



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Investigating the Effect of Two-Component Parafiber on the Mechanical Properties and Moisture Resistance of Asphalt

Shahram Tabasheri^{1*}, Shahrokh Rezaei², Hasan Sepahvand³

1*-PhD Candidate in Structural Engineering, Islamic Azad University, Zanzan Branch, Iran

2- PhD in Structural Engineering; University of Tehran; Lecturer, Faculty of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran

3- MSc in Civil Engineering (Road and Transportation), Iran University of Science and Technology; Lecturer, Imam Ali University, Tehran, Iran

Received: 25 July 2026; Revised: 29 July 2026; Accepted: 29 August 2026; Published: 21 January 2027

Abstract

Airport runways, as critical aviation infrastructure, are continuously subjected to heavy dynamic loads during aircraft takeoff and landing, as well as diverse environmental conditions. In recent years, climate change has introduced severe temperature fluctuations, intense rainfall, and extreme weather events, posing serious challenges to the performance and durability of asphalt pavements on airport runways. This study investigates the effect of using two-component Parafiber (comprising a polymer soluble in bitumen and cellulose fibers) on the mechanical and performance properties of special asphalt mixtures designed for airport runways. To precisely evaluate the behavior of asphalt mixtures, a device for determining compressive and tensile strength of asphalt with a digital display was designed and manufactured. Two mix designs were prepared: a control mixture without additives and a mixture containing 1.5% two-component Parafiber. Marshall stability and flow tests, indirect tensile strength (ITS) tests, and moisture susceptibility tests (AASHTO T283) were conducted on the specimens. The results indicate that the use of two-component Parafiber increases Marshall stability from 1390 to 1420 kg (an increase of approximately 2%), reduces flow from 2.4 to 2.1 mm, and improves the Marshall stability ratio (24-hour to 30-minute immersion) from 78% to 87%. Furthermore, the indirect tensile strength of fiber-reinforced specimens in dry condition (930 kPa) and saturated condition (785 kPa) showed significant improvement compared to the control mixture (850 kPa and 660 kPa, respectively). The tensile strength ratio (TSR) for the fiber-reinforced mixture was 84.4%, compared to 77.6% for the control mixture. The bitumen film thickness in the fiber-reinforced mixture increased due to proper aggregate fracture and uniform bitumen coating, which reduced stripping and enhanced moisture resistance. Based on the findings, the use of Parafiber-reinforced asphalt can be considered an effective solution for increasing the strength and durability of airport runways against adverse environmental conditions and heavy air traffic loads.

Keywords: Airport runway asphalt, Parafiber, Indirect tensile strength, Marshall stability, Moisture susceptibility

Cite this article as Tabasheri, S., Rezaei, S. and Sepahvand, H. (2027). Investigating the Effect of Two-Component Parafiber on the Mechanical Properties and Moisture Resistance of Asphalt. (e251920). Civil and Project journal, 8(11), e251920 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.599093.1471>

ISSN: 2676-511X

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: shahram8631@gmail.com



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی تأثیر الیاف پارافایبر دو جزئی بر مشخصات مکانیکی و مقاومت رطوبتی آسفالت

شهرام تباشری^{۱*}، شاهرخ رضایی^۲، حسن سپهوند^۳

*۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، ایران

۲- دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران، مدرس دانشکده مهندسی و پرواز دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، مدرس دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۰۳ مرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۰۷ مرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۰۷ شهریور ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ بهمن ۱۴۰۵

چکیده

باند‌های فرودگاهی به عنوان یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های حمل‌ونقل هوایی، همواره تحت تأثیر بارهای دینامیکی سنگین ناشی از برخاست و فرود هواپیماها و شرایط محیطی متنوع قرار دارند. تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر با ایجاد نوسانات شدید دمایی، افزایش بارش‌های سیل‌آسا و وقوع پدیده‌های حدی، چالش‌های جدی برای عملکرد و دوام روسازی‌های آسفالتی باند‌های فرودگاهی ایجاد کرده است. در این پژوهش، تأثیر استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی (شامل پلیمر حل‌شونده در قیر و الیاف سلولزی) بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی آسفالت ویژه باند‌های فرودگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی دقیق رفتار مخلوط‌های آسفالتی، دستگاه تعیین مقاومت فشاری و کششی آسفالت با قابلیت نمایشگر دیجیتالی طراحی و ساخته شد. دو طرح اختلاط شامل طرح شاهد بدون افزودنی و طرح با ۱/۵ درصد نسبت به قیر بهینه الیاف پارافایبر دو جزئی تهیه گردید و آزمایش‌های تعیین استحکام مارشال، روانی، مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی موجب افزایش استحکام مارشال از ۱۳۹۰ به ۱۴۲۰ کیلوگرم (افزایش حدود ۲ درصد)، کاهش روانی از ۲/۴ به ۲/۱ میلی‌متر و افزایش نسبت استحکام مارشال (نسبت ۲۴ ساعت به ۳۰ دقیقه) از ۷۸ به ۸۷ درصد می‌شود. همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی الیاف در حالت خشک (۹۳۰ کیلوپاسکال) و اشباع (۷۸۵ کیلوپاسکال) در مقایسه با نمونه شاهد (به ترتیب ۸۵۰ و ۶۶۰ کیلوپاسکال) بهبود قابل توجهی داشته است. نسبت مقاومت کششی (TSR) برای طرح حاوی الیاف برابر ۸۴/۴ درصد و برای طرح شاهد برابر ۷۷/۶ درصد به دست آمد. ضخامت غشای قیری در مخلوط حاوی الیاف به دلیل شکستگی مناسب مصالح و پوشش یکنواخت قیر بر روی سنگدانه‌ها افزایش یافته که این امر موجب کاهش عریان‌شدگی و افزایش دوام رطوبتی می‌گردد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، استفاده از آسفالت مسلح‌شده با الیاف پارافایبر دو جزئی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت و دوام باند‌های فرودگاهی در برابر شرایط محیطی نامساعد و بارهای سنگین ترافیک هوایی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آسفالت باند فرودگاهی، الیاف پارافایبر، مقاومت کششی غیرمستقیم، استحکام مارشال، حساسیت رطوبتی

۱- مقدمه

باند‌های فرودگاهی به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر زیرساخت حمل‌ونقل هوایی، نقشی حیاتی در ایمنی و کارایی عملیات پروازی ایفا می‌کنند. این سازه‌ها به دلیل تحمل بارهای دینامیکی سنگین ناشی از برخاست و فرود هواپیماها، تنش‌های حرارتی ناشی از تغییرات دمایی و همچنین عوامل محیطی نظیر بارندگی و یخبندان، همواره در معرض انواع خرابی‌ها از جمله ترک‌خوردگی، شیارشدگی و عریان‌شدگی قرار دارند. با توجه به رشد چشمگیر استفاده از آسفالت‌های با مقاومت بالا برای باند‌های فرودگاه‌های مسافربری و نظامی، مطالعات گسترده‌ای جهت افزایش کیفیت و مقاومت آسفالت انجام شده است.

استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش عمر روسازی شناخته شده است. الیاف با ایجاد پل‌های ارتباطی در سراسر مخلوط، تنش‌ها را در سطح وسیع‌تری توزیع کرده و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌نمایند. الیاف پارافینر به عنوان یک محصول دو جزئی، ترکیبی از الیاف سلولزی و پلیمرهای خاص است که جزء پلیمری آن با حل شدن در قیر در دمای ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی شده و جزء سلولزی آن با ایجاد شبکه سه‌بعدی در مخلوط، باعث افزایش مقاومت کششی آسفالت می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، ساخت دستگاه تعیین مقاومت فشاری و کششی آسفالت، استفاده همزمان از الیاف و پلیمر جهت افزایش مقاومت خزشی، افزایش مقاومت کشسانی قیر، بهبود مقاومت در برابر عوامل جوی و ترک‌خوردگی، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل ناشی از اعمال بار و ضربه در زمان برخاست و فرود، و ایجاد اصطکاک سطحی مناسب با پوشش قیری الیاف سلولزی و پلیمری می‌باشد. اهداف فرعی تحقیق نیز شامل حفظ منابع طبیعی و محیط زیست از طریق افزایش عمر روسازی و کاهش مصرف مجدد مصالح، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، ارائه راهکارهای مناسب برای استفاده از دیگر مواد افزودنی آسفالت، و کاهش آلودگی زیست‌محیطی است.

۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. احمد الحسینیات و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف آرامید تولیدشده در مزرعه و پلیمر، نشان دادند که افزودن الیاف آرامید به مخلوط آسفالتی بسته به نوع الیاف، خواص مخلوط را متفاوت بهبود می‌بخشد. به‌طور کلی، قیرهای اصلاح‌شده مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده و افزودن الیاف باعث بهبود مقاومت مخلوط‌های تقویت‌شده در برابر شیارشدگی و آسیب‌های رطوبتی شد.

کارلوس لیوا (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر مورفولوژی الیاف بازالت بر خواص چسب‌ها و مخلوط آسفالت پرداخت. نتایج نشان داد که رفتار رئولوژیکی بایندهای آسفالتی را می‌توان با هر دو نوع الیاف بازالت خردشده (CBF) و الیاف بازالت فلوکولنت (FBF) افزایش داد. الیاف FBF سطح تماس بیشتری با ملات آسفالت در مقایسه با CBF نشان می‌دهند که منجر به بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل در شرایط برشی یکسان می‌شود و حساسیت رطوبت را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد.

چیانولوی و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی مکانیسم‌های تقویت الیاف خمیر بازیافتی روی آسفالت ماستیک پرداختند. نتایج نشان داد که در محیط‌های با دمای بالا که آسفالت در حالت روان است، ظرفیت جذب روغن الیاف، اثر تقویت آن‌ها را بر روی آسفالت تعیین می‌کند.

تنگفی نیان و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی مقاومت به ترک و مکانیسم گسترش ترک در مخلوط‌های آسفالت داغ بازیافتی تقویت‌شده با الیاف فولادی، نشان دادند که با توجه به اینکه چسب‌های کهنه روی سطح آسفالت RAP باعث کاهش اتصال در سطح مشترک ملات آسفالت می‌شود، تقویت الیاف فولادی این مشکل را کاهش می‌دهد.

حسام اکرم و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی چگونگی جلوگیری از شکستگی مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن پرداختند. نتایج نشان داد که گنجایش مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های شکست مخلوط دارد.

آگستوکاننه فالچو (۲۰۲۴) تأثیر شرایط پیری را بر روی ماستیک آسفالت متخلخل تقویت‌شده با الیاف بررسی کرد. نتایج نشان داد که خواص خستگی و دمای پایین ماستیک‌های آسفالت تحت تأثیر افزودن فیبر قرار نمی‌گیرد، در حالی که شرایط پیری تأثیر قابل توجه‌تری را به همراه دارد.

در ایران نیز پژوهش‌های ارزشمندی در این حوزه انجام شده است. حامد معتمدی و حمیدرضا امیری (۱۳۹۷) با بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف، نشان دادند که الیاف شماره یک (وارداتی) به جز خزش دینامیکی، کلیه پارامترهای به‌دست‌آمده از الیاف شماره دو (تولید داخلی) عملکرد بهتری داشت.

اویس افضلی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی استفاده از الیاف پلیمری در خواص مکانیکی آسفالت گرم پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلیمری تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت خمشی و سختی نسبت به مخلوط شاهد دارد. همچنین استفاده از الیاف منجر به کاهش عمق شیارشدگی از ۶/۷۴ به ۲/۸۹ میلیمتر گردید و تعداد سیکل عمر شکست از ۳۷۸۳۸۶ به ۹۱۹۰۹۱ افزایش داشت.

محمود عامری و سیده نگار زادپرست (۱۴۰۳) به بهینه‌یابی الیاف چندجزئی پلیمری و الیاف شیشه در مخلوط آسفالت گرم پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف چندجزئی باعث بهبود قابل توجه در خصوصیات دمای پایین، شیارشدگی و عریان‌شدگی می‌گردد.

گلچین و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی اثر الیاف پارافایبر بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی گرم کارخانه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که در مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه و ۶ درصد قیر، افزایش الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، مقدار استقامت مارشال را ۱۷/۴ درصد افزایش و مقدار روانی را ۳/۸ درصد کاهش می‌دهد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

۳-۱. مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل سنگدانه‌های درشت (۱۹-۱۲ میلیمتر)، سنگدانه‌های متوسط (۱۲-۶ میلیمتر)، ماسه (۰-۶ میلیمتر) و فیلر از معدن شن و ماسه آبیک (کارخانه آسفالت آباد راهان پارس) از نوع مصالح کوهی دولومیتی ۱۰۰ درصد شکسته تهیه شد. قیر مصرفی از نوع خالص ۷۰-۶۰ از شرکت نفت پاسارگاد تهران تأمین گردید. الیاف پارافایبر دو جزئی شامل پلیمر حل‌شونده در قیر و الیاف سلولزی از شرکت یکتا ماندگار تهیه شد.

۳-۲. طراحی و ساخت دستگاه تعیین مقاومت فشاری و کششی آسفالت

به منظور ارزیابی دقیق مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های آسفالتی، دستگاهی شامل یک فک ثابت و یک فک متحرک با سرعت ۵۰/۰۸ میلیمتر بر دقیقه طراحی و ساخته شد طبق مفاد هر دو استاندارد ASTM D6927 و AASHTO T245، سرعت بارگذاری دستگاه مارشال 50 ± 5 میلی‌متر بر دقیقه (معادل ۲ اینچ بر دقیقه) تعیین شده است. این نرخ بارگذاری یکنواخت، شرط اساسی برای اعتبار نتایج آزمایش محسوب می‌شود. تجهیزات آزمایشگاهی معتبر نیز این سرعت را به صورت ۵۰/۰۸

میلی‌متر بر دقیقه (معادل دقیق ۲ اینچ بر دقیقه) در مشخصات فنی خود درج می‌کنند. پیش از اعمال بار، نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در حمام آب با دمای 60 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند تا به تعادل حرارتی برسند. این دستگاه با نمایشگر دیجیتال قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان استحکام و روانی نمونه‌های آسفالتی می‌باشد. کالیبراسیون دستگاه بر اساس استانداردهای ASTM D1559 انجام گردید.

۳-۳. طرح اختلاط

دو طرح اختلاط بر اساس دانه‌بندی ردیف ۴ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران تهیه شد:

طرح شماره ۱ (شاهد): بدون افزودنی

طرح شماره ۲: با ۱/۵ درصد الیاف پارافینر دو جزئی نسبت به وزن قیر بهینه

جدول ۱- درصد اختلاط

شماره الک	اندازه الک (mm)	میانگین حدود مشخصات	درصد عبوری طرح (۲) الیاف پارافینر	درصد عبوری طرح (۱) شاهد
in 3/4	۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
in 1/2	۵/۱۲	۹۵	۹۵	۹۵
in 3/16	۴,۷۵	۵۹	۵۸	۵۸
# ۸	۲,۳۶	۴۳	۳۶	۳۶
# ۵۰	۰,۳	۱۳	۱۱	۱۱
# ۲۰۰	۰,۰۷۵	۶	۴/۵	۴/۵

نسبت اختلاط مصالح سنگی شامل ۱۰ درصد درشت‌دانه (۱۹-۱۲ میلیمتر)، ۴۳ درصد متوسط (۱۲-۶ میلیمتر)، ۴۳ درصد ماسه (۶-۰ میلیمتر) و ۳ درصد فیلر بود. درصد قیر بهینه بر اساس روش مارشال تعیین گردید.

۳-۴. آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش‌های زیر بر روی مصالح سنگی، قیر و مخلوط‌های آسفالتی انجام شد:

آزمایش‌های مصالح سنگی: دانه‌بندی (ASTM C136)، درصد مواد کوچکتر از ۷۵ میکرون (AASHTO T11)، هیدرومتری (ASTM D422)، حدود اتربرگ (AASHTO T89, T90)، ارزش ماسه‌ای (AASHTO T176)، درصد پولکی و سوزنی (ASTM C4791)، درصد شکستگی (ASTM D5821)، سایش لوس‌آنجلس (AASHTO T96)، چسبندگی قیر به مصالح (AASHTO T182)، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO T104)، وزن مخصوص و جذب آب (AASHTO T48, T85, T84, T100).



شکل ۱- الک های استاندارد مورد استفاده در دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۲- تعداد آزمایشات دانه بندی مصالح

دانه بندی TS			
	مشخصات مصالح سنگی (mm)	تعداد آزمایش	استاندارد
TS1	۱۲-۱۹	۱	ASTM C136
TS2	۶-۱۲	۱	ASTM C136
TS3	۰-۶	۱	ASTM C136
TS5	فیلر	۱	ASTM D422



شکل ۲- تعیین مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰

آزمایش‌های قیر: وزن مخصوص (AASHTO T228)، درجه نفوذ (AASHTO T49)، نقطه نرمی (AASHTO T53)، کشش (AASHTO T51)، درجه اشتعال (AASHTO T48)، ویسکوزیته کینماتیک (AASHTO T201)، افت وزنی در برابر حرارت (ASTM D6).

جدول ۳- تعداد آزمایشات قیر

تعداد آزمایش	نوع آزمایش	نوع قیر	
۱	وزن مخصوص	۶۰-۷۰	TZ1
۱	درجه نفوذ	۶۰-۷۰	TZ2
۱	نقطه نرمی	۶۰-۷۰	TZ3
۱	کشش (انگمی)	۶۰-۷۰	TZ4
۱	درجه اشتعال	۶۰-۷۰	TZ5
۱	ویسکوزیته	۶۰-۷۰	TZ6
۱	افت وزنی در برابر حرارت	۶۰-۷۰	TZ7

آزمایش‌های مخلوط آسفالتی: تهیه نمونه‌های مارشال با درصدهای مختلف قیر (۳/۵، ۴/۰، ۴/۵، ۵/۰، ۵/۵ و ۶/۰ درصد)، تعیین وزن مخصوص حقیقی (ASTM D2726)، تعیین وزن مخصوص تئوری (AASHTO T209)، تعیین استحکام و روانی مارشال (ASTM D1559)، تعیین نسبت استحکام مارشال (غوطه‌وری ۲۴ ساعته)، آزمایش حساسیت رطوبتی و مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T283).

مراحل کلیدی آزمایش

ساخت نمونه: نمونه‌های استوانه‌ای با درصد فضای خالی مشخص (حدود ۶ تا ۸ درصد) ساخته می‌شوند. معمولاً از نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر (۶ اینچ) استفاده می‌شود.

تقسیم به دو گروه: نمونه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند تا میانگین فضای خالی آنها تقریباً برابر باشد.

گروه مرجع (خشک): این نمونه‌ها تحت هیچ‌گونه شرط‌سازی مرطوب قرار نمی‌گیرند.

گروه شرط‌سازی شده (مرطوب): این نمونه‌ها مراحل زیر را طی می‌کنند:

اشباع تحت خلأ: نمونه‌ها در آب قرار گرفته و تحت خلأ تا سطح اشباع ۷۰ تا ۸۰ درصد قرار می‌گیرند.

انجماد: نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی حاوی مقدار کمی آب، به مدت حداقل ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد منجمد می‌شوند.

ذوب و حمام آب گرم: نمونه‌ها پس از خروج از کیسه، به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. سپس به مدت ۲ ساعت دیگر در حمام ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای آزمایش) نگهداری می‌شوند. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS): هر دو گروه نمونه (مرجع و شرطی شده) تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۵۰،۸ میلی‌متر بر دقیقه (۲ اینچ بر دقیقه) قرار گرفته و مقاومت کششی آنها اندازه‌گیری می‌شود. محاسبه نسبت مقاومت کششی (TSR): نسبت مقاومت کششی نمونه‌های شرطی شده به نمونه‌های مرجع محاسبه می‌شود.



شکل ۳- اختلاط مصالح سنگی با قیر جهت آزمایش مارشال



شکل ۴- متراکم کردن نمونه مارشال



شکل ۵- نمونه های متراکم شده مارشال



شکل ۶- تعیین وزن مخصوص حقیقی آسفالت متراکم شده

۴. نتایج و بحث

۴-۱. ویژگی های مصالح سنگی

نتایج آزمایش های مرغوبیت مصالح سنگی نشان داد که تمامی پارامترها مطابق با استانداردهای ملی و بین المللی می باشند. درصد سایش لوس آنجلس برای مصالح درشت دانه ۲۳ درصد، درصد شکستگی یک و دو جبهه ۱۰۰ درصد، درصد تطویل و تورق به ترتیب ۲ و ۳ درصد، و ارزش ماسه ای ۳۹ درصد بود. وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی برای طرح شماره ۱ برابر ۲/۶۷۵ و برای طرح شماره ۲ برابر ۲/۶۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب تعیین گردید.

جدول ۴- نتیجه مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصه	
فیلر مصالح	ماسه ۶-۰ میلیمتر	مخلوط درشت دانه		
-	-	B	نوع دانه بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (AASHTO-T96)
-	-	۵۰۰	تعداد دور	
-	-	۲۳	درصد سایش	
N.P	N.P	-	دامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ (AASHTO-T89,90)
-	-	-	حد خمیری (PL)	
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	حد روانی (LL)	
-	-	۱۰۰	در یک جبهه	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (ASTM- D5821)
-	-	۱۰۰	در دو جبهه	
	39 47		گوشه داری مصالح سنگی ریزدانه (درصد)-(ASTM- C1252)	
-	-	۲	تطویل	درصد تطویل و تورق (BS-812)
-	-	۳	تورق	
-	0/6		ریزدانه	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO- T104)
-	-	0/3	درشت دانه	

جدول ۵- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی طرح شماره ۱

مشخصه	وزن مخصوص		درصد جذب آب
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۴	۲,۷۳۰	۲,۶۸۲	۰,۷
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲,۷۴۴	۲,۶۵۷	۱/۲
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲,۷۱۲		-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی	۲,۶۷۵		

جدول ۶- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی طرح شماره ۲

مشخصه	وزن مخصوص		درصد جذب آب
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۴	۲,۷۳۹	۲,۶۹۵	۰,۶
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲,۷۵۵	۲,۶۶۰	۱
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲,۷۱۲		-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی	۲,۶۸۵		

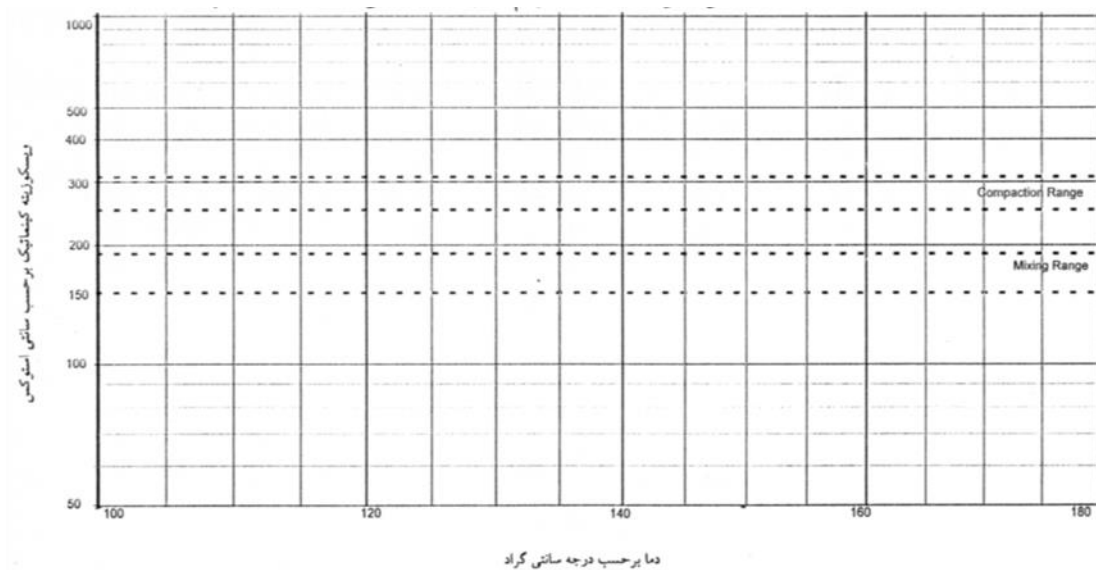
۲-۴. ویژگی‌های قیر

نتایج آزمایش‌های قیر خالص ۷۰-۶۰ نشان داد که درجه نفوذ ۶۷ دهم میلیمتر، نقطه نرمی ۵۱ درجه سانتی‌گراد، کشش بیش از ۱۰۰ سانتیمتر، درجه اشتعال ۳۰۳ درجه سانتی‌گراد و ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۳۱۵ سانتی‌استوکس می‌باشد. بر اساس ویسکوزیته قیر، دمای تراکم ۱۳۴ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و دمای اختلاط ۱۵۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید.

جدول ۷- نتایج آزمایشهای رایج بر روی قیر خالص و مشخصات استاندارد قیرهای حاصل (گروه ۶۰-۷۰)

مشخصات استاندارد قیرهای خالص (گروه ۶۰-۷۰)		نتایج	روش آزمایش		آزمایشات قیرهای خالص
			AA SHTO	AST M	
حداکثر	حداقل				
-	-	۱۰۱۴	T2 28	D70	وزن مخصوص در ۲۵ °C
۷۰	۶۰	۶۷	T4 9	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلیمتر
56	۴۹	۵۱	T5 3	D36	نقطه نرمی (ساچمه - حلقه) بر حسب درجه سانتیگراد
-	۱۰	بیش از ۱۰۰	T5 1	D11 3	مقدار کشش در ۲۵ °C بر حسب سانتیمتر
-	۹۹	۹۹/۸	T4 4	D20 42	حلالیت در تری کلرواتیلن بر حسب درصد
-	۲۳	۳۰۳	T4 8	D92	درجه اشتعال (رو باز - کلوند) بر حسب درجه سانتیگراد
-	-	۶۲۰	T2 01	D21 70	کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ °C (سانتی استوکس)
-	-	۳۱۵	T2 01	D21 70	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ °C (سانتی استوکس)
-	-	۱۱۲	T2 01	D21 70	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ °C (سانتی استوکس)
۰/۸	-	۰/۰۲	T1 79	D17 54	لغاب نازک قیر (۱۶۳ °C - پنج ساعت) افت حرارتی، درصد
-	-	۵۰	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلیمتر
-	۵۴	۷۵	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
-	۵۰	بیش از ۵۰	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش ۲۵ °C بر حسب سانتیمتر

شکل ۷- نمودار تعیین دمای اختلاط و تراکم قیر بر اساس ویسکوزیته



۳-۴. نتایج آزمایش‌های مارشال

نتایج آزمایش‌های مارشال برای دو طرح اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف پارافینر موجب افزایش استحکام مارشال در تمامی درصد‌های قیر شده است. بیشینه استحکام برای هر دو طرح در ۵/۵ درصد قیر رخ داده است. همچنین روانی نمونه‌های حاوی الیاف در تمامی درصد‌های قیر کمتر از نمونه شاهد بوده است که نشان‌دهنده افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط می‌باشد.

جدول ۸- نتایج استحکام در درصد‌های مختلف قیر

درصد قیر	استحکام مارشال	
	طرح شماره ۱	طرح شماره ۲
۳,۵	۱۰۲۰	۱۰۵۰
۴,۰	۱۱۲۰	۱۱۶۵
۴,۵	۱۲۵۰	۱۲۸۵
۵,۰	۱۳۵۲	۱۳۹۰
۵,۵	۱۳۹۰	۱۴۲۰
۶,۰	۱۲۲۰	۱۴۱۵

جدول ۹- نتایج نرمی در درصدهای مختلف قیر

درصد قیر	نرمی آسفالت (FLOW)	
	طرح شماره ۱	طرح شماره ۲
۳,۵	۸,۸	۸,۶
۴,۰	۷,۲	۷
۴,۵	۵,۳	۵
۵,۰	۳,۶	۳,۲
۵,۵	۲,۴	۲,۱
۶,۰	۱,۸	۱,۵

نتایج نشان می‌دهد که در درصد قیر بهینه (۵/۵ درصد)، استحکام طرح شماره ۲ (۱۴۲۰ کیلوگرم) حدود ۲ درصد بیشتر از طرح شماره ۱ (۱۳۹۰ کیلوگرم) است. این افزایش استحکام به دلیل حضور الیاف سلولزی و پلیمری در مخلوط است که با ایجاد شبکه سه‌بعدی، تنش‌های وارده را در سطح وسیع‌تری توزیع می‌کنند. نتایج این پژوهش با یافته‌های گلچین و همکاران (۱۴۰۰) که افزایش استحکام مارشال را در مخلوط‌های حاوی الیاف پارافیر گزارش کردند، همخوانی دارد.

۴-۴. فضای خالی و پارامترهای حجمی

نتایج مربوط به فضای خالی آسفالت متراکم شده (Air Voids)، فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی پر شده با قیر (VFA) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱۰- فضای خالی آسفالت متراکم شده در درصد های مختلف قیر

درصد قیر	فضای خالی (Void)	
	طرح شماره ۱	طرح شماره ۲
۳,۵	۷,۴	۷,۲
۴,۰	۶,۲	۶,۰
۴,۵	۴,۶	۴,۳
۵,۰	۳,۳	۳,۱
۵,۵	۲,۱	۱,۹
۶,۰	۱,۷	۱,۵

جدول ۱۱- فضای خالی مصالح سنگی در درصد های مختلف قیر

درصد قیر	VMA	
	طرح شماره ۱	طرح شماره ۲
۳,۵	۱۴,۵	۱۴,۶
۴,۰	۱۴,۵	۱۴,۶
۴,۵	۱۴,۲	۱۴,۳
۵,۰	۱۴,۱	۱۴,۲
۵,۵	۱۴,۲	۱۴,۳
۶,۰	۱۴,۸	۱۵,۰

جدول ۱۲- فضای خالی پر شده با قیر در درصدهای مختلف قیر

درصد قیر	فضای خالی پر شده با قیر VFA	
	طرح شماره ۱	طرح شماره ۲
۳,۵	۴۷.۱	۴۹.۲
۴,۰	۵۵.۷	۵۷.۶
۴,۵	۶۵.۴	۶۷.۸
۵,۰	۷۱.۵	۷۶.۸
۵,۵	۸۲.۸	۸۵.۳
۶,۰	۸۶.۷	۸۸.۶

نتایج نشان می‌دهد که در درصد قیر بهینه (۵/۵ درصد)، فضای خالی طرح شماره ۲ (۱/۹ درصد) کمتر از طرح شماره ۱ (۲/۱ درصد) است که نشان‌دهنده تراکم بهتر و کاهش حباب‌های هوای اضافی در مخلوط حاوی الیاف می‌باشد. همچنین VFA در طرح شماره ۲ (۸۵/۳ درصد) بیشتر از طرح شماره ۱ (۸۲/۸ درصد) است که نشان‌دهنده پوشش بهتر قیر بر روی سنگدانه‌ها و افزایش ضخامت غشای قیری در حضور الیاف می‌باشد.

۴-۵. نسبت استحکام مارشال

نتایج نسبت استحکام مارشال (نسبت استحکام نمونه‌های غوطه‌ور به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد به نمونه‌های غوطه‌ور به مدت ۳۰ دقیقه) نشان داد که این نسبت برای طرح شماره ۱ برابر ۷۸ درصد و برای طرح شماره ۲ برابر ۸۷ درصد می‌باشد. هر دو مقدار از حداقل ۷۵ درصد تعیین‌شده در آیین‌نامه بیشتر هستند، اما افزایش ۱۱ درصدی در طرح شماره ۲ نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این مخلوط در برابر تخریب ناشی از رطوبت است.

جدول ۱۳- نسبت استحکام نمونه مارشال ۳۰ دقیقه نسبت به ۲۴ ساعت طرح شماره ۱

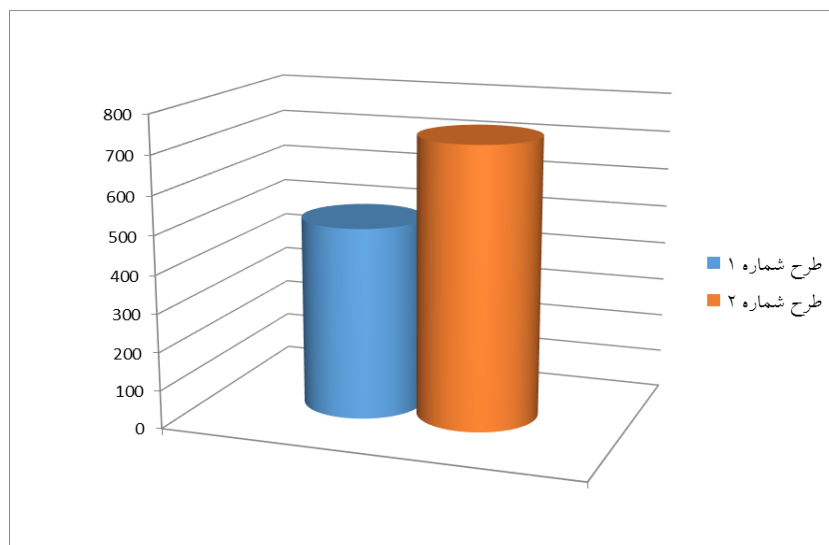
زمان غوطه‌وری درون آب	وزن مخصوص نمونه (میانگین سه نمونه)	فضای خالی نمونه آسفالتی (درصد)	استحکام مارشال	نسبت استحکام مارشال (درصد)
۳۰ دقیقه	۲/۴۰۵	۴	۱۲۶۰	۷۸
۲۴ ساعت	۲/۴۰۵	۴	۹۸۲	

جدول ۱۴- نسبت استحکام نمونه مارشال ۳۰ دقیقه نسبت به ۲۴ ساعت طرح شماره ۲

زمان غوطه وری درون آب	وزن مخصوص نمونه (میانگین سه نمونه)	فضای خالی نمونه آسفالتی (درصد)	استحکام مارشال	نسبت استحکام مارشال (درصد)
۳۰ دقیقه	۲/۴۱۵	۴	۱۳۰۰	۸۷
۲۴ ساعت	۲/۴۱۵	۴	۱۱۳۱	

۴-۶. مقاومت کششی غیرمستقیم

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) بر اساس استاندارد AASHTO T283 در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک (کیلوگرم)



شکل ۸- نمونه مقاومت کششی آسفالت

مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی الیاف در حالت خشک حدود ۹/۴ درصد و در حالت اشباع حدود ۱۸/۹ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. نسبت مقاومت کششی (TSR) برای طرح شماره ۲ برابر ۸۴/۴ درصد و برای طرح شماره ۱

برابر ۷۷/۶ درصد می‌باشد که هر دو از حداقل ۷۵ درصد استاندارد بیشتر هستند. افزایش TSR در طرح شماره ۲ نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این مخلوط در برابر آسیب رطوبتی است که یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی در باندهای فرودگاهی محسوب می‌شود.

۴-۷. تحلیل و بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی تأثیر مثبتی بر تمامی پارامترهای مورد بررسی داشته است. افزایش استحکام مارشال و کاهش روانی نشان‌دهنده بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک است که در باندهای فرودگاهی به دلیل بارهای سنگین و مکرر ناشی از برخاست و فرود هواپیماها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بهبود مقاومت در برابر رطوبت (افزایش TSR از ۷۷/۶ به ۸۴/۴ درصد) را می‌توان به افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی نسبت داد. جزء پلیمری الیاف پارافایبر با حل شدن در قیر در دمای ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی می‌شود و جزء سلولزی آن با ایجاد شبکه سه‌بعدی، مقاومت کششی آسفالت را افزایش می‌دهد. این پدیده باعث افزایش ضخامت غشای قیری و کاهش عریان‌شدگی سنگدانه‌ها در حضور آب می‌شود.

کاهش فضای خالی در نمونه‌های حاوی الیاف نشان‌دهنده تراکم بهتر مخلوط است که می‌تواند به کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام روسازی در برابر عوامل محیطی کمک کند. این موضوع به‌ویژه در مناطقی با بارندگی شدید یا یخبندان که آب نفوذی می‌تواند باعث خرابی‌های جدی شود، حائز اهمیت است.

یکی از چالش‌های مهم در باندهای فرودگاهی، ایجاد شیار شدگی ناشی از ترمزگیری و چرخش هواپیماهاست. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آسفالت مسلح‌شده با الیاف پارافایبر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دارد که می‌تواند به افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های نگهداری باندهای فرودگاهی منجر شود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را ارائه نمود:

۱. استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی به میزان ۱/۵ درصد وزن نسبت به قیر بهینه، موجب افزایش استحکام مارشال در درصد قیر بهینه به میزان ۲ درصد می‌شود. این افزایش استحکام به دلیل ایجاد شبکه سه‌بعدی توسط الیاف و توزیع بهتر تنش‌ها در سراسر مخلوط است.

۲. نسبت استحکام مارشال در طرح حاوی الیاف (۸۷ درصد) در مقایسه با طرح شاهد (۷۸ درصد) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این مخلوط در برابر تخریب ناشی از رطوبت می‌باشد.

۳. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی الیاف در حالت خشک و اشباع به ترتیب ۹/۴ درصد و ۱۸/۹ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. نسبت مقاومت کششی (TSR) برای طرح حاوی الیاف (۸۴/۴ درصد) بیشتر از طرح شاهد (۷۷/۶ درصد) بوده که هر دو از حداقل ۷۵ درصد استاندارد AASHTO T283 بیشتر هستند.

۴. فضای خالی در مخلوط حاوی الیاف کمتر از نمونه شاهد است که نشان‌دهنده تراکم بهتر و کاهش حباب‌های هوای اضافی در حضور الیاف می‌باشد. همچنین VFA در طرح حاوی الیاف بیشتر است که نشان‌دهنده پوشش بهتر قیر بر روی سنگدانه‌ها و افزایش ضخامت غشای قیری است.

۵. استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی باعث افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی و کاهش عریان‌شدگی در حضور آب می‌شود که این امر به‌ویژه در باندهای فرودگاهی که در معرض بارندگی و رطوبت قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۶. آسفالت مسلح‌شده با الیاف پارافایبر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل ناشی از اعمال بار و ضربه در زمان برخاست و فرود هواپیما دارد که می‌تواند به افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری باندهای فرودگاهی منجر شود.

۵-۲. پیشنهادات

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

۱. استفاده از الیاف پارافایبر دو جزئی در ساخت آسفالت باندهای فرودگاهی به منظور افزایش مقاومت و دوام روسازی در برابر بارهای سنگین و شرایط محیطی نامساعد توصیه می‌شود.
۲. انجام مطالعات تکمیلی بر روی تأثیر درصدهای مختلف الیاف پارافایبر (بیش از ۱/۵ درصد) بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی آسفالت به منظور یافتن درصد بهینه.
۳. بررسی عملکرد آسفالت مسلح‌شده با الیاف پارافایبر در شرایط مختلف آب و هوایی (گرمسیر، سردسیر و مرطوب) به منظور توسعه کاربرد این فناوری در مناطق مختلف کشور.
۴. مطالعه تأثیر ترکیب الیاف پارافایبر با سایر افزودنی‌های اصلاح‌کننده قیر (مانند پلیمرهای SBS، اپوکسی و پلی‌اورتان) بر عملکرد مخلوط آسفالتی.
۵. انجام آزمایش‌های میدانی بر روی باندهای فرودگاهی ساخته‌شده با آسفالت مسلح‌شده با الیاف پارافایبر به منظور ارزیابی عملکرد درازمدت و مقایسه با آسفالت معمولی.
۶. توسعه مدل‌های عددی برای پیش‌بینی رفتار آسفالت مسلح‌شده با الیاف تحت بارهای دینامیکی ناشی از برخاست و فرود هواپیماها.

منابع

- [١] Asphalt Institute, MS-2 Asphalt Mix Design Methods, 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2014.
- [٢] Asphalt Institute, The Asphalt Handbook (MS-4), 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2007.
- [٣] ASTM International, ASTM D6927-22, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [٤] ASTM International, ASTM D6931-17, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [٥] AASHTO, T 283, Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, DC, USA: AASHTO.
- [٦] Federal Aviation Administration, AC 150/5320-6G, Airport Pavement Design and Evaluation. Washington, DC, USA: FAA, 2021.
- [٧] Federal Aviation Administration, AC 150/5370-10, Standard Specifications for Construction of Airports. Washington, DC, USA: FAA.
- [٨] White, G., "State of the Art: Asphalt for Airport Pavement Surfacing," International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 11, no. 1, pp. 77-98, 2018. doi:10.1016/j.ijprt.2017.07.008.
- [٩] Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [١٠] Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., and Kennedy, T. W., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, 2nd ed. Lanham, MD, USA: NAPA Research and Education Foundation, 1996.
- [١١] Khattak, M. J. and Baladi, G. Y., "Fatigue and Permanent Deformation Models for Polymer-Modified Asphalt Mixtures," Transportation Research Record, no. 1767, pp. 140-149, 2001. doi:10.3141/1767-17.
- [١٢] King, G., Rowe, G., and Reinke, G., "Newark Airport Runway: A Forensic Study Revisited," Transportation Research Record, no. 2372, pp. 12-21, 2013. doi:10.3141/2372-02.
- [١٣] Sun, J., Chai, G., Oh, E., Ma, Z., Ong, D. E. L., and Bell, P., "A Systematic Review of Structural Design Methods and Nondestructive Tests for Airport Pavements," Construction and Building Materials, vol. 411, Art. no. 134543, 2024. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.134543.
- [١٤] Miah, M. T., Oh, E., Chai, G., and Bell, P., "An Overview of the Airport Pavement Management Systems (APMS)," International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 13, pp. 581-590, 2020. doi:10.1007/s42947-020-6011-8.
- [١٥] Dzwilewski, P.-P., Espinoza, A., Peshkin, D., Trejos, C., Dunn, S., & Ashburn, R. (2022). Airport Pavement Surface Treatment: A Literature Review (Report No. DOT/FAA/TC-TN22/13). Federal Aviation Administration, Airport Technology Research and Development Branch.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند در ارتباط با پژوهش حاضر هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، سازمانی، حرفه‌ای یا شخصی وجود ندارد. نویسندگان اعلام می‌کنند در تولید داده‌ها، تحلیل نتایج، تفسیر علمی و نگارش محتوای پژوهشی این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی مولد استفاده نشده است.

این پژوهش از هیچ سازمان یا نهاد عمومی، خصوصی یا غیرانتفاعی حمایت مالی اختصاصی دریافت نکرده است.