جاده‌ی US169، و نتایج مصاحبه با متخصصان اداره‌های حمل‌ونقل آمریکا می‌شود.

۴.۱. مرور ادبیات فنی موجود

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اطلاعات بسیار محدودی از نگهداری روکش‌های آسفالتی UTBWC در زمستان در دسترس است؛ در حالی که پژوهش‌های بسیاری به نگهداری زمستانی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز (OGFC)[4] پرداخته‌اند. با توجه به شباهت بافت دو نوع مخلوط آسفالتی ذکرشده و براساس نتایج پژوهش‌های موجود (بخش ۲) می‌توان این موارد را درباره‌ی نگهداری روکش آسفالتی UTBWC در زمستان برداشت کرد:

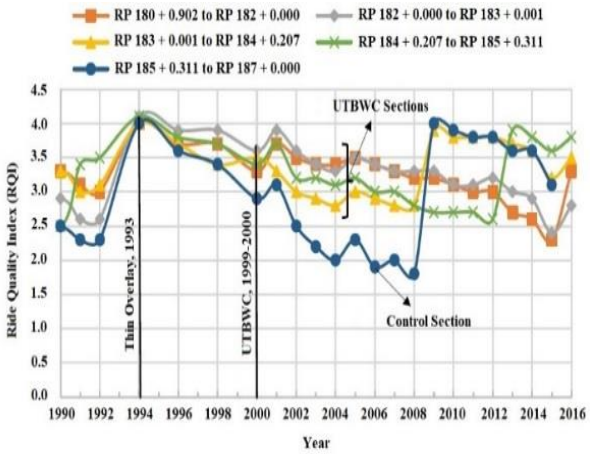
- هر دو نوع مخلوط UTBWC و OGFC نیاز به مقدار مواد یخزدا و ضد یخ بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متراکم دارند. با این حال، با توجه به ساختار بسته‌تر روکش UTBWC نسبت به OGFC، انتظار می‌رود که مواد یخزدای کمتری در روکش آسفالتی UTBWC نیاز باشد.
- اگرچه استفاده از روش‌های نمک و شن‌پاشی در مخلوط‌های آسفالتی OGFC پیشنهاد نمی‌شود، به‌نظر می‌رسد که بتوان از روش OGFC در روکش آسفالتی UTBWC استفاده کرد؛ چرا که UTBWC برخلاف OGFC، یک لایه‌ی نفوذپذیر نیست.
- دمای UTBWC و OGFC سریع‌تر از مخلوط‌های آسفالتی متراکم در شرایط مشابه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش دمای هوا، روکش‌های آسفالتی اخیر دیرتر گرم می‌شوند. در نتیجه، احتمال تجمع برف و یخ در آن‌ها بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی متراکم است.
- احتمال تشکیل برف و یخ در سطح UTBWC و OGFC بیشتر است؛ چرا که مواد ضدیخ معمولاً در سطح مخلوط‌های آسفالتی باقی نمی‌مانند.
- پس از انجام فرآیند برف‌روبی در هر دو نوع مخلوط آسفالتی UTBWC و OGFC، مواد ضدیخ و یخزدا باید به دفعات استفاده شوند، تا خرده‌برف‌های حاصل از برف‌روبی دوباره به یخ تبدیل نشوند.

اگرچه در طراحی UTBWC معمولاً از مخلوط‌های متخلخل با دانه‌بندی باز مشابه OGFC استفاده می‌شود، برخی پژوهش‌ها امکان استفاده از مخلوط‌های متراکم و حتی SMA[5] را نیز مطرح کرده‌اند. در یک پژوهش میدانی،[۱۸] گزارش شده است که روکش فوق‌نازک متراکم اصلاح‌شده، پس از یک سال بهره‌برداری، فقط ۸/۲٪ کاهش در عمق بافت سطحی داشته است؛ در حالی‌که این مقدار برای مخلوط SMA حدود ۱۳٪ بوده است. همچنین در پژوهش دیگری،[۱۹] نشان داده شده است که در صورت استفاده از OGFC با دانه‌بندی ریزتر در ساخت UTBWC، علی‌رغم نفوذپذیری کمتر، دوام، و مقاومت در برابر ریزش مصالح افزایش می‌یابد. از آنجا که پژوهش حاضر براساس تجربیات و پژوهش‌های مربوط به ایالت مینسوتا انجام شده است و در آنجا عمدتاً از مخلوط‌های با دانه‌بندی باز برای اجرای UTBWC استفاده می‌شود، تمرکز پژوهش حاضر نیز بر روی بررسی مخلوط ذکرشده بوده است.

۴.۲. ارزیابی موردی جاده‌ی US169 در مینسوتا

در ایالت مینسوتا، روکش آسفالتی UTBWC در حدود ۱۵۰ کیلومتر راه برون‌شهری و ۲۰۰ کیلومتر راه درون‌شهری اجرا شده است. برای درک بهتر عملکرد مخلوط آسفالتی UTBWC، پروژه‌ی US169 انتخاب شده است؛ زیرا که UTBWC در قسمت‌های مختلف آن اجرا شده است. راه مذکور در نزدیکی شهر پرینستون ایالت مینسوتا واقع شده است. پروژه‌ی مذکور شامل ۵ بخش مختلف است، که طول تقریبی هر کدام بین ۱/۵ تا ۲ کیلومتر بوده است. بخش‌های اول و دوم آن در ماه آگوست سال ۲۰۰۰ میلادی و با روکش آسفالتی UTBWC اجرا شده‌اند. دو بخش سوم و چهارم نیز در ماه سپتامبر ۱۹۹۹ و با روکش آسفالتی UTBWC اجرا شده‌اند. همچنین، بخش پنجم پروژه‌ی

[2] Ride Quality Index
[3] International Roughness Index
[4] Open-Graded Friction Course
[5] Stone Mastic Asphalt



شکل ۴. شاخص RQI در پروژه‌ی US169 در ایالت مینسوتا.[۱]

مذکور با روکش آسفالتی متراکم اجرا و به‌عنوان بخش کنترل درنظر گرفته شده است.

بررسی‌های اولیه پس از ۷ سال از اجرای پروژه‌ی اخیر نشان‌داده است که روکش آسفالتی UTBWC در ۷ سال اولیه، عملکرد بسیار خوبی داشته است.[۲۰] شاخص RQI برای بخش‌های روکش‌شده با UTBWC به‌طور میانگین برابر با ۳/۲ بوده و نرم‌افزار مدیریت روسازی ایالت مینسوتا، کاهش آن‌ها به مقدار نهایی ۲/۵ را دست‌کم تا ۵ سال دیگر پیش‌بینی نمی‌کرد.[۲۰] با وجود این، بخش کنترل با روکش آسفالتی متراکم بسیار سریع تخریب شده و شاخص RQI آن در طی این مدت به سرعت به عدد ۱/۹ کاهش پیدا کرده است، که کمتر از مقدار نهایی ۲/۵ است. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که روکش آسفالتی متراکم، که به‌عنوان بخش کنترل استفاده شده است، فقط با عملیات درزگیری و لکه‌گیری نگهداری شده است. به همین دلیل، در برابر آثار ترافیک و شرایط محیطی دوام کافی نداشته و بسیار سریع‌تر از بخش UTBWC تخریب شده است. مقدار شاخص RQI برابر ۲/۵ معمولاً به‌عنوان نقطه‌ای برای انجام عملیات بهسازی یا بازسازی درنظر گرفته می‌شود.

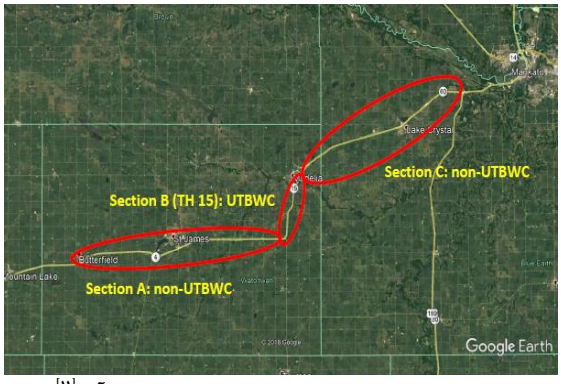
در شکل ۴، تغییرات شاخص RQI بخش‌های مختلف پروژه‌ی US169 تا سال ۲۰۱۶ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، به‌صورت کلی بخش‌های با روکش آسفالتی UTBWC در ادامه نیز عملکرد بهتری از بخش کنترل نشان داده‌اند. دو بخش اول و دوم پروژه‌ی مذکور، عملکرد بسیار خوبی نشان داده‌اند و عملیات وصله فقط در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ در آن‌ها انجام شده است. بخش سوم آن نیز در سال ۲۰۰۹ (پس از گذشت ۱۰ سال) تراشیده و روکش شده است؛ در حالی که عملیات وصله برای بخش چهارم پروژه، سال ۲۰۱۳ (پس از ۱۴ سال) انجام شده است. عملیات تراش و روکش برای بخش کنترلی پروژه نیز در سال ۲۰۰۹ انجام شده است، در حالی که این بخش از پروژه از سال ۲۰۰۳، شاخص RQI آن کمتر از ۲/۵ بوده و عملاً نیاز به بهسازی داشته است.

نتایج بررسی میدانی نشان می‌دهد که استفاده از مخلوط آسفالتی UTBWC باعث کاهش هزینه‌های نگهداری کلی روسازی می‌شود؛ که ممکن است بتواند اضافه‌ی هزینه نگهداری آن‌ها در زمستان را پوشش دهد.

۳.۴. مصاحبه‌ی میدانی با متخصصان اداره‌های حمل‌ونقل

در ادامه، با تعداد زیادی از متخصصان اداره‌ی حمل‌ونقل ایالت مینسوتا و سایر ایالت‌های آمریکا (به علت همجواری، نزدیکی شرایط آب‌وهوایی، و یا داشتن تجربیات مرتبط) درباره‌ی تجربه‌ی آن‌ها با UTBWC در شرایط برف و یخبندان مصاحبه شده است. ایشان ۳۲ نفر از مناطق مختلف ایالت مینسوتا، ۳ نفر از ویسکانسین، ۱ نفر از ورمونت، ۲ نفر از مین، ۲ نفر از داکوتای جنوبی، ۱ نفر از کلرادو، و ۱ نفر از تگزاس (مجموعاً ۴۲ نفر) بوده‌اند. محورهای اصلی مصاحبه، شامل میزان استفاده از UTBWC در ایالت‌ها، دلایل توقف استفاده در صورت عدم ادامه (نظیر مشکلات نگهداری، هزینه، یا عملکرد)، محل اجرای روکش‌های مذکور (شهری، روستایی یا در مقاطع دارای جدول)، و معیارهای انتخاب مخلوط از جمله سطح ترافیک، شرایط آب‌وهوایی، دوام، صدا، و هزینه مطرح بوده است. همچنین از پاسخ‌دهندگان درباره‌ی مزایا و معایب UTBWC (همچون کاهش پاشش آب، بهبود مقاومت لغزشی، هزینه‌ی اولیه‌ی بالا، و دشواری نگهداری زمستانی) پرسش شده است. بخش مهمی از سؤال‌ها نیز به نگهداری زمستانی، از جمله: میزان مصرف نمک و یخزدا نسبت به آسفالت معمولی، نوع مواد استفاده‌شده، اثربخشی روش‌های مختلف، و چالش‌هایی نظیر یخزدگی بیشتر یا تشکیل یخ سیاه اختصاص داشته است. درنهایت، سؤال‌هایی درباره‌ی مشخصات فنی اجرای UTBWC، مانند درصد قیر، فضای خالی، نوع و نرخ اجرای لایه‌ی اتصال، و تجربه‌ی استفاده بر روی روسازی بتنی نیز مطرح شده است. نتایج مصاحبه‌های مذکور را می‌توان در این موارد خلاصه کرد:

- در بیشتر موارد، مشکلات عمده ناشی از برف و یخبندان در مسیرهای ساخته‌شده با روکش آسفالتی UTBWC گزارش نشده و فقط در موارد اندکی نیاز به بستن مسیر تا زمان تأمین ایمنی کافی و انجام عملیات نگهداری بوده است.
- متداول‌ترین مشکل با برف و یخبندان در روکش UTBWC تشکیل یخ و توده‌ی برف در سطح آن است، که مقدار مواد مصرفی و دفعه‌های عملیات نگهداری زمستانی را افزایش می‌دهد.
- برف‌روبی از سطح UTBWC در مسیرهایی که در مناطق بادخیز و تقریباً عمود بر جهت غالب باد احداث شده‌اند، با سختی بیشتری همراه است. این موضوع احتمالاً بیشتر به دلیل برف منتقل‌شده توسط باد و چسبیدن آن به سطح مخلوط آسفالتی اتفاق می‌افتد.
- میزان چسبیدن برف منتقل‌شده توسط باد به سطح UTBWC در روزهای گرم و آفتابی بیشتر از روزهای خیلی سرد با دمای حدود ۱۵- درجه‌ی سلسیوس است.
- میزان هزینه‌ی نگهداری زمستانی برای روکش آسفالتی UTBWC در برخی موارد برابر با هزینه‌ی موردنیاز برای روکش آسفالتی متراکم و در برخی موارد نیز تا ۵ برابر آن گزارش شده است. در مواردی که هزینه‌ی نگهداری یکسان گزارش شده است، معمولاً از مواد ضدیخ شیمیایی قبل از بارش برف یا وقوع طوفان استفاده شده است.
- تقریباً تمام اداره‌های حمل‌ونقل از استفاده از روکش UTBWC راضی بوده‌اند. اگرچه هزینه‌ی نگهداری زمستانی آن نسبت به روکش آسفالتی متراکم بیشتر بوده است، اما هزینه‌ی کمتر نگهداری‌های دیگر آن‌ها، مانند درزگیری ترک‌ها یا وصله، باعث شده است تا در مجموع مقرون به‌صرفه باشند. گزارش‌ها نشان داده‌اند که برخی مقاطع، روکش UTBWC پس از گذشت ۷ سال همچنان عملکرد مناسبی داشته است، بدون آنکه نیاز به بازسازی اساسی داشته باشد؛ در حالی که روکش متراکم در مدت کوتاه‌تری دچار افت کیفیت شده است.
- برخی از پرسنل نگهداری راه از غلظت بیشتر نمک و مواد یخزدا در اولین عملیات برف‌روبی زمستان استفاده می‌کنند. آن‌ها گزارش داده‌اند که میزان



شکل ۵. نقشه‌ی جاده‌ی TH 15 و تقسیم‌بندی آن.[11]

اضافه نمک و مواد یخ‌زدا در بافت سطحی UTBWC باقی می‌ماند، که در جلوگیری و کنترل تشکیل یخ در ادامه‌ی فصل زمستان مؤثر است.

- در مسیرهای که از مواد ضدیخ و عملیات پیشگیرانه استفاده نمی‌شود، رطوبت موجود در سطح UTBWC سریع‌تر از مخلوط‌های آسفالتی متراکم یخ می‌زند.
- مصاحبه‌شوندگان متعددی اشاره کرده‌اند که مشکلات یخبندان و برف در UTBWC عموماً برای دو سال ابتدایی ساخت بیشتر بوده و پس از آن به‌تدریج کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به دلیل پُرشدن منافذ روکش آسفالتی UTBWC با شن باشد.
- اگر برف و یخ روی UTBWC در اثر ترافیک عبوری متراکم شود، فرآیند برف‌روبی را به مراتب سخت‌تر و پر هزینه‌تر می‌کند.
- یکی از مزایای روکش آسفالتی UTBWC، دانه‌بندی نسبتاً باز آن و در
- نتیجه زهکشی مناسب آب باران است. این موضوع باعث می‌شود تا ایمنی روکش مذکور در شرایط بارندگی افزایش یابد. با این حال، استفاده از عملیات‌های نگهداری پیشگیرانه، قابلیت زهکشی مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد.
- یخبندان در روکش آسفالتی UTBWC نسبت به بقیه‌ی روکش‌های آسفالتی زودتر اتفاق می‌افتد و فرآیند ذوب نیز کندتر انجام می‌شود. بنابراین، استفاده از آن در یخبندان‌های سریع و یا چرخه‌های ذوب و یخبندانی که سریع اتفاق می‌افتند، می‌تواند مشکل‌ساز باشد.

۴.۴. ارزیابی اقتصادی جاده‌ی TH 15 در مینسوتا

برای ارزیابی اقتصادی نگهداری زمستانی UTBWC، به بررسی جاده‌ی TH 15 در ایالت مینسوتا پرداخته شده است. جاده‌ی TH 15 متشکل از ۳ بخش A، B، و C به ترتیب با طول‌های ۶۸، ۲۶، و ۷۵ مایل بوده است، که بخش B روکش UTBWC داشته است. در شکل ۵، نقشه‌ی جاده‌ی اخیر و تقسیم‌بندی آن مشاهده می‌شود.

در جدول ۳، میانگین هزینه‌های نگهداری زمستانی (بر حسب دلار بر مایل راه) انجام‌شده در سه ناحیه‌ی تقسیم‌بندی‌شده از جاده‌ی TH 15 در سال‌های

جدول ۳. میانگین هزینه‌ی نگهداری زمستانی بخش‌های مختلف جاده‌ی TH 15 در ایالت مینسوتا در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی.[11]

Section	Cost ($ per mile)
A	2175
B	4125
C	2214

۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی ارائه شده است؛ که مطابق آن، هزینه‌ی نگهداری زمستانی از UTBWC به‌دلیل افزایش نیاز به مصالح، تجهیزات، و نیروی انسانی بیشتر از روسازی بدون روکش مذکور بوده است. البته شایان ذکر است که علی‌رغم بالابودن هزینه‌ی نگهداری زمستانی UTBWC، هزینه‌ی کل نگهداری آن به علت عملکرد مناسب‌تر نسبت به سایر رویگردهای بهسازی و نگهداری راه می‌تواند عملکرد اقتصادی آن را توجیه کند. بدین منظور، تحلیل اقتصادی استفاده از روکش UTBWC با توجه به شرایط آب‌وهوایی و عملکرد موردانتظار ضروری است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نگهداری روکش آسفالتی بسیار نازک (UTBWC) در زمستان ارزیابی شده است. برای این منظور، پژوهش‌های پیشین درباره‌ی نگهداری مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز در زمستان بررسی و با توجه به شباهت ساختاری روکش آسفالتی UTBWC و مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز، درباره‌ی نگهداری روکش آسفالتی UTBWC در زمستان نتیجه‌گیری شده است. در ادامه، از بررسی موردی روکش آسفالتی UTBWC در پروژه‌ی US169 و مصاحبه با متخصصان اداره‌های حمل‌ونقل آمریکا برای نتیجه‌گیری درباره‌ی نگهداری روکش‌های UTBWC در زمستان استفاده شده است.

نتایج مرور پژوهش‌های پیشین و مصاحبه با متخصصان نشان داده است که روکش‌های آسفالتی UTBWC بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی متراکم، مستعد تجمع برف و یخبندان هستند و برف تشکیل‌شده در سطح آن‌ها دیرتر ذوب می‌شود. همچنین، نگهداری روکش‌های آسفالتی UTBWC در زمستان نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متراکم، نیازمند مقدار مواد یخ‌زدا و دفعات عملیات برف‌روبی بیشتر است. استفاده از روکش UTBWC در مسیرهایی که در معرض وزش شدید باد و عمود بر جهت غالب باد هستند، توصیه نمی‌شود.

از سوی دیگر، نتایج بررسی موردی نشان داده است که استفاده از روکش آسفالتی UTBWC عملکرد بهتری در مقایسه با مخلوط آسفالتی متراکم دارد. بنابراین، اگرچه هزینه‌های نگهداری روکش آسفالتی UTBWC در زمستان بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی متراکم است، اما عملکرد بهتر آن‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری کلی روسازی، می‌تواند استفاده از روکش آسفالتی UTBWC را توجیه کند.

References- منابع

1. Wegman, D.E., Sabouri, M. and Intertec, B., 2018. Ultra-thin bonded wearing course (UTBWC) snow, ice, and wind effects: Transportation Research Synthesis (No. TRS 1804). Minnesota. Dept. of Transportation. Research Services & Library.
2. Zhao, Y. and Goulias, D., 2024. Factors affecting winter performance of ultra-thin bonded wearing course (UTBWC). *International Journal of Pavement Engineering*, *25*(1), p.2417972. https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2417972

3. Guo, M., Zhang, R., Du, X. and Liu, P., 2024. A state-of-the-art review on the functionality of ultra-thin overlays towards a future low carbon road maintenance. *Engineering*, 32, pp.82-98. https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.03.020
4. Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Asadi Azadgoleh, M., Mohammadi, M.M. and Abdipour, S.V., 2024. Toward sustainable roads: a critical review on nano-TiO2 application in asphalt pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, *9*(5), p.148. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4
5. Hanson, D.I., 2001. Construction and performance of an ultrathin bonded hot-mix asphalt wearing course. *Transportation research record*, *1749*(1), pp.53-59. https://doi.org/10.3141/1749-08
6. Cooper, S.B. and Mohammad, L.N., 2004. Novachip surface treatment: six year evaluation (No. 04-2TA). Louisiana Transportation Research Center.
7. Yu, J., Chen, F., Deng, W., Ma, Y. and Yu, H., 2020. Design and performance of high-toughness ultra-thin friction course in south China. *Construction and Building Materials*, *246*, p.118508. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118508
8. Khanal, S., Gilliland, A. and Mohanraj, K., 2023. Ultra-thin bonding wearing course case study (No. FHWA-HIF-24-020). United States. Federal Highway Administration. Office of Preconstruction, Construction, and Pavements.
9. Ahmed, S., Dave, E.V., Buttlar, W.G. and Exline, M.K., 2013. Cracking resistance of thin-bonded overlays using fracture test, numerical simulations and early field performance. *International Journal of Pavement Engineering*, *14*(6), pp.540-552.. https://doi.org/10.1080/10298436.2012.711474
10. Ahmed, A.A., 2010. Ultra-Thin Bonded Wearing Course Performance Update, Minnesota (No. MN/RC 2009-30).
11. Sabouri, M., Wegman, D. and Intertec, B. 2019. Ultra-thin bonded wearing course (UTBWC) winter maintenance: *Transportation Research Synthesis (No. TRS 1904)*. Minnesota. Dept. of Transportation. Research Services & Library.
12. Yildirim, Y., Dossey, T., Fults, K., Tahmoressi, M. and Trevino, M., 2007. Winter maintenance issues associated with new generation open-graded friction courses (No. FHWA/TX-08/0-4834-2). Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
13. Huber, G. and Huber, G.A., 2000. Performance survey on open-graded friction course mixes (Vol. 284). *Transportation Research Board*.
14. Autelitano, F., Petrolo, D., Chiapponi, L., Giuliani, F. and Longo, S., 2022. Temporary clogging effects induced by a sustainable anti-icing hydrogel on the hydraulic conductivity and inertia coefficient of open-graded asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, *361*, p.129495. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129495
15. Putman, B.J., 2012. Evaluation of open-graded friction courses: construction, maintenance, and performance (No. FHWA-SC-12-04). South Carolina. Dept. of Transportation.
16. Seely, M., 1999. Climatological characterization of snowfall and snowdrift in Minnesota. Center for Transportation Studies. Minnesota. Dept. of Transportation.
17. Ye, Z., Veneziano, D. and Shi, X., 2013. Estimating statewide benefits of winter maintenance operations. *Transportation Research Record*, *2329*(1), pp.17-23. https://doi.org/10.3141/2329-03
18. Geng, L., Ma, T., Zhang, J., Huang, X. and Hu, P., 2017. Research on performance of a dense graded ultra-thin wearing course mixture. *Applied Sciences*, *7*(8), p.800. https://doi.org/10.3390/app7080800
19. Hu, M., Li, L. and Peng, F., 2019. Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course. *Construction and Building Materials*, *219*, pp.101-110. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.205
20. Ruranika, M.M. and Geib, J., 2007. Performance of ultra-thin bounded wearing course (UTBWC) surface treatment on US-169 Princeton, MN (No. MN/RC 2007-18).