

# مرور جامع بر روسازی‌های بتنی نفوذپذیر: رفتار متقابل بین یکپارچگی مکانیکی، مکانیزم‌های گرفتگی و پروتکل‌های نگهداری احیاکننده

مقاله علمی - مروری

میلاذ سلیمانی، دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران  
\*علی افزلی پور (نویسنده مسئول)، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: afzalipourali@chmail.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۴۱۶-۴۰۳

## چکیده

روسازی‌های بتنی نفوذپذیر به طور گسترده به عنوان یک راهکار زیرساخت سبز برای مناطق شهری پذیرفته شده‌اند. در حال حاضر، بتن نفوذپذیر معمولاً در سیستم‌های روسازی نفوذپذیر مانند جاده‌ها، پیاده‌روها، مسیرهای دسترسی (ورودی سواره‌رو)، پارکینگ‌ها و سایر کاربردهای سطحی کم‌بار (سیک) استفاده می‌شود. با این حال، عیب اصلی این نوع روسازی این است که به مرور زمان به دلیل گرفتگی (انسداد منافذ)، نفوذپذیری خود را از دست می‌دهد و به دلیل ساختار منافذش، مقاومت فشاری پایین‌تری دارد. این مسائل حیاتی، موضوع این مقاله مروری هستند. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی مرتبط با مقاومت فشاری، گرفتگی و نگهداری به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. هدف این مقاله مروری، ارائه مجموعه‌ای از یافته‌های برجسته مطالعاتی است که بر مقاومت فشاری، گرفتگی و نگهداری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر تمرکز دارند. شایان ذکر است که روسازی‌های بتنی نفوذپذیر با مقاومت فشاری بالاتر باید در جاده‌هایی با حجم ترافیک بالا استفاده شوند. متعاقباً، نگهداری دوره‌ای برای جلوگیری از گرفتگی ناشی از رسوبات و به حداکثر رساندن طول عمر این روسازی‌ها ضروری است. بر اساس این مقاله مروری، حوزه‌های نیازمند به تحقیقات آینده شناسایی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی، دینامیک رسوب‌گذاری و گرفتگی، مصالح زیرساختی با بازدهی زیست‌محیطی، تکنیک‌های نگهداری احیاکننده

## ۱-مقدمه

شهرنشینی و رشد فزاینده بارهای ترافیکی، روسازی‌های متداول با چالش‌های عدیده‌ای از جمله کاهش دوام، افزایش هزینه‌های نگهداری و آثار نامطلوب بر محیط پیرامون مواجه شده‌اند (Salimi & Ziaee, 2025; Baradaran et al., 2025a, 2025b). در چنین بستری، تلاش برای ارتقای عملکرد روسازی از دریچه مهندسی مصالح، به یکی از پویاترین

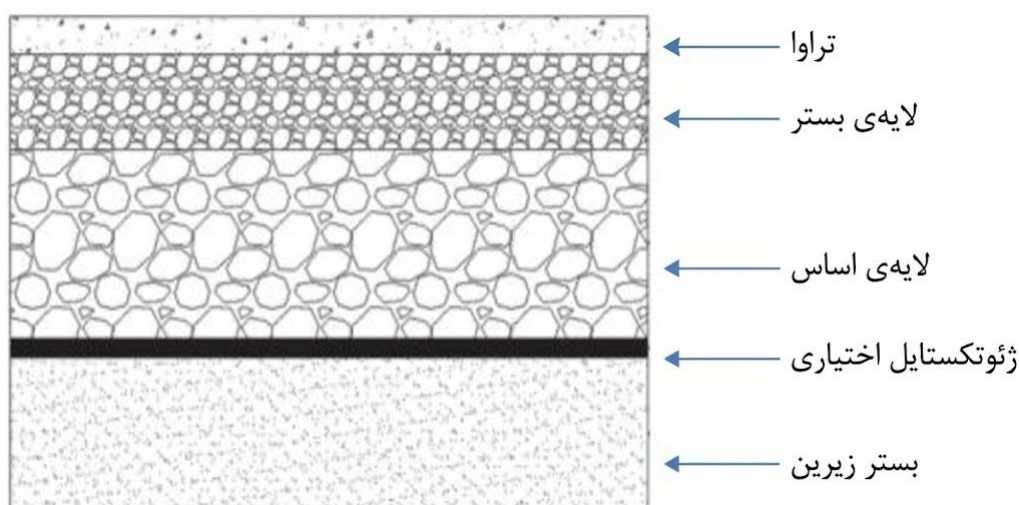
روسازی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین اجزای زیرساخت‌های حمل‌ونقل، نقشی کلیدی در توسعه پایدار جوامع ایفا می‌کند (Ayar et al., 2022; Baradaran & Ameri, 2023) و کیفیت آن به‌طور مستقیم با ایمنی تردد، هزینه‌های اقتصادی و ردپای زیست‌محیطی شبکه راه‌ها گره خورده است (Baradaran & Ziaee, 2025a, 2025b). با گسترش

نسل جدیدی از روسازی‌ها فراهم کرده‌اند که نه تنها در برابر بارهای مکانیکی پایدارترند، بلکه با پاسخ‌دهی هوشمندانه به شرایط محیطی، ردپای اکولوژیک زیرساخت‌های شهری را نیز به حداقل می‌رسانند (Baradaran et al., 2024b).

روسازی‌های بتنی نفوذپذیر به دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی مفیدشان به صورت فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، روسازی‌های بتنی نفوذپذیر یک سیستم روسازی نفوذپذیر هستند که به آب‌های سطحی اجازه می‌دهند به درون زمین نفوذ کنند و اثر جزیره گرمایی شهری را کاهش دهند (Ranieri et al. 2022; Yang et al. 2022; Singh et al. 2022; Barišić et al. 2022; Merten et al. 2022; Seifeddine et al. 2022; Nia, S. B. et al. 2023). مزایای زیست‌محیطی مختلفی به روسازی‌های بتنی نفوذپذیر نسبت داده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود رواناب و نفوذ آب باران، بهبود مقاومت در برابر لغزش سطح روسازی، بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی، کاهش پدیده هیدروپلنینگ (سر خوردن روی آب)، کاهش اثر جزیره گرمایی و کاهش صدای ترافیک اشاره کرد (Xie et al. 2019). کاربرد روسازی‌های بتنی نفوذپذیر در آسیا، به‌ویژه در کشورهای دارای اقلیم استوایی، به طور فزاینده‌ای در حال محبوب شدن است. اقلیم استوایی به میانگین دمای ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در طول سال و رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰ درصد همراه با میانگین بارندگی بالا اطلاق می‌شود (Ilham 2022). شکل ۱ نمودار شماتیک جانمایی روسازی‌های بتنی نفوذپذیر را نشان می‌دهد.

عرصه‌های پژوهشی بدل شده است. مهندسان و پژوهشگران به‌طور مداوم در پی آن هستند که با دستکاری هدفمند در ساختار مواد تشکیل‌دهنده، نه تنها طول عمر سازه‌ای روسازی را افزایش دهند، بلکه کارکردهای نوینی نظیر خودترمیمی، نفوذپذیری و جذب آلاینده‌ها را نیز به آن بیفزایند.

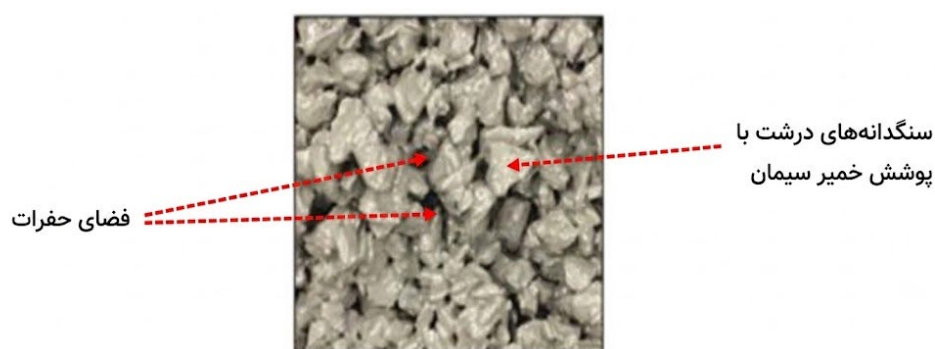
در این راستا، بهره‌گیری از افزودنی‌های گوناگون اعم از پوزولان‌های طبیعی، مواد پلیمری، الیاف مهندسی و نانومواد (Baradaran & Ameri, 2026; Baradaran & Ziaee & Aliha, 2026)، پنجره‌های تازه‌ای را به سوی بهبود خواص مکانیکی، دوام و پایداری روسازی‌ها گشوده است (Baradaran & Ameri, 2025; Baradaran & Aliha, 2025). برای نمونه، جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌های طبیعی نظیر خاکستر بادی یا متاکائولن می‌تواند ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریزساختار ماتریس سیمانی را متراکم‌تر کرده و نفوذپذیری در برابر یون‌های مخرب را به شدت کاهش دهد (Baradaran et al., 2023). در جبهه‌ای دیگر، استفاده از الیاف فولادی، پلی‌پروپیلنی یا بازالتی، شکل‌پذیری و مقاومت خمشی بتن روسازی را ارتقا بخشیده و از گسترش ترک‌های اولیه جلوگیری می‌کند. همچنین ظهور نانومواد نظیر نانوسیلیس و نانورس، امکان مهندسی ریزساختار را تا مقیاس نانو فراهم ساخته و بهبود چشمگیری در خواصی مانند مقاومت فشاری، سایش و نفوذپذیری به ارمغان آورده است (Baradaran et al., 2024a; Kamboozia et al., 2025). این رویکردهای نوآورانه، زمینه را برای توسعه



شکل ۱. شماتیک روسازی بتنی نفوذ پذیر (El-Hassan et al. 2018)

پوشش یافته با خمیر سیمان معمولی و فضای خالی کافی را نشان می‌دهد. توانایی این روسازی‌ها در مدیریت رواناب آب باران نه تنها به ذخیره‌سازی زیرسطحی، بلکه به ظرفیت نفوذ در طول رویدادهای بارندگی نیز بستگی دارد. بنابراین، مزایای روسازی‌های بتنی نفوذپذیر آن‌ها را برای استفاده به عنوان سطح روسازی در مناطق شهری ایده‌آل می‌سازد با این حال، به دلیل تخلخل آن، مقاومت این ماده نسبتاً پایین است و استفاده از آن را در ترافیک با حجم بالا محدود می‌کند مقاومت فشاری این ماده تنها در حدود ۳۰-۲۰ مگاپاسکال است (dos Santos et al. 2022).

به دلیل ماهیت نفوذپذیر این روسازی، آب جمع شده روی جاده یا پیاده‌روها بلافاصله تخلیه می‌شود. علاوه بر این، روسازی‌های بتنی نفوذپذیر قادرند آلاینده‌های خاصی را از آب باران و رواناب‌ها فیلتر کنند تا به درون خاک نفوذ کنند. وجود اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) بالا، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) بالا، ذرات معلق و کلئیدی و رنگ‌ها در پساب صنایع برای آب‌های زیرزمینی مضر است (Chong and Kiew 2017). بنابراین، سطح آلاینده‌ها در پساب صنایع را می‌توان با کاربرد روسازی‌های بتنی نفوذپذیر کاهش داد. در همین حال، شکل ۲ بتن نفوذپذیر با سنگدانه‌های درشت



شکل ۲. بتن نفوذپذیر با سنگدانه درشت پوشش یافته با خمیر سیمان (AlShareedah and Nassiri 2021)

گرفتگی ناشی از ورود رسوبات به ساختار منافذ روسازی، منجر به کاهش مداوم نفوذپذیری روسازی نفوذپذیر تا زمان خرابی آن خواهد شد. جدول ۱ مقادیر حدود هنجاری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر را نشان می‌دهد. برخلاف سیستم‌های نفوذپذیر که به شدت در معرض انسداد منافذ هستند، روسازی‌های اجرا شده با بتن غلتکی (RCC) به دلیل هندسه متراکم و عدم وجود تخلخل‌های باز، در برابر پدیده گرفتگی مصنوعی کامل داشته و به عنوان یک گزینه پایدار با طول عمر عملیاتی بالا در زیرساخت‌های حمل‌ونقل مطرح می‌باشند (Salimi et al., 2026).

در این راستا، بررسی و توسعه فناوری‌های موازی نظیر بتن غلتکی (RCC) به عنوان یک روسازی صلب با مقاومت مکانیکی بالا بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که بهینه‌سازی طرح اختلاط و ارزیابی ویژگی‌های پایایی و دوام بتن غلتکی (RCC) اثبات می‌کند این مصالح به دلیل تراکم فوق‌العاده و ریزساختار منسجم خود، توانایی بی‌بدیلی در تحمل بارهای ترافیکی سنگین و چرخه‌های تنشی مداوم دارند (Salimi et al 2024). علاوه بر این، رسوبات و زباله‌های انباشته شده در سطح روسازی باعث ایجاد مشکل گرفتگی (انسداد منافذ) می‌شوند (Merten et al. 2022) این انباشتگی، نرخ نفوذ سطحی را کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به آب‌گرفتگی سطحی می‌شود. علاوه بر این،

جدول ۱. حدود مجاز بتن نفوذپذیر (dos Santos Lima et al. 2022)

| محدوده                      | آزمون                           |
|-----------------------------|---------------------------------|
| kg/m <sup>3</sup> ۲۰۰۰-۱۶۰۰ | چگالی                           |
| %۳۵-۱۵                      | کل فضای خالی                    |
| cm/s ۱,۲-۰,۱۴               | ضریب نفوذپذیری آب               |
| MPa ۲۸-۳,۵                  | مقاومت فشاری                    |
| -                           | مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن) |
| MPa ۳,۸-۱                   | مقاومت کششی خمشی                |

جستجوی اولیه گردآوری شد. متعاقباً، مقالات از نظر ارتباط آن‌ها با تم کلی این مقاله مروری که شامل رفتار مکانیکی، اثر گرفتگی و اقدامات نگهداری به کار رفته است، غربالگری شدند. بر اساس این بررسی گسترده، یافته‌های اخیر در مورد رفتار مکانیکی، اثر گرفتگی و نگهداری به کار رفته مورد تحقیق قرار گرفته و شکاف تحقیقاتی که هنوز نیاز به مطالعه دارد، شناسایی شد.

## ۲-۱- مقاومت فشاری

روسازی‌های بتنی نفوذپذیر (PCPs) حاوی مقدار کمی سنگدانه ریز (ماسه) هستند یا اصلاً سنگدانه ریز ندارند تا به آب اجازه ورود به ساختار خود را بدهند. در طول توسعه این فناوری، کیفیت روسازی‌های بتنی نفوذپذیر با بهبود مقاومت فشاری و کاهش صدای آن‌ها در حال افزایش است. روسازی‌های بتنی نفوذپذیر، بر خلاف روسازی بتنی معمولی، درصد بالایی از فضاهای خالی بین ۱۵ تا ۲۵ درصد دارند (Ramadhansyah et al. 2020). شکل ۲ موقعیت فضاهای خالی، سنگدانه‌های درشت و خمیر سیمان را در روسازی‌های بتنی نفوذپذیر نشان می‌دهد. فضای خالی در روسازی‌های بتنی نفوذپذیر تمایل دارد مقاومت و دوام بتن را کاهش دهد. با این حال، فضای خالی قابل قبول برای اجازه دادن به آب رواناب جهت نفوذ آزادانه به لایه‌های زیرین مورد نیاز است. این امر می‌تواند با کنترل سنگدانه‌های ریز و درشت و همچنین مواد چسباننده (ببندرها) از مخلوط‌های بتن محقق شود (Jeya Prakash et al. 2022).

علاوه بر این، تحلیل‌های ریزساختاری نشان می‌دهند که کنترل دقیق نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از افزودنی‌های پوزولانی در بتن غلتکی (RCC)، نقشی کلیدی در مهار پدیده عریان‌شدگی سنگدانه‌ها و بهبود چسبندگی در ناحیه انتقال بین‌سطحی (ITZ) ایفا می‌کند (Kamboozia et al. 2025, Salimi and Ziaee, 2025).

این مقاله مجموعه‌ای از یافته‌های برجسته مطالعاتی است که بر روی ویژگی‌های عملکرد مکانیکی و فیزیکی روسازی‌های بتنی نفوذپذیر مانند مقاومت فشاری، گرفتگی و نگهداری تمرکز دارند. بخش ۲ به بحث درباره بررسی مطالعات روسازی‌های بتنی نفوذپذیر می‌پردازد. متعاقباً، در بخش‌ها به تفصیل ویژگی‌های مکانیکی و دوام، مسائل گرفتگی و اقدامات نگهداری را توضیح می‌دهند. در نهایت، نتیجه‌گیری را شرح می‌دهد. اهداف این مطالعه، بررسی مقاومت فشاری، مکانیسم گرفتگی و نگهداری به کار رفته در روسازی‌های بتنی نفوذپذیر بود. دستاوردهای این مطالعه به جامعه پژوهشی کمک می‌کند تا به طور کارآمد در ادبیات موجود ناوبری کنند و به چالش‌ها و مسائل جدیدی که از پذیرش سریع فناوری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر ناشی می‌شوند، به سرعت پاسخ دهند.

## ۲-پیشینه تحقیق

پارامترهای جستجو ترکیبی از واژگان «روسازی بتنی متخلخل یا نفوذپذیر یا تراوا»، «گرفتگی» و «نگهداری» بودند. مجموعه گسترده‌ای از مقالات با استفاده از این واژگان کلیدی در

## ۱-۲-۱-مخلوط‌های اصلاح‌شده روسازی‌های بتنی نفوذپذیر

مطالعات مختلفی برای افزایش مقاومت بتن نفوذپذیر از طریق اصلاح مخلوط‌های بتن انجام شده است. ویژگی‌های مکانیکی روسازی‌های بتنی نفوذپذیر با جایگزینی وزنی محتوای سیمان با لاتکس لاستیک استایرن-بوتادین (SBRL) و افزودن سنگدانه‌های درشت بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه SBRL را با ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزن سیمان جایگزین کرد. سپس، ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی جایگزین سنگدانه‌های درشت طبیعی شدند. این مطالعه نشان داده است که افزودن SBRL تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن نفوذپذیر دارد. با این حال، شاخص‌های نفوذپذیری به مقدار کمی کاهش یافته‌اند. افزودن ۱۰٪ SBRL به بتن نفوذپذیر حاوی ۷۵٪ سنگدانه بازیافتی، مقاومت فشاری، کششی برزیلی و کششی خمشی ۲۸ روزه را به ترتیب ۷۰.۸٪، ۴۹.۴٪ و ۲۹.۷٪ افزایش داد. علاوه بر این، محتوای فضاهای خالی سخت‌شده، نفوذپذیری آب و پتانسیل تخریب نیز به ترتیب به میزان ۱۳.۳٪، ۱۱٪ و ۳۱.۷٪ کاهش یافتند (Shamseldin et al. 2021).

علاوه بر این، این مطالعه دیگری برای ارزیابی ترکیب جدیدی از افزودنی‌های فوق‌روان‌کننده (SP) و هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولز (HPMC) در مخلوط‌های بتن نفوذپذیر است. محتوای خمیر مختلف (۱۵.۲٪، ۱۸.۳٪ و ۲۲.۵٪) و جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی (NA) با سنگدانه بتنی بازیافتی (RCA) مورد بررسی قرار گرفت. از طرف دیگر، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی برزیلی) نیز ارزیابی شدند. اختلاط ۵۰٪ RCA برای محتوای خمیر ۱۵.۲٪ و ۱۸.۳٪ عملکرد مکانیکی را بدون به خطر انداختن نفوذپذیری افزایش داد. ویژگی‌های ساختار منافذ از طریق تکنیک تحلیل تصویر از نمونه‌های بتن نفوذپذیر برای به دست آوردن پارامترهای ساختار منافذ مانند مساحت، قطر و اندازه استخراج شد. ساختار منافذ بتن نفوذپذیر نشان داد که افزودن RCA باعث افزایش پیوستگی و اندازه منافذ می‌شود. به عنوان نتیجه‌ای از یافته‌ها، به نظر می‌رسد که استفاده از افزودنی‌های SP و HPMC ناحیه انتقال بین‌سطحی (ITZ) بتن نفوذپذیر حاوی RCA را بهبود بخشیده و ویژگی‌های هیدرولیکی-مکانیکی مشابهی با بتن دارای سنگدانه طبیعی ایجاد کرده است.

شکل ۳ فرآیند تحلیل تصویر نمونه‌های بتن نفوذپذیر را نشان می‌دهد. در نهایت، ترکیبات حاوی RCA دارای مقادیر نفوذپذیری و مقاومت کششی خمشی بالاتر از مقادیر توصیه‌شده

در استانداردها بودند که امکان استفاده از آن‌ها را در مناطق ترافیک پیاده‌رو فراهم می‌سازد (dos Santos Lima et al. 2022).

در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر مقادیر سنگدانه ریز و سنگدانه درشت بر ویژگی‌های بتن نفوذپذیر و همچنین مشخصات عملکردی بتن نفوذپذیر از نظر نفوذپذیری، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی برزیلی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد مورد استفاده عبارت بودند از سیمان پرتلند معمولی (OPC) نوع ۱ درجه ۴۳، سنگدانه ریز منطبق بر دانه‌بندی زون (II) و مخلوط سنگدانه درشت ۴.۷۵-۱۰ میلی‌متر، ۱۰-۱۲.۵ میلی‌متر، ۱۶-۱۲.۵ میلی‌متر، ۲۰-۱۶ میلی‌متر که به ترتیب ۱۵، ۴۰، ۳۰ و ۱۵ درصد از کل وزن سنگدانه درشت را تشکیل می‌دادند. مخلوط‌ها با نسبت آب به سیمان ۰.۳۴ و حفظ نسبت سنگدانه به سیمان به صورت ۳.۵:۱ آماده شدند. این مطالعه نشان داد که افزایش سنگدانه‌های ریز باعث افزایش ویژگی‌های مکانیکی مختلف مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی برزیلی و ضریب نفوذپذیری می‌شود (Pradhan et al. 2022).

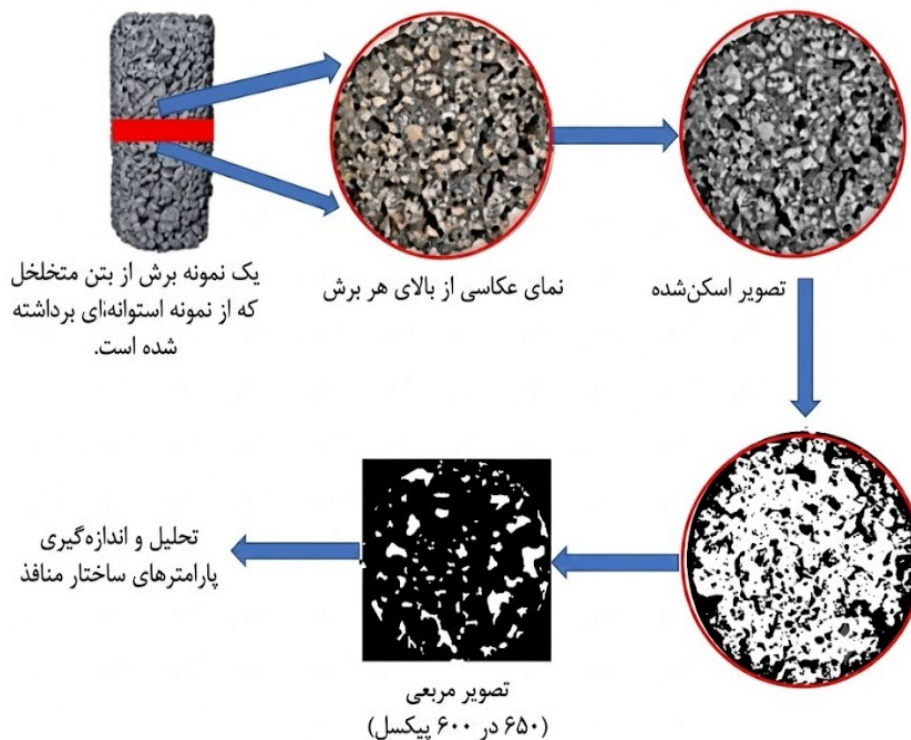
یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی استفاده از بتن نفوذپذیر در جاده‌های با حجم ترافیک بالا انجام شده است. مخلوط بهینه بتن نفوذپذیر بر اساس مشخصات فنی روسازی‌های راه بتنی اداره کل بزرگراه‌های ترکیه توسعه یافت. در نتیجه، پژوهشگر دریافت بتن نفوذپذیر تولید شده با نسبت مناسب سنگدانه/ماده چسباننده (A/B) و اندازه سنگدانه، مقاومت مورد نیاز برای راه‌های بتنی را برآورده می‌کند و می‌تواند به عنوان مصالح روسازی راه بتنی استفاده شود. نتایج همچنین نشان داد که نسبت (A/B) و اندازه سنگدانه به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های مقاومت مخلوط‌های بتن نفوذپذیر تأثیر می‌گذارند (Akkaya and Çağatay 2021).

علاوه بر این، امکان‌سنجی استفاده از خاکستر بادی کف زیاله‌سوزها (IBA) در مخلوط بتن نفوذپذیر به عنوان لایه اساس اساس راه مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که IBA در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی دارای ویژگی‌های مکانیکی خوبی است. با این حال، افزایش IBA منجر به کاهش مقاومت تراکمی خواهد شد. کشف شد مخلوط‌هایی با جایگزینی کمتر از ۶۰٪ IBA می‌توانند نتایج قابل قبولی ایجاد کنند که مشخصات فنی را برآورده می‌سازد (Liu et al. 2023).

در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد مکانیکی روسازی‌های بتنی نفوذپذیر با عملکرد بالا با رزین پلی‌استر غیراشباع (UP) به عنوان ماده چسباننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که

مقاومت فشاری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر به شدت به محتوا و ویژگی‌های سنگدانه‌ها و ماده چسباننده یا محتوای سیمان وابسته است.

روسازی‌های بتنی نفوذپذیر با ۳۰٪ رزین UP با اختلاط ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ اتیلن-وینیل استات (EVA) به عنوان یک ماده ترموپلاستیک، عملکرد بهینه‌ای داشتند (Lin and Yu 2022). به طور خلاصه، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است،



شکل ۳. فرآیند تحلیل تصویر (dos Santos Lima et al. 2022)

جدول ۲. مقاومت فشاری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر بر اساس سنگدانه‌ها و محتوای سیمان مختلف

| مراجع                                   | مقاومت فشاری (MPa) | سیمان ( $\text{kg/m}^3$ ) | سنگدانه‌ها ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-----------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|
| (Ibrahim et al. 2014)                   | ۳,۴۵               | ۲۵۰                       | ۱۸۰۰                           |
| (Ibrahim et al. 2014)                   | ۲,۸۰               | ۲۰۰                       | ۱۶۰۰                           |
| (Ibrahim et al. 2014)                   | ۱,۸۳               | ۱۵۰                       | ۱۸۰۰                           |
| Sumanasooriya and )<br>(Neithalath 2011 | ۱۹,۸۹              | ۵۵۴                       | ۱۲۶۳                           |
| Sumanasooriya and )<br>(Neithalath 2011 | ۱۴,۶۵              | ۴۹۶                       | ۱۲۷۹                           |
| Sumanasooriya and )<br>(Neithalath 2011 | ۹,۶۶               | ۴۱۱                       | ۱۲۸۶                           |
| (Lim et al. 2013)                       | ۱۳,۹               | ۳۶۷                       | ۱۵۶۰                           |

| سنگدانه ها ( $\text{kg/m}^3$ ) | سیمان ( $\text{kg/m}^3$ ) | مقاومت فشاری (MPa) | مراجع                          |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------------|
| ۱۵۶۰                           | ۲۴۲                       | ۸,۶                | (Lim et al. 2013)              |
| ۱۱۱۵                           | ۴۵۰                       | ۱۸,۰۳              | Ramadhansyah et al. )<br>(2014 |
| ۱۴۵۰                           | ۴۴۰                       | ۱۴,۳۷              | Ramadhansyah et al. )<br>(2014 |
| ۱۴۳۰                           | ۴۰۰                       | ۱۱,۸۲              | Ramadhansyah et al. )<br>(2014 |

## ۲-۲-ویژگی های منافذ و رفتار گرفتگی

عملکرد هیدرولیکی برای روسازی های بتنی نفوذپذیر حیاتی است. شایان ذکر است که عملکرد هیدرولیکی می تواند با نفوذپذیری یا نرخ نفوذ سنجیده شود. نفوذپذیری روسازی های بتنی نفوذپذیر به شدت به ویژگی های منافذ و اثر گرفتگی در طول دوره بهره برداری آن وابسته است. این بخش به تفصیل اثر رفتار گرفتگی بر نفوذپذیری و نرخ نفوذ روسازی بتنی نفوذپذیر را تشریح خواهد کرد.

## ۲-۲-۱-نرخ نفوذپذیری

وجود منافذ بر نرخ نفوذپذیری روسازی های بتنی نفوذپذیر تأثیرگذار بوده است. محتوای سنگدانه های ریز و درشت بر ساختار منافذ و نرخ نفوذپذیری در روسازی های بتنی نفوذپذیر تأثیر گذاشته است. نرخ نفوذپذیری روسازی های بتنی نفوذپذیر بدون سنگدانه های ریز در مقایسه با بتن دارای سنگدانه ریز بسیار بالاتر است. نرخ جریان نرمال بتن نفوذپذیر با و بدون سنگدانه ریز به ترتیب  $7,67 - 9$  میلی لیتر بر ثانیه و  $14,83 - 15,83$  میلی لیتر بر ثانیه است Abdulrehman Aravind and (2022). در مطالعه ای متفاوت، تأثیر گونه شناسی رسوب و نگهداری مصالح را بر نفوذپذیری بتن نفوذپذیر بررسی کردند. بتن نفوذپذیر با درصد های متفاوتی از سنگدانه ریز برای برنامه آزمایشگاهی طراحی شد و نمونه های تولید شده پس از چرخه های رسوب گذاری و تمیزکاری با مکش، تحت آزمایش های نفوذپذیری قرار گرفتند. یافته ها نشان داد که ذرات بزرگتر (ماسه) با آب بندی کردن لایه بالایی نمونه ها باعث از دست رفتن نفوذپذیری شدند، در حالی که رسوبات ریز (رس)

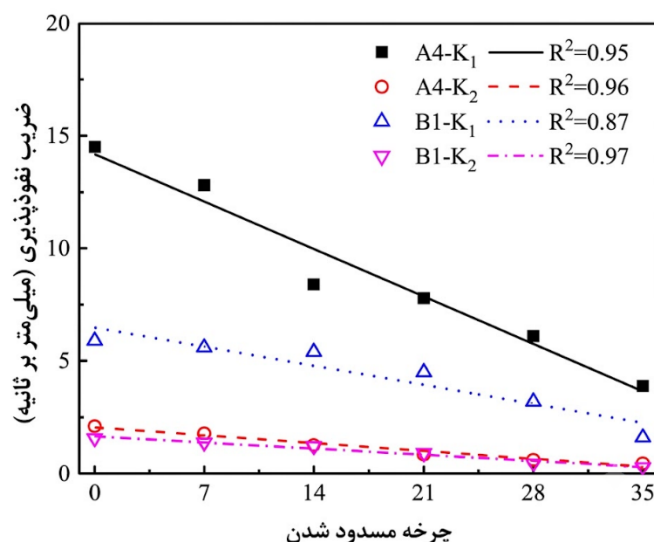
لایه های پایینی را مسدود کردند. این یافته ها نشان می دهند که گرفتگی علیرغم تأثیرگذاری بر عملکرد هیدرولیکی بتن نفوذپذیر، از طریق نگهداری و تمیزکاری دوره ای روسازی قابل بازیابی است.

## ۲-۲-۲-گرفتگی (انسداد منافذ)

تحقیقات پیشین به بررسی روسازی های بتنی نفوذپذیر مقاوم در برابر گرفتگی پرداخته اند. در این مطالعه، ترکیبی از نتایج آزمایش های نفوذپذیری، نفوذ و گرفتگی برای ارائه اطلاعات پیش زمینه جهت مشخصات فنی و طراحی روسازی های بتنی نفوذپذیر مقاوم در برابر گرفتگی مورد تحلیل قرار گرفت (Kevern 2015). بیشتر پژوهشگران اخیراً علاقه فزاینده ای به مقاومت در برابر گرفتگی روسازی های بتنی نفوذپذیر از طریق ابتکارات مختلف نشان داده اند. یکی از این ابتکارات، بررسی تأثیر نسبت های پرشدگی و آب به سیمان (W/C) بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن نفوذپذیر است. روشی نوین با استفاده از خاک دوغابی اشباع شده به عنوان محیط گرفتگی برای ارزیابی مقاومت در برابر گرفتگی بتن نفوذپذیر پیشنهاد شده است. علاوه بر این، پدیده گرفتگی با پردازش تصویر مورد تحلیل قرار گرفت که نشان داد نسبت پرشدگی یک پارامتر مهم در طراحی مخلوط بتن نفوذپذیر است و صرفاً کاهش نسبت W/C همیشه در آماده سازی بتن نفوذپذیر با عملکرد بالا مؤثر نیست. بر اساس تحلیل پردازش تصویر، منافذ بزرگ برای نفوذپذیری مفید هستند. با این حال، منافذ بیش از حد بزرگ به دلیل افزایش پیچ و خم منافذ، نفوذپذیری را کاهش می دهند (Cai et al. 2022). علاوه بر این، ضخامت روسازی و مصالح به کار رفته

درشت‌ترین رسوبات ابتدا اعمال شدند (Hill and Beecham 2018). شکل ۴ رابطه بین نرخ نفوذپذیری و چرخه‌های گرفتگی را نشان می‌دهد. در همین حال، شکل ۵ تفاوت بین تصاویر بتن نفوذپذیر نرمال و بتن نفوذپذیر مسدودشده را نشان می‌دهد.

در سنگدانه‌های بندکشی و بستر، مسئول بیشتر انباشت رسوبات بودند. جدا از آن، بیشتر رسوبات در لایه‌های بستر و سطحی حفظ شدند و افزودن یک لایه اساس تأثیر کمی بر حفظ رسوبات داشت. نرخ کلی حفظ رسوبات زمانی افزایش یافت که رسوبات تک‌اندازه با ترتیب اندازه کاهشی اضافه شدند، به طوری که



شکل ۴. رابطه بین نفوذپذیری و چرخه گرفتگی (Cai et al. 2022)



شکل ۵. مقایسه روسازی بتنی نفوذپذیر نرمال و روسازی بتنی نفوذپذیر مسدودشده (Cai et al. 2022; Kayhanian et al. 2012)

#### ۴- نگهداری به کار رفته برای گرفتگی

گرفتگی که طول عمر روسازی‌های بتنی نفوذپذیر را کاهش می‌دهد، تمرکز دارد. یک ارزیابی عملکرد میدانی از نگهداری دوره‌ای برای روسازی‌های بتنی نفوذپذیر جهت بررسی نفوذپذیری یک روسازی بتنی نفوذپذیر تازه احداث شده انجام شد. در این

چالش‌های اصلی برای کاربرد گسترده‌تر روسازی‌های بتنی نفوذپذیر، مقاومت پایین آن، احتمال بالای گرفتگی و نگهداری دشوار آن است (Li et al. 2017). مطالعات مختلفی برای یافتن بهترین روش نگهداری روسازی‌های بتنی نفوذپذیر انجام شده است. شایان ذکر است که نگهداری بر جلوگیری از اثر

مطالعه، از هشت روش نگهداری برای آزمایش ۳۲ نمونه از روسازی‌های بتنی نفوذپذیر استفاده شد. روش‌های نگهداری مختلف، مانند شستشو با فشار (واترجت)، جارو زدن و مکش (جاروبرقی)، و شستشو با فشار به همراه مکش، برای یافتن بهترین ترکیب طراحی شده‌اند. در نتیجه، هنگامی که فشار شستشو بین ۵ تا ۲۰ مگاپاسکال باشد، اثر نگهداری مشابه است و ترکیب شستشوی تحت فشار و مکش خلاء بهترین اثر نگهداری را دارد. لیستی از روش‌های نگهداری منتشر شده برای جلوگیری از اثر گرفتگی روسازی بتنی نفوذپذیر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. خلاصه مطالعات بررسی‌شده در زمینه روش‌های نگهداری

| ردیف | روش نگهداری                              | نتایج                                                                                                                                                                                                                                              | مراجع                    |
|------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| ۱    | شستشوی معکوس                             | روش نوین پیشنهادی برای شستشوی معکوس عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مرسوم داشت، اما نرخ بازیابی آن تحت تأثیر شرایط گرفتگی و سرعت جریان در منافذ لایه روسازی بتنی نفوذپذیر قرار گرفت.                                                                  | Zhao et )<br>(al. 2020   |
| ۲    | برس برقی دستی و شوینده تحت فشار (واترجت) | ترکیب درمان سطحی با شوینده تحت فشار و جاروب‌کننده مکنده شهری، شدت استفاده از پارکینگ را به طور مؤثری بهبود بخشید و عامل مهمی در بازیابی ظرفیت نفوذ آب شناخته شد.                                                                                   | Sehgal et )<br>(al. 2018 |
| ۳    | دمنده                                    | استفاده از یک دمنده برای تمیزکاری دوره‌ای کارآمد بود. نگهداری ماهانه مناسب‌ترین گزینه است زیرا تمیزکاری به زمان و سوخت کمتری نیاز دارد.                                                                                                            | Silva et )<br>(al. 2022  |
| ۴    | جاروب‌کننده هوایی شهری                   | نگهداری زود هنگام و مکرر می‌تواند عمر عملکردی روسازی نفوذپذیر را افزایش دهد، چرا که اندازه‌گیری‌های نفوذ حتی پس از مسدود شدن با ۲۵٪ زیاده شهری بیشتر، با سلول ترمیم‌شده قابل مقایسه بود.                                                           | Scott et )<br>(al. 2022  |
| ۵    | شیارهای زهکشی                            | سیستم‌های روسازی بتنی نفوذپذیر که شیارهای زهکشی در پایه آن‌ها قالب‌گیری شده است، نسبت به سنگفرش‌های اصلاح‌نشده، زمان بسیار بیشتری برای مسدود شدن نیاز دارند.                                                                                       | Lucke )<br>(2014         |
| ۶    | فرآیند فلاش معکوس (شستشوی جریان معکوس)   | مشخص شد که فرآیند فلاش معکوس بر روی مصالح گرفتگی آزمایش‌شده مؤثر بوده، مستقل از تخلخل روسازی عمل کرده و در کمترین فشار آزمایش‌شده نیز کارایی داشته است.                                                                                            | Shirke et )<br>(al. 2022 |
| ۷    | دمنده برقی، شستشو با فشار و مکش خلاء     | شستشو با فشار و مکش خلاء هر دو به عنوان تکنیک‌های تمیزکاری اولیه به یک اندازه مؤثر هستند و نرخ نفوذ سطحی را بیش از ۹۰ درصد افزایش می‌دهند. ترکیب مکش خلاء و شستشو با فشار، مزایای قابل توجهی نسبت به استفاده تنهایی از هر کدام از این روش‌ها دارد. | Hein et )<br>(al. 2022   |

## ۵- نتیجه گیری

این پژوهش مروری به تحلیل و هم‌افزایی یافته‌های برجسته محققان پیرامون سه محور کلیدی در روسازی‌های بتنی نفوذپذیر یعنی مقاومت فشاری، مکانیسم گرفتگی و متدولوژی‌های نگهداری پرداخته است. ارزیابی‌های جامع نشان می‌دهد که اگرچه این سیستم‌های روسازی از منظر پایداری زیست‌محیطی و توسعه شهری پتانسیل‌های بی‌بدیلی ارائه می‌دهند، اما وجود ساختار متخلخل ذاتاً چالش‌هایی را در زمینه کاهش مقاومت مکانیکی و دوام سازه‌ای ایجاد می‌کند. در طرح‌های اختلاط متداول، مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها معمولاً در محدوده ۳ الی ۲۸ مگاپاسکال نوسان دارد. توسعه متدهای اصلاحی نوین شامل جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی (NA) با مصالح بازیافتی، بهینه‌سازی نسبت‌های سنگدانه‌های ریز و درشت، جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌هایی مانند خاکستر بادی و همچنین ادغام ضایعات صنعتی در ماتریس بتن، گام‌های مؤثری در جهت بهینه‌سازی توازن میان تخلخل و مقاومت فشاری بوده و دستیابی به یک محدوده مقاومت مکانیکی قابل قبول را ممکن ساخته است.

پدیده گرفتگی همچنان به عنوان اصلی‌ترین چالش هیدرولیکی در مسیر کاربرد گسترده روسازی‌های بتنی نفوذپذیر خودنمایی می‌کند. یافته‌های ساختار منافذ نشان می‌دهند که اگرچه منافذ بزرگتر برای تسهیل نرخ نفوذپذیری اولیه مطلوب هستند، اما افزایش مفرط ابعاد منافذ به دلیل تشدید ضریب پیچ‌وخم منافذ، بازدهی نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، حجم تخلخل‌های بسیار بزرگ (که ناشی از به‌کارگیری سنگدانه‌های درشت‌دانه است) به دلیل تسهیل نرخ انباشت رسوبات و ذرات معلق، سرعت فرآیند گرفتگی را به شدت تسریع می‌کند؛ بنابراین، درک رفتار متقابل نرخ نفوذپذیری و چرخه‌های

گرفتگی، پیش‌شرطی حیاتی برای توسعه روسازی‌هایی با راندمان هیدرولیکی پایدار است. در حوزه مدیریت روسازی، اجرای پروتکل‌های تمیزکاری دوره‌ای و پیشگیرانه بلافاصله پس از بهره‌برداری، برای به حداقل رساندن طول عمر مفید سیستم ضروری است. در این میان، عملیات احیای هیدرولیکی از طریق سیستم‌های شستشوی تحت فشار (واترجت) بهبود چشمگیری را در بازگرداندن ظرفیت نفوذپذیری پس از رفع انسداد منافذ نشان داده است. به طور کلی، برآیند یافته‌های این مطالعه مروری مشخص می‌کند که جهت‌گیری تحقیقات آتی در این حوزه باید عمدتاً بر محورهای زیر متمرکز باشد:

- بهینه‌سازی چندهدفه طرح اختلاط: فرمولاسیون و توسعه مخلوط‌های بتنی نفوذپذیر با مقاومت مکانیکی بالا به نحوی که توزیع اندازه منافذ و مقاومت فشاری به یک نقطه بهینه‌سازی چندهدفه دست یابند.

- پایش بلندمدت عملکرد میدانی: انتقال از فاز ارزیابی‌های کوتاه‌مدت آزمایشگاهی به سمت برنامه‌های پایش میدانی بلندمدت جهت بررسی دوام روسازی تحت چرخه‌های ترافیکی و اقلیمی واقعی.

- متدولوژی‌های نگهداری هوشمند: ابداع سیستم‌های نگهداری پیشگیرانه، کارآمد و مقرون‌به‌صرفه با هدف کنترل پایدار پدیده گرفتگی و تضمین عملکرد هیدرولیکی بلندمدت روسازی.

در یک جمع‌بندی کلی، مهار اثرات گرفتگی و ارتقای عملکرد مکانیکی، دو رکن اساسی برای تمديد سیکل عمر عملیاتی روسازی‌های بتنی نفوذپذیر هستند که پرداختن به آن‌ها، مسیر تبدیل این فناوری را به یک راهکار روسازی پایدار و مطمئن در زیرساخت‌های نوین شهری هموار می‌سازد.

## ۶- مراجع

- Building Materials 279 (2021): 122430. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122430  
-Alessio Fini, Piero Frangi, Sebastien Comin, Irene Vigevari, Andrea Alberto Rettori, Cecilia Brunetti, Bárbara Baesso Moura, and Francesco Ferrini. (2022). Effects of pavements on established urban trees: Growth, physiology, ecosystem services and disservices. *Landscape and Urban Planning* 226 104501. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104501

- Ahmed Ibrahim, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, and Varun Chowdary Patibandla. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials* 50, 524-529. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022  
-Ahmet Akkaya, and İsmail Hakkı Çağatay. (2021). Experimental investigation of the use of pervious concrete on high volume roads. *Construction and*

Rubber Latex. *Magazine of Civil Engineering* 8 (108).10805.

-Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. (2024). Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and Building Materials*, 449, 138426.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426**

-Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. (2024). Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02740.

**doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740**

-Baradaran, S., Ziaee, S. A., Ameri, M., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and II fracture behavior of green warm mix asphalt containing recycled plastic at various temperatures using ENDB testing method. *Case Studies in Construction Materials*, e05549.

**doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05549**

-Chen-Han Lin, and Jason Yu. (2022). Research on improving polymer pervious concrete mechanical strength by adding EVA to UP resin binder material. *Construction and Building Materials* 359, 129416.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129416**

-Emiko Lim, Kiang Hwee Tan, and Tien Fang Fwa. (2013). High-strength high-porosity pervious concrete pavement. In *Advanced Materials Research*, Vol. 723, 361-367. *Trans Tech Publications Ltd*.

**doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.361**

-Felipe Raul Meert Merten, Vanessa Fátima Pasa Dutra, Helena Lunkes Strieder, and Ângela Gaio Graeff (2022). Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 342, 127939.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127939**

-Geannina Terezinha dos Santos Lima, Janaíde Cavalcante Rocha, and Malik Cheriaf. (2022). Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture. *Construction and Building Materials* 340, 127710.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127710**

-Hilal El-Hassan, and Peiman Kianmehr (2018). Pervious concrete pavement incorporating GGBS to alleviate pavement runoff and improve urban sustainability. *Road Materials and Pavement Design* 19, No. 1. 167-181.

**doi.org/10.1080/14680629.2016.1251957**

-Ivanka Netinger Grubeša, Hrvoje Krstić, and Dalibor Kubica (2022). Field and Laboratory Assessment of Different Concrete Paving Materials Thermal Behavior. *Sustainability* 14, No. 11: 6638.

**doi.org/10.3390/su14116638**

-Jinhui Zhao, Zhen Wang, Yanxia Wang, and Haoran Jiang (2020). Novel Backwashing maintenance method for Permeable concrete pavement: Two-Year field study. *Journal of*

-Avishreshth Singh, Krishna Prapoorna Biligiri, and Prasanna Venkatesh Sampath (2022). Engineering properties and lifecycle impacts of pervious all-road all-weather multilayered pavement. *Resources, Conservation and Recycling* 180, 106186.

**doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106186**

-Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. (2022). A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(110), 57-86.

-Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express*, 10(5), 055202.

**doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af**

-Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering*, 25, 103734.

-Baradaran, S., & Ameri, M. (2023). Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(114), 53-70.

-Baradaran, S., & Ameri, M. (2025). Durable and sustainable warm mix asphalt pavement using value-added recycled PET. *Case Studies in Construction Materials*, e05362.

**doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05362**

-Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test. *Alexandria Engineering Journal*, 133, 349-369.

**doi.org/10.1016/j.aej.2025.11.029**

-Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Review of the Mechanical Properties of Asphalt Pavement Reinforced with Natural Plant Fibers as an Eco-Friendly Solution in Pavement Engineering. *Road*.

-Baradaran, S., Ziaee, S. A., & Aliha, M. R. M. (2026). Enhancing mechanical performance of rubberized asphalt pavement by using recycled plastic waste. *Construction and Building Materials*, 539, 147464.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147464**

-Baradaran, S., & Ameri, M. (2026). Rejuvenators and the Future of Sustainable Pavements: From the Rejuvenation of Aged Asphalt Binder to the Enhanced Performance of Recycled Asphalt Mixtures. *Road*, 34(127), 527-548.

-Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Ameri, M., Erarslan, N., & Sadowski, T. (2025). Evaluation of crack resistance in asphalt mixtures modified with recycled PET granules at low and intermediate temperatures. In *4th International Civil Engineering & Architecture Conference*, Vol. 1.

-Abdo Shamseldin, Galishnikova Vera, and A. M. Fawzy (2021). Properties of recycled aggregate pervious concrete modified with Styrene Butadiene

*Construction Education and Research* 9, No. 2, 102-116.

**doi.org/10.1080/15578771.2011.649886**

-Milani S. Sumanasooriya, and Narayanan Neithalath (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites* 33, No. 8, 778-787.

**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002**

-Mísley Da Cruz Teixeira, Brenda Maiara Oliveira Alves, and Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro. (2022). Study of clogging on pervious concrete applied on light traffic and pedestrian pavement. *Urban Water Journal* 19, No. 4: 388-394.

**doi.org/10.1080/1573062X.2021.2020299**

-Nathew Aravind, and Taha Irfan Abdulrehman (2022). A review and sequel experimental analysis on physical and mechanical properties of permeable concrete for pavement construction. *International Journal of Pavement Engineering* 23, No. 12: 4160-4173.

**doi.org/10.1080/10298436.2021.1936519**

-Nia, S. B., Salimi, A., & Chari, M. N. (2023). Enhancing energy efficiency in lightweight concrete walls: validating the effectiveness of glycerin wax as a phase change material through finite volume method (FVM).

-Nian Hu, Jiong Zhang, Shuang Xia, Ruonan Han, Zhaoxia Dai, Rui She, Xinzhuang Cui, and Bowen Meng (2020). A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. *Journal of Cleaner Production* 263 121463.

**doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121463**

-Nilesh Arjun Shirke, and Scott Shuler (2009). Cleaning porous pavements using a reverse flush process. *Journal of Transportation Engineering* 135, No. 11 (2009): 832-838.

**doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:11(832).**

-Ning Xie, Michelle Akin, and Xianming Shi. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production* 210: 1605-1621.

**doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134**

-Othman AlShareedah, and Somayeh Nassiri. (2021). Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production* 288: 125095.

**doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095**

-Pei Liu, Deng-Fong Lin, and Wei-Jhu Wang. (2023). Suitability of Using Pervious Concrete Containing Incinerator Bottom Ashes as a Roadway Base Course. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 37, No. 1 (2023): 04022064.

**doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001782**

-Putra Jaya Ramadhansyah, K. A. Masri, S. A. Mangi, MI Mohd Yusak, M. R. Hainin, MN Mohd Warid, N. Mashros, H. Yaacob, and WI Mohd Haziman (2020). Strength Properties of Porous

*Irrigation and Drainage Engineering* 146, No. 4, 04020003.

**doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001456**

-Jiusu Li, Yi Zhang, Guanlan Liu, and Xinghai Peng. (2017). Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials* 138, 479-485.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.137**

-Jiwei Cai, Jin-ge Chen, Junli Shi, Qing Tian, Gelong Xu, and Yun Du. (2022). A novel approach to evaluate the clogging resistance of pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials* 16. e00864.

**doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00864**

-John T. Kevern (2015). Evaluating permeability and infiltration requirements for pervious concrete. *Journal of Testing and Evaluation* 43, No. 3. 544-553.

**doi.org/10.1520/JTE20130180**

-Joubin Scott, T. Sarabian, R. Bowers, and J. Drake (2022). Assessing the Benefits of Early and Repeated Maintenance with Regenerative Air Street Sweepers on Permeable Interlocking Concrete Pavements. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 8, No. 3, 06022002.

**doi.org/10.1061/JSWBAY.0000981**

-Kamboozia, N., Salimi, A., & Dolati, H. (2025). Evaluation of Widely Used Concrete Self-Healing Methods for Use in Road Infrastructure-A Review. *Road*, 33(122), 21-44.

-Kelly Diane Hill, and Simon Beecham (2018). The effect of particle size on sediment accumulation in permeable pavements. *Water* 10, No. 4. 403.

**doi.org/10.3390/w10040403**

-Khaled Seifeddine, Sofiane Amziane, and Evelyne Toussaint (2022). Thermal behavior of pervious concrete in dry conditions. *Construction and Building Materials* 345. 128300.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128300**

-Kian Hen Chong, and Peck Loo Kiew (2017). Potential of banana peels as bio-flocculant for water clarification. *Progress in Energy and Environment* 1, 47-56.

-Kirti Sehgal, Jennifer Drake, Tim Van Seters, and William Kyle Vander Linden (2018). Improving restorative maintenance practices for mature permeable interlocking concrete pavements. *Water* 10, No. 11.1588.

**doi.org/10.3390/w10111588**

-Masoud Kayhanian, Anderson Dane, John T. Harvey, David Jones, and Balasingam Muhunthan. (2012). Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *Journal of Environmental Management* 95, No. 1. 114-123.

**doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021**

-Michael F. Hein, Mark Dougherty, and Turner Hobbs (2013). Cleaning methods for pervious concrete pavements. *International Journal of*

fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03369.

**doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03369.**

-Salimi, A., Sengun, E., Rahman, M. L., King, D., Ceylan, H., Kim, S., & Taylor, P. C. (2026). Mineral-blended polymeric microspheres as an alternative to air-entraining agents in roller compacted concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 531, 146618.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.146618**

-Sujit Kumar Pradhan, Niranjana Behera, and Anil Palai (2021). Performance Study of Pervious Concrete as a Road Pavement Infrastructure System. *In Road and Airfield Pavement Technology: Proceedings of 12th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology*, Cham: Springer International Publishing, 517-528.

**doi.org/10.1007/978-3-030-87379-0\_39**

-Terry Lucke (2014). Using drainage slots in permeable paving blocks to delay the effects of clogging: Proof of concept study. *Water* 6, No. 9. 2660-2670.

**doi.org/10.3390/w6092660**

-Vittorio Ranieri, Stefano Coropulis, Nicola Berloco, Veronica Fedele, Paolo Intini, Claudio Laricchia, and Pasquale Colonna (2022). The effect of different road pavement typologies on urban heat island: A case study. *Sustainable and Resilient Infrastructure* 7, No. 6. 803-822.

**doi.org/10.1080/23789689.2022.2067951**

-Zul Ilham (2022). Multi-criteria decision analysis for evaluation of potential renewable energy resources in Malaysia. *Progress in Energy and Environment* 21, 8-18.

**doi.org/10.37934/progee.21.1.818**

Concrete Pavement Blended with Nano Black Rice Husk Ash. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 712, No. 1, 012038. IOP Publishing, 2020.

**doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012038**

-Putra Jaya Ramadhansyah, Mohd Yusak Mohd Ibrahim, Mohd Rosli Hainin, and Mohd Haziman Wan Ibrahim (2014). A review of porous concrete pavement: applications and engineering properties. *Applied Mechanics and Materials* 554: 37-41.

**doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.554.37**

-Qiuxia Yang, Fan Dai, and Simon Beecham (2022). The influence of evaporation from porous concrete on air temperature and humidity. *Journal of Environmental Management* 306: 114472.

**doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114472**

-Rangisetty Jeya Prakash, B. Soundara, and Christian Johnson (2022). No Fine Concrete Pavement-A Sustainable Solution for Flood Disaster Mitigation. A System Engineering Approach to Disaster Resilience: *Select Proceedings of VCDRR 2021*: 259-273.

**doi.org/10.1007/978-981-16-7397-9\_19**

-Rodrigo Garozi da Silva, Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, Marcelo Bortoletto, Felipe de Almeida Spósito, Aparecido Carlos Gonçalves, and Marco Antonio de Moraes Alcântara (2022). The effect of periodic maintenance on pervious concrete pavements. *Matéria (Rio de Janeiro)* 26.

**doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1378**

-Salimi, A., & Ziaee, S. A. (2025). A review of the use of permeable concrete as road pavement: evaluation of physical, mechanical properties, durability and environmental benefits. *Road*, 33(124), 225-254.

-Salimi, A., Kamboozia, N., & Aliha, M. R. M. (2024). Experimental Investigation of the self-healing capability of Roller-Compacted Concrete (RCC) containing epoxy-filled glass tubes through

# **A Comprehensive Review on Pervious Concrete Pavements: Interplay between Mechanical Integrity, Clogging Mechanisms, and Restorative Maintenance Protocols**

*Milad Soleimani, B.Sc., Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.*

*Ali Afzalipour, Ph.D., Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.*

**E-mail: afzalipourali@chmail.ir**

Received: March 2026- Accepted: August 2026

## **ABSTRACT**

Pervious concrete pavements (PCPs) have emerged as a pivotal green infrastructure alternative for sustainable stormwater management and urban hydrology attenuation. Despite their profound environmental merits, their widespread commercialization is traditionally restricted by the intrinsic trade-off between hydraulic conductivity and mechanical durability, compounded by long-term progressive clogging. This review delivers a rigorous, state-of-the-art synthesis of current literature focusing on the multi-objective optimization of PCPs' compressive strength, pore architecture tortuosity, and sediment entrapment dynamics. The efficacy of diverse aggregate matrix modifications, sustainable binder replacements (e.g., supplementary cementitious materials and industrial by-products), and innovative active/passive maintenance methodologies are critically evaluated. Furthermore, the review contextualizes the hydraulic serviceability of PCPs within tropical environments, identifying critical gaps between laboratory-scale simulations and real-world field evaluations. The insights compiled herein provide a strategic framework for researchers and infrastructure engineers to systematically navigate existing literature, address structural-hydraulic performance trade-offs, and accelerate the field deployment of next-generation sustainable urban pavements.

**Keywords:** Concrete pavements, Sedimentation & Clogging Dynamics, Eco-efficient Infrastructure Materials, Restorative Maintenance Techniques