

# مروری بر کاربرد بتن نفوذپذیر به عنوان روسازی راه: ارزیابی خواص فیزیکی، مکانیکی، دوام و مزایای زیست محیطی

## مقاله علمی - مروری

امیر سلیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید علی ضیائی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sa-ziaee@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۲۵۴-۲۲۵

### چکیده

گسترش شهرنشینی و تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به زمین‌های مسکونی، در کنار افزایش سیلاب‌های شهری مشکلات متعددی را در حوزه مدیریت رواناب‌های سطحی روسازی‌های راه به وجود آورده است. استفاده از بتن‌های نفوذ پذیر به عنوان لایه رویه روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر می‌تواند راهکاری ایده‌آل جهت برطرف کردن این مشکل باشد. در دهه گذشته، استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در سیستم طراحی روسازی سازگار با محیط زیست با توجه به جنبه‌های مثبت زیست محیطی آن مانند کاهش سیلاب، بهبود کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی و کاهش آلودگی صوتی ناشی از ترافیک مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در این مطالعه سعی شده است تا علاوه بر معرفی مفاهیم بتن‌های نفوذ پذیر، تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با استفاده از بتن‌های نفوذ پذیر به عنوان لایه رویه روسازی‌های راه با هدف بهینه سازی عملکرد کلی روسازی نفوذ پذیر، حفظ خواص مکانیکی و دوام آن و جنبه‌های مختلف نگهداری این نوع روسازی را مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی هدف از این مقاله مروری، ارائه اطلاعاتی کاربردی در خصوص مزایای استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به عنوان جایگزین روسازی‌های بتنی متداول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن نفوذ پذیر، روسازی بتنی نفوذ پذیر، خواص مکانیکی، دوام

### ۱- مقدمه

پارامترهای اصلی در ارزیابی خواص مکانیکی بتن نفوذ پذیر استفاده شده است، اما تاکنون روش استاندارد جهت بررسی مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر ارائه نشده است و در این مطالعات از استاندارد ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی استفاده شده است (ASTM ۳۹C). بتن نفوذپذیر با ایجاد عمده فضاهای خالی در بتن به واسطه دانه بندی مصالح سنگی و با حذف یا به حداقل رساندن سنگدانه‌های ریز به دست می‌آید. موسسه بتن آمریکا، بتن نفوذپذیر را نوعی از بتن معرفی

بتن نفوذپذیر که با نام‌های بتن متخلخل یا تراوا نیز شناخته می‌شود، نوعی از بتن بوده که به واسطه حجم نسبتاً بالای منافذ به هم متصل (فضای خالی در حدود ۱۵ الی ۳۰ درصد) با اندازه بین ۲ الی ۸ میلی‌متر شناخته می‌شود (Deo & Neithalath, 2010). همچنین نفوذ پذیری آب در بتن متخلخل حدود ۲ الی ۶ میلی‌متر بر ثانیه و استحکام فشاری آن ۵/۵ الی ۲۰/۵ مگاپاسکال است (Tennis et al., 2004) در اینجا باید اشاره کرد که اگرچه در بسیاری از مطالعات مقاومت فشاری یکی از

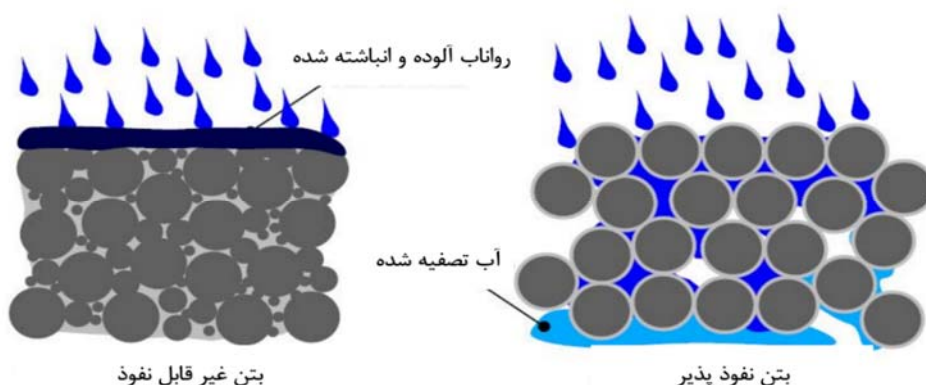
Wang & Sun & Song, ) راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (, 2017; Zhong & Leng & Poon, 2018).

در مقایسه با روسازی‌های بتنی معمولی یا روسازی‌های بتن غلطکی، مراحل ساخت و خواص روسازی‌های بتن نفوذ پذیر از نقطه نظر مصالح، نحوه ساخت، تجهیزات و مخصوصاً از جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی کاملاً متفاوت با سایر روسازی‌های بتنی است. به طور مثال، تولید سیمان فرآیندی انرژی بر بوده که منجر به انتشار مقدار قابل توجهی گاز کربن دی اکسید و گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در مقایسه با روسازی‌های بتنی معمولی، استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر منجر به صرفه جویی قابل توجهی در مصرف سیمان می‌شود که این امر ردپای اثر منفی تولید سیمان بر محیط اطراف را کاهش می‌دهد. نتایج ارزیابی چرخه عمر روسازی بتنی معمولی و روسازی بتنی نفوذ پذیر نشان می‌دهد که مجموع انتشار گاز کربن دی اکسید در تولید بتن‌های معمولی در حدود ۹۰۳ کیلوگرم در هر مترمکعب بوده در حالی که این مقدار برای تولید بتن نفوذ پذیر تنها ۱۹/۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بود یعنی تقریباً ۲ درصد گاز کربن دی اکسید منتشر شده در فرآیند تولید بتن معمولی (Anastasiou et al., 2017).

اگرچه روسازی‌های بتنی نفوذپذیر می‌توانند مزایای زیادی برای محیط اطراف خود داشته باشند، اما همواره مشکلاتی وجود دارند که اثربخشی طولانی این نوع روسازی‌ها را به خطر می‌اندازند. از جمله این مشکلات می‌توان به زوال زودرس روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر با قرار گرفتن در معرض حملات شیمیایی، گرفتگی منافذ ناشی از شن و ماسه و رسوبات موجود در آبهای سطحی اشاره کرد (Kia et al., 2017; Weiss et al., 2017). این عوامل از جمله موارد مهمی هستند که باید در طراحی، ساخت و نگهداری روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در نظر گرفته شوند. هدف اصلی این مقاله، گردآوری و بررسی مطالعات پیشین صورت گرفته در زمینه بتن‌های نفوذ پذیر بوده تا بتواند به سایر دانشمندان، محققان و مهندسان کمک کند تا شناختی کامل‌تر از بتن نفوذ پذیر و کاربرد آن به عنوان یک سیستم روسازی راه داشته باشند. همچنین این مطالعه این امکان را به محققان می‌دهد تا بتوانند مزایا و معایب بتن‌های نفوذ پذیر را شناسایی کرده و تحقیقات آینده را در جهت برطرف کردن این معایب و اجرای روسازی بتنی نفوذ پذیر به عنوان یک سیستم روسازی سازگار با محیط زیست انجام دهند. شکل ۱ به طور شماتیک بتن نفوذ پذیر را با بتن معمولی مقایسه می‌کند (Zhong & Leng & Poon, 2018).

می‌کند که حاوی مقدار کمی (یا بدون) سنگدانه ریز بوده که این امر منجر به ایجاد حفره‌های کافی برای عبور راحت هوا و آب از سطح بتن به لایه‌های زیرین می‌شود (ACI CT-13). محبوبیت استفاده از بتن‌های نفوذ پذیر در کشورهای اروپایی به بعد از جنگ جهانی دوم برمی‌گردد. در آن زمان به دلیل کمبود عرضه آجر و سایر مصالح ساختمانی و همچنین تقاضای بالا برای بازسازی زیرساخت‌ها منجر به افزایش استفاده از بتن‌های نفوذپذیر به عنوان یکی از مصالح ساختمانی بادوام شد (AlShareedah & Nassiri, 2019; Rodin et al., 2019). اگرچه بتن نفوذپذیر بیش از ۷۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته است، اما کاربرد این نوع بتن در روسازی‌های راه به خصوص در کنترل کمیت و کیفیت رواناب‌ها اخیراً مورد توجه بسیاری قرار گرفته و در کنار سایر روسازی‌های بتنی مانند بتن غلطکی (Salimi & Kamboozia & Aliha, 2024) و روسازی بتنی متداول (Tang et al., 2024) آن را به یک گزینه ایده‌آل جهت استفاده به عنوان روسازی راه تبدیل کرده است. توانایی نفوذ آب از طریق منافذ باز این نوع بتن، بتن نفوذ پذیر را به ابزاری بسیار موثر جهت کنترل رواناب‌های سطحی تبدیل کرده است. علاوه بر این، گسترش سطوح غیرقابل نفوذ می‌تواند منجر به ایجاد اثر جزیره گرمایی، صدای حاصل از برخورد تایر به سطح روسازی، کاهش آب‌های زیرزمینی و کاهش ایمنی ترافیک جاده شود که بتن نفوذ پذیر به واسطه سطوح نفوذپذیر خود پتانسیل بالایی جهت برطرف کردن این موارد را دارد (Haselbach et al., 2011). سینگ و همکاران در یکی از مطالعات خود اظهار می‌کند که در صورت توسعه روش‌های طراحی برپایه مکانیک، بتن‌های نفوذپذیر پتانسیل بالایی جهت استفاده به عنوان روسازی در راه‌های با حجم پایین وسایل نقلیه مانند خیابان‌های محلی، گذرگاه‌ها و پیاده روها و در آینده‌ای بسیار نزدیک در شریان‌های اصلی و بزرگراه‌ها را دارند (singh et al., 2024). با این حال، روسازی‌های بتنی نفوذپذیر به طور فزاینده‌ای به عنوان ابزاری مقرون به صرفه در مدیریت محیط طبیعی اطراف زیرساخت‌های راه به کار گرفته می‌شوند (Martinho et al., 2023). تقاضای استفاده از روسازی‌های نفوذ پذیر در بسیاری از شهرهای دنیا و ایالات متحده افزایش یافته است. در اروپا بتن نفوذ پذیر جهت کاهش صدای جاده‌ها، جلوگیری از پاشش آب از سطح جاده‌ها و افزایش اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در چین بتن‌های نفوذ پذیر در طراحی شهر اسفنجی جهت کاهش مشکل سیل شهری و به عنوان سیستم زهکشی

همچنین در جدول ۱ مزایا و معایب استفاده از بتن نفوذپذیر به عنوان روسازی راه به طور خلاصه ذکر گردیده است.



شکل ۱. مقایسه شماتیک بتن نفوذ پذیر و بتن غیر قابل نفوذ (Zhong & Leng & Poon, 2018)

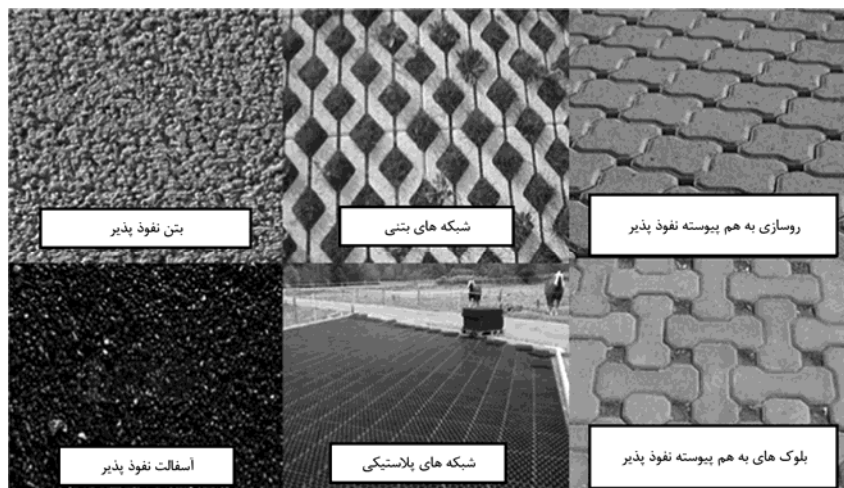
جدول ۱. مزایا و معایب استفاده از بتن نفوذ پذیر در روسازی‌های بتنی (Zhong & Leng & Poon, 2018)

| معایب   | مزایا   | نوع روسازی                   |
|---|---|------------------------------|
| <p>-خطر گرفتگی منافذ، در صورت اجرا و نگهداری نادرست از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر.</p> <p>-دوام و استحکام محدود.</p> | <p>-کاهش حجم رواناب.</p> <p>-کاهش آلودگی رواناب‌ها.</p> <p>-کمک به تغذیه آب‌های زیرزمینی.</p> <p>-بهبود و ایجاد فضای سبز در اطراف روسازی بتنی نفوذ پذیر.</p> <p>-کاهش نیاز به زیرساخت‌های جلوگیری از سیلاب.</p> <p>-کاهش اثر جزیره گرمایی.</p> <p>-افزایش ایمنی ترافیک جاده‌ها.</p> <p>-تجزیه زیستی روغن و سایر آلاینده‌های موجود در سطح روسازی.</p> <p>-بهبود عملکرد کنترل آلودگی صوتی روسازی.</p> | <p>روسازی بتنی نفوذ پذیر</p> |

## ۲- مروری بر انواع روسازی‌های نفوذ پذیر

پذیر یکپارچه شامل یک لایه بتن یا آسفالت متخلخل در سطح راه می‌باشد در حالیکه ساختار سیستم روسازی نفوذ پذیر شامل کنار هم قرار دادن سنگ فرش‌های مختلف نظیر سنگدانه‌های متخلخل، ژئوسل‌های پلاستیکی، بلوک‌های روسازی با اتصال باز و سنگ فرش‌های بتنی هستند. در شکل ۲ انواع مختلف روسازی‌های گذشته نشان داده شده است، با این حال در این مطالعه تمرکز عمدتاً بر روی مطالعات پیشین مربوط به روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر است.

روسازی‌های نفوذ پذیر عمدتاً شبیه به روسازی‌های متداول هستند با این تفاوت که ماهیت آن‌ها نسبتاً متخلخل است، یعنی این نوع روسازی عمدتاً حفره‌های زیادی را در خود گنجانده‌اند. از این رو، طراحی آن‌ها نیز تا حدودی با روسازی‌های متداول متفاوت است و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها با روسازی‌های معمولی تفاوت چشمگیری دارند. فرگوسن (Ferguson, 2005) سیستم‌های روسازی نفوذ پذیر را به دو دسته کلی روسازی نفوذ پذیر یکپارچه و روسازی نفوذ پذیر تکه تکه تقسیم کرد. ساختار سیستم روسازی نفوذ



شکل ۲. انواع مختلف سیستم‌های روسازی نفوذ پذیر (Debnath & Sarkar, 2020)

### ۳- خصوصیات بتن‌های نفوذ پذیر

بتن نفوذ پذیر از ترکیب سنگدانه‌های درشت با دانه بندی شکاف دار (در بعضی موارد بدون ریز دانه و پرکننده) تشکیل شده است که توسط سیمان یا افزودنی‌های سیمانی دیگر به یکدیگر چسبیده می‌شوند. نبود سنگدانه‌های ریز در این نوع از بتن منجر به ایجاد حفره‌های باز در داخل این بتن می‌شود که این منافذ عبور آب و هوا را از داخل بتن امکان پذیر می‌کنند (Haselbach, 2010; Lian & Zhuge, 2010). اما با این حال چسبندگی ضعیف این درشت دانه‌ها توسط سیمان منجر به تضعیف مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر می‌شود که در نهایت باعث می‌شود تا روسازی‌های ساخته شده از بتن نفوذ پذیر در مقابل ترک خوردگی آسیب پذیرتر باشند (Wu et al., 2013; Dong et al., 2010). جهت برطرف کردن این ضعف بتن‌های نفوذ پذیر، می‌توان از افزودنی‌های سیمانی که در کنار ایجاد نفوذ پذیری در بتن، استحکام فشاری آن‌ها را افزایش می‌دهند نیز استفاده کرد. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که درصد فضای خالی روسازی‌های نفوذ پذیر ۱۱ الی ۳۵ درصد بوده. همچنین انجمن ملی بتن حداقل درصد تخلخل در این نوع بتن را ۱۵ درصد توصیه کرده است. تنیس و همکاران (Tennis et al., 2004) نشان دادند که انرژی تراکم و درصد ریزدانه موجود در مخلوط تاثیر بسزایی در حفظ و پایداری حفره‌ها و منافذ موجود در بتن نفوذ پذیر دارند. همچنین نشان دادند که نوع و اندازه سنگدانه، مصالح سیمانی و نسبت مخلوط از جمله نسبت

آب به سیمان و نسبت سنگدانه به مصالح سیمانی نقش مهمی در حفظ مقاومت و درصد فضای خالی در بتن‌های نفوذ پذیر دارند.

### ۳-۱- طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر

در مقایسه با روش طرح اختلاط روسازی‌های بتنی متداول که قابلیت جابه‌جایی، تراکم پذیری و پایداری را در نظر می‌گیرد، طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر نیازمند رعایت ملاحظات بیشتری است. همچنین روش‌های متداول دانه بندی که بر اساس چگالی، درصد فضای خالی و دیگر استانداردهای طراحی بتن می‌باشند، به دلیل نیاز به لحاظ سیستم فضای خالی در طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر قابل استفاده نمی‌باشند. لذا موارد ذکر شده، گسترش روشی استاندارد برای طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر را تبدیل به امری چالش بر انگیز می‌کند. معیارهای عملکردی مانند کارایی مخلوط (آزمون اسلامپ)، انقباض و زمان گیرش که در طرح اختلاط بتن‌های متداول مورد استفاده در روسازی‌های بتنی، استفاده می‌شوند، در طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر کارایی نداشته و به جای این معیارها در طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر از معیارهایی مانند تخلخل، نفوذ پذیری، مقاومت فشاری و در بعضی مواقع مقاومت خمشی، دوام در برابر چرخه ذوب و یخ‌زدان و مقاومت سایشی استفاده می‌شوند (AlShareedah & Nassiri, 2021). طرح اختلاط مناسب، طرح اختلاطی است که بتواند میان تخلخل یا نفوذ پذیری و خواص مکانیکی مخلوط در جهت برآوردن الزامات



شکل ۳. بتن تازه نفوذ پذیر با حجم مناسب خمیر سیمان جهت پوشش سنگدانه‌های درشت (AlShareedah & Nassiri, 2021)

موسسه انجمن بتن آمریکا، یک روش هشت مرحله‌ای را برای طرح اختلاط بتن نفوذ پذیر در پیش نویس استاندارد ASTM 522-R10 ارائه داد. پارامترهای ورودی در این روش شامل: نسبت آب به سیمان، تخلخل و چگالی خشک سنگدانه‌های درشت است. همچنین درصد سیمان و آب در این روش از طریق رابطه بین تخلخل و حجم خمیر سیمان تعیین می‌گردند. با این حال، این روش تنها برای دستیابی به طرح اختلاط اولیه بتن نفوذ پذیر استفاده می‌شود که در مراحل بعدی نسبت‌های به دست آمده جهت دستیابی به خواص مورد نظر تغییر می‌کنند. در سال ۲۰۱۴، نگوین و همکاران (Nguyen et al., 2014) روشی بر اساس حجم خمیر سیمان و با فرض کروی بودن سنگدانه‌های درشت جهت تخمین ضخامت خمیر سیمان پوشش دهنده سنگدانه‌ها در بتن تازه را ارائه دادند.

در این روش نسبت آب به سیمان با استفاده از آزمایش تعیین رطوبت خمیر سیمان تعیین می‌شود. با این حال، این روش تنها بر اساس یک ترکیب توسعه یافته بود و نیازمند این است تا برای طیف گسترده‌ای از مخلوط‌ها با نسبت استفاده از نسبت‌های مختلف آب به سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان، انواع مختلف سنگدانه با شکل‌ها و سطوح مختلف مورد آزمایش قرار گیرد. لیو و همکاران (Liu et al., 2019) توانستند با افزودن پلیمر سیلان غلظت سیمان در چسبانندگی سنگدانه‌ها به هم بهبود ببخشند. بتن تقویت شده با پلیمر سیلان به همراه سنگدانه‌های بازیافتی در این مطالعه توانست به مقاومت ۳۲ الی ۱۱۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد برسد. با این حال افزودن پلیمر روشی

عملکرد ساختاری و هیدرولوژیکی تعادل ایجاد کند (یکی از منابع دلخواه). طرح اختلاط بتن نفوذ پذیر می‌بایست براساس حفظ تعادل میان ایجاد فضای خالی کافی، درصد خمیر سیمان، مقاومت و کارایی آن می‌باشد. با توجه به کمبود استاندارد طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر و براساس روش آزمون و خطا، چندین طرح اختلاط با ترکیبات مختلف ساخته شدند و از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی آزمایش شدند تا بتوانند به فاکتورهای مورد نیاز بتن‌های نفوذ پذیر برسند (ACI 522-R10). بر این اساس، نسبت‌های معمول برای طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر به همراه محدوده نتایج آزمایش‌های تخلخل، نفوذ پذیری و مقاومت فشاری که براساس مطالعات پیشین گردآوری شده، در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۲. مصالح معمول مورد استفاده در بتن نفوذ پذیر و محدوده مورد استفاده از آن‌ها به همراه برخی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر (Chandruppa & Biligiri, 2016; Eisenberg & Lindow, 2015; Kevern & Nowasell, 2018)

| محدوده مورد استفاده در مطالعات | مصالح  |
|--------------------------------|--|
| ۲۸۰ - ۳۱۰                      | سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)                         |
| ۱۴۴۰ - ۱۸۰۰                    | مقدار درشت دانه (کیلوگرم بر مترمکعب)               |
| ۸۵ - ۲۰۵                       | مقدار ریز دانه (در صورت وجود) (کیلوگرم بر مترمکعب) |
| ۰/۲۶ - ۰/۴۵                    | نسبت آب به سیمان                                   |
| ۴:۱ - ۴/۵:۱                    | نسبت سنگدانه به سیمان (سیمان : سنگدانه)            |
| ۲/۳۸ - ۱۹                      | اندازه سنگدانه درشت (میلیمتر)                      |
| ۱۵ - ۳۵                        | درصد تخلخل (%)                                     |
| ۲/۸ - ۲۸                       | مقاومت فشاری (مگاپاسکال)                           |
| ۰/۱۴ - ۱/۲۲                    | نفوذ پذیری (سانتیمتر بر ثانیه)                     |

در نتیجه طرح اختلاط مطلوب منجر به ایجاد یک شبکه به هم پیوسته از سیستم فضای خالی می‌شود که این شبکه به هم پیوسته از مخلوط سنگدانه‌های درشت با اندازه نسبتاً یکنواخت با خمیر سیمان کافی جهت چسباندن این سنگدانه‌ها به هم به دست می‌آید. شکل ۳ نمونه‌ای از یک مخلوط بتن نفوذ پذیر ایده‌آل را نشان می‌دهد (AlShareedah & Nassiri, 2021).

مناسب برای تولید کنندگان بتن و پیمانکاران نبوده و قیمت تولید بتن نفوذ پذیر را افزایش می‌دهد. مطالعات دیگر نیز بیشتر بر روی ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بتن نفوذ پذیر مانند نسبت سنگدانه به سیمان متمرکز بودند و به رابطه بین تخلخل با سایر در این مطالعات به خوبی توجه نشده است. چندین مطالعه نشان می‌دهد که با کاهش نسبت سنگدانه به سیمان استحکام بتن نفوذ پذیر افزایش می‌یابد، اما قابل ذکر است که این افزایش تنها به دلیل کاهش تخلخل در بتن نفوذ پذیر اتفاق می‌افتد ( Xu et al., 2020; Dai et al., 2020). به طور مشابه در چندین مطالعه دیگر نشان داده شد که با افزایش نسبت آب به سیمان در محدوده بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ استحکام فشاری بتن‌های نفوذ پذیر، افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش نیز کاهش تخلخل در نمونه‌های بتن نفوذ پذیر می‌باشد ( Ibrahim et al., 2014; Sonebi & Bassuoni, 2013). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ثابت در نظر گرفتن درصد تخلخل نمونه‌ها، با کاهش نسبت آب به سیمان و کاهش مقدار فوق روان کننده استحکام فشاری بتن نفوذ پذیر افزایش می‌یابد. با این حال باید توجه داشت که نسبت آب به سیمان پائین می‌تواند باعث ایجاد انسجام و ناکافی شود و در مقابل نسبت آب به سیمان بالا مخلوطی با روانی بسیار بالا ایجاد می‌کند که باعث تفکیک مصالح از هم می‌شود ( Xie & Akim & Shin, 2019). از آنجاییکه بتن نفوذ پذیر با فرض اسلامپ صفر طراحی می‌شوند، بسیاری از محققین جهت برطرف کردن مشکل حفظ کارایی بر اساس گزارش ACI R522 استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب مانند افزودنی‌های کاهنده آب<sup>۱</sup> (WRA)، کندگیر کننده، افزودنی تثبیت کننده هیدراتاسیون<sup>۲</sup> (HSA) و افزودنی‌های اصلاح کننده ویسکوزیته<sup>۳</sup> (VMA) را پیشنهاد دادند. همچنین وو و همکاران ( Wu et al., 2016) نشان دادند که افزودن، افزودنی‌های حباب زا به افزایش دوام ذوب و یخبندان بتن‌های نفوذ پذیر کمک می‌کند.

نفوذ پذیر مانند مقاومت فشاری استفاده کردند. در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر، مقاومت در برابر سایش یک عامل عملکردی ضروری به شمار می‌رود که با مقاومت فشاری مخلوط بتن نفوذ پذیر دارد. مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر به طور کلی به پیوند بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان وابسته است. همچنین میزان تخلخل در این بتن‌ها به طور عمده به اندازه اسمی، نوع، شکل و سایر خصوصیات سنگدانه‌های مورد استفاده در مخلوط بتن‌های نفوذ پذیر وابسته است. بر خلاف بتن‌های متداول، تاثیر اندازه اسمی سنگدانه مورد استفاده در بتن نفوذ پذیر بر مقاومت فشاری آن کمتر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. یو و همکاران (Yu et al., 2019) در مطالعه‌ای با بررسی ۸ مخلوط مختلف با محدوده دانه بندی مختلف، نشان دادند که بتن نفوذ پذیر با تخلخل ۲۰ درصد و با اندازه سنگدانه بین ۲/۳۶ الی ۴/۷۶ میلیمتر (کوچکترین محدوده مورد استفاده در این آزمایش) دارای کمترین مقدار مقاومت فشاری در بین نمونه‌های مورد آزمایش بود. همچنین نتایج این آزمایش نشان داد که با استفاده از سنگدانه‌های در محدوده ۴/۷۶ الی ۹/۵ میلی‌متر، مقاومت فشاری نمونه نسبت به حالت قبل ۵۲ درصد افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر کاسیک و همکاران (Cosic et al., 2015) با مقایسه بتن نفوذ پذیر حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در محدوده ۸ الی ۱۶ میلیمتر و ۳۰ درصد سنگدانه در محدوده ۴ الی ۸ میلیمتر با نمونه بتن نفوذ پذیر حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در محدوده ۴ الی ۸ میلیمتر و ۳۰ درصد سنگدانه در محدوده ۸ الی ۱۶ میلیمتر، نشان دادند که مقاومت فشاری در نمونه اول به مقدار ۲۱ درصد بیشتر از نمونه دوم بود. نشان و دوو (Neithalath & Deo, 2010) با ساخت و آزمایش بتن‌های نفوذ پذیر حاوی تنها یک اندازه از سنگدانه (۲/۳۸، ۴/۷۶ و ۹/۵۱ میلیمتر) نشان دادند که هر چه اندازه سنگدانه استفاده شده در ساخت بتن نفوذ پذیر کوچکتر باشد، استحکام نمونه نیز کمتر می‌شود که این احتمالاً به دلیل وجود خلل و فرج بیشتر نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های کوچکتر است. با این حال، بعضی از مطالعات نشان دادند که استفاده از سنگدانه‌های کوچکتر منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن نفوذ پذیر می‌شود ( Elango & Revathi & Fat, 2017; Kamboozia et al., 2024; Sun & Lin & Vollprocht, 2018). سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن‌های نفوذ پذیر عمدتاً از نوع گرانیت، دولومیت، سنگ آهک، کوارتزیت و ... بوده و ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌های درشت مورد استفاده می‌بایست مشابه سنگدانه‌های مورد استفاده در روسازی‌های بتنی متداول باشند. علاوه بر این، سنگدانه‌های مورد استفاده می‌بایست با استانداردهای ASTM ۳۳C و ۴۴۸C مطابقت داشته باشند.

### ۳-۱-۱- تاثیر سنگدانه‌های درشت در استحکام بتن نفوذ پذیر

عمده‌ترین تفاوت میان روسازی بتن معمولی و روسازی بتنی نفوذ پذیر، اندازه دانه بندی و مقدار سنگدانه مورد استفاده در طرح اختلاط آن‌ها است. یکی از مشخصات اصلی بتن‌های نفوذ پذیر وجود حفره‌های بسیار زیاد جهت نفوذ آب در آن می‌باشد. در این راستا انجمن بتن آمریکا (ACI 522، ۲۰۱۰) محدوده دانه بندی ۹/۵ الی ۱۹ میلی‌متر را برای استفاده در بتن‌های نفوذ پذیر پیشنهاد داده است. با این حال، برخی محققان از سنگدانه‌های کوچکتر جهت افزایش سایر پارامترهای بتن

### ۳-۱-۲- تاثیر سنگدانه‌های ریز و فیلرها بر استحکام بتن

#### نفوذ پذیر

سنگدانه‌های ریز ممکن است به مقدار ۵ الی ۱۰ درصد از حجم درشت دانه‌ها در مخلوط بتن نفوذ پذیر در جهت بهبود استحکام و دوام بتن‌های نفوذ پذیر، استفاده شوند. در یکی مطالعات انجام شده در این زمینه، نتایج آزمایشات نشان دادند که افزودن ماسه رودخانه‌ای به اندازه ۱۰ درصد حجم درشت دانه در مخلوط بتن نفوذ پذیر با نسبت آب به سیمان ۰/۳ الی ۰/۴، منجر به کاهش ۱۲ درصدی تخلخل و افزایش ۵۰ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن نفوذ پذیر شد (Ibrahim et al., 2020). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، افزودن ماسه به اندازه ۷ درصد حجم درشت دانه به بتن نفوذ پذیر حاوی سنگدانه بازیافتی با تخلخل بیش از ۵۰ درصد و نسبت آب به سیمان ۰/۲۷، منجر به کاهش ۱۶ درصدی تخلخل و افزایش ۱۹ درصدی مقاومت فشاری شد (Barnhouse & Srubar, 2016). ماسه علاوه بر کاهش تخلخل، به دلیل ایجاد پوشش خمیری ضخیم‌تر و افزایش سطح تماس میان سنگدانه‌ها که منجر به بهبود چفت و بسط بین سنگدانه‌ها می‌شود، استحکام بتن نفوذ پذیر را نیز افزایش می‌دهد (Ibrahim et al., 2020). در مناطق آب و هوای سرد که روسازی‌های بتنی در معرض چرخه ذوب و یخبندان قرار می‌گیرند، کاورن و همکاران (Kevern et al., 2008) به این نتیجه رسیدند که جایگزین کردن ۷ درصد از حجم سنگدانه‌های درشت با ماسه منجر به افزایش قابل توجه استحکام در برابر لغزش می‌شود. علاوه بر این، عمل‌آوری نامناسب بتن نفوذ پذیر تازه اجرا شده می‌تواند منجر به ریزش بتن شود، که یکی از رایج‌ترین مشکلات اجرای روسازی بتنی نفوذ پذیر می‌باشد. کاورن و نوازل (Kevern & Nowasell, 2018) استفاده از سنگدانه‌های سبک از قبل خیس شده (PLWA) را برای ایجاد فرآیند عمل‌آوری در داخل بتن پیشنهاد دادند. نتایج این مطالعات نشان دادند که جایگزین کردن ۷ درصد از حجم درشت دانه با سنگدانه‌های سبک از قبل خیس شده علاوه بر اینکه هیدراتاسیون مخلوط را ۱۰ درصد افزایش می‌دهد، استحکام و مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخبندان را افزایش داده و همچنین انقباض در بتن‌های نفوذ پذیر را کاهش می‌دهد.

### ۳-۲- مروری بر عوامل تشکیل‌دهنده سیستم منافذ بتن

#### نفوذ پذیر

ساختار منافذ بتن‌های نفوذ پذیر تاثیر زیادی بر حفظ تخلخل، خواص مکانیکی و عملکرد هیدرولیکی روسازی‌های

بتنی نفوذ پذیر دارند و همواره نقش حیاتی در طراحی بتن‌های نفوذ پذیر جهت دستیابی به روسازی بتنی نفوذ پذیر پایدار، ایفا می‌کنند. بطور کلی هر دو ویژگی ساختاری و عملکردی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به ویژگی‌های سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر وابسته است (Zhong & Wille, 2016; Zhong et al., 2016). لذا در این بخش تمرکز بر روی بررسی سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر می‌باشد.

### ۳-۲-۱- تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر

تخلخل یکی از پارامترهای اصلی در سیستم منافذ بتن‌های نفوذ پذیر می‌باشد. با این حال هنوز تعریف درستی از تخلخل و اینکه کدام نوع از در تعریف بتن‌های نفوذ پذیر اعمال گردد، وجود ندارد. همچنین باید توجه کرد که تمامی منافذ برای عبور مایعات از بتن‌های نفوذ پذیر موثر نمی‌باشند بطور مثال، برخی منافذ کوچک مانند منافذ مویرگی و منافذ با انتهای بسته وجود دارند که مایعات را به دلیل کشش سطحی و اثر موینگی مایعات در خود نگه می‌دارند اما برای انتقال مایعات مناسب نیستند. و همچنین این منافذ منجر به کاهش استحکام بتن‌های نفوذ پذیر نیز می‌شوند. ژونگ و ویل (Zhong & Wille, 2016) سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر را به دو دسته منافذ موثر و منافذ کل تقسیم کردند. در این مطالعه، منافذ موثر به عنوان نسبت حجم منافذ به هم متصل به حجم کل ماده و منافذ کل به عنوان مجموع منافذ به هم متصل و جدا از هم (شامل تخلخل میان سنگدانه‌ها و تخلخل در مخلوط بتن) به حجم کل ماده تعریف شدند.

روش نفوذ جیوه (براساس استاندارد ASTM D 4114) معمولاً برای تعیین اندازه منافذ و توزیع آن‌ها در بتن‌های متداول استفاده می‌شود. اما در بتن‌های نفوذ پذیر به دلیل وجود منافذ زیاد و سیستم منافذ متصل به هم، استفاده از این توجیهی ندارد. بنابراین روش‌های دیگری جهت تعیین مقدار تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر پیشنهاد شده است. کراچ و همکاران (Crouch et al., 2013) با اصلاح استاندارد AASHTO T 166 روشی جهت ارزیابی تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر ارائه دادند. این روش با استفاده از سیستم TekCorelok Instro خروج هوا از منافذ و نفوذ آب به داخل منافذ بتن نفوذ پذیر را بهبود بخشید. در مقایسه با سایر روش‌های موجود، در این روش هوای کمتری در نمونه‌ها باقی می‌ماند و به دلیل ایجاد شرایط خلاء در کیسه

تخلخل یکسان، توزیع منافذ و ریزساختارهای موجود می‌توانند منجر به تغییر در عملکرد مکانیکی، هیدرولیکی و قابلیت جلوگیری از انتشار صدا در بتن‌های نفوذ پذیر شوند (خود مقاله). دیو و همکاران (Deo & Neithalath, 2010) و ژونگ و ویل (Zhong & Wille, 2016) در مطالعاتی که بر روی بتن‌های نفوذ پذیر داشتند، نشان دادند مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر علاوه بر مقدار تخلخل، به شدت تحت تاثیر عواملی نظیر اندازه منافذ، توزیع منافذ و فاصله منافذ از هم قرار می‌گیرد. رهدر و همکاران (Rehder et al., 2014) با بررسی چقرمگی شکست<sup>۷</sup> بتن‌های نفوذ پذیر، به این نتیجه رسیدند که اگرچه مقدار چقرمگی شکست درجه اول به مقدار تخلخل بستگی دارد اما با ثابت در نظر گرفتن مقدار تخلخل در نمونه‌ها، افزایش اندازه منافذ منجر کاهش چقرمگی شکست بتن‌های نفوذ پذیر می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر نیتالات و همکاران (Neithalath et al., 2015) نشان دادند که نمونه‌های با مقدار تخلخل یکسان دارای ضریب جذب صوتی<sup>۸</sup> (شاخصی جهت نشان دادن توانایی مصالح در جذب انرژی صوتی) و نفوذ پذیری متفاوتی بودند. همچنین ژونگ و ویل (Zhong & Wille, 2016) در مطالعه‌ای بیان کردند که جهت افزایش دقت در عملکرد هیدرولیکی بتن‌های نفوذ پذیر، در کنار پارامتر تخلخل می‌بایست مسیر حرکت مایع در منافذ نیز در مدلسازی در نظر گرفته شود. بنابراین، با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان این نتیجه را گرفت که عملکرد سیستم منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر تنها به تخلخل وابسته نبوده و اندازه منافذ، اتصال منافذ به یکدیگر و توزیع منافذ بر عملکرد این سیستم تاثیر می‌گذارند و شناخت بهتر تاثیر این عوامل بر سیستم منافذ بتن‌های نفوذ پذیر می‌تواند به طراحی بهینه و بهبود عملکرد روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر کمک کند. برخی از محققین با استفاده ترموگرافی کامپیوتری (سی تی اسکن) اشعه ایکس، اندازه و نحوه توزیع منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر را مورد بررسی قرار دادند. در این روش، پرتوی اشعه ایکس از زوایای مختلف به بتن نفوذ پذیر تابانده شده و سپس توسط صفحه تخت سوسونج<sup>۹</sup> جذب می‌شود. در مرحله بعد پرتو جذب شده توسط نرم افزارهای پردازش تصویر، تصویر سه بعدی ماده را با ترکیب چندین تصویر دو بعدی ایجاد می‌کنند (Bordelon & Roesler, 2014). این مدل سه بعدی ایجاد شده برای تعیین اندازه متوسط منافذ و توزیع منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) میانگین اندازه منافذ بتن‌های نفوذ پذیر با درصد تخلخل‌های ۱۳، ۲۰، ۲۵ و ۲۸ درصد را به ترتیب ۳/۳۸، ۴/۷۴، ۵/۴ و ۷/۴ میلی‌متر گزارش کردند. همچنین محققان دیگر از ترموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس برای توسعه روابط

پلیمری، آب بیشتری به داخل بتن نفوذ می‌کند. با این حال، نیاز به استفاده از تجهیزات اختصاصی را می‌توان یکی از مشکلات عمده استفاده از این روش بیان کرد. موتس و همکاران (Montes et al., 2015) جهت برطرف کردن این محدودیت، روشی بر پایه اصل ارشمیدس جهت محاسبه تخلخل نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ارائه کردند که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاه‌های استاندارد قابل اجرا بود. در کنار روش‌های آزمایشگاهی، برخی محققان از روش‌های پردازش تصویر<sup>۱۰</sup> و روش‌های آماری جهت محاسبه میزان تخلخل بتن‌های نفوذ پذیر استفاده کردند. این روش اخیراً توسط بسیاری از محققین جهت ثبت جزئیات ساختار منافذ بتن‌های نفوذ پذیر مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر دیجیتالی دو بعدی معمولاً با استفاده از اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱۱</sup> و اسکنرهای با کارایی بالا به دست می‌آیند. سپس این تصاویر با تعیین محدوده‌های به تصاویر باینری با کیفیت مطلوب تبدیل می‌شوند و بعد از ایجاد تصاویر باینری پردازش بیشتر جهت حذف عوامل مخرب ادامه می‌یابد تا جزئیات سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر با کیفیت مطلوب‌تری به دست آیند (Akand et al., 2016; Neithalath et al., 2010). ژونگ و ویل (Zhong & Wille, 2016) با استفاده از تصاویر منعکس شده از اشعه ایکس در مقیاس خاکستری ۱۶ بیتی و تبدیل آن‌ها به تصاویری باینری تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر را محاسبه کردند. طبق مطالعات صورت گرفته، مشخص شد که دقت استفاده از روش‌های پردازش تصویر جهت محاسبه میزان تخلخل نسبت به روش‌های آزمایشگاهی بیشتر بود. با این حال، روش‌های آزمایشگاهی برای محاسبه تخلخل بسیار آسان‌تر بودند. بنابراین، اگر تنها هدف از آزمایش محاسبه تخلخل باشد روش‌های آزمایشگاهی گزینه ایده‌آل‌تری می‌باشند اما اگر در کنار محاسبه تخلخل پارامترهای دیگر مانند عملکرد هیدرولیکی که نیازمند اطلاعات بیشتری مانند نحوه توزیع و اندازه منافذ است، مد نظر باشد روش‌های پردازش تصویر گزینه بهتری می‌باشد.

### ۲-۲-۳- بررسی تاثیر اندازه و توزیع منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر

تخلخل بدون شک یکی از مهمترین پارامترهای سیستم منافذ بتن‌های نفوذ پذیر می‌باشد، اما این پارامتر به تنهایی قادر به تعیین عملکرد بتن‌های نفوذ پذیر نیست. در بتن‌های نفوذ پذیر با

همچنین اخیراً بتن‌های نفوذ پذیر با کارایی بالا (Shen et al, 2021) توسط ژانگ و وایلی (, 2021) ارائه شده‌اند. در بتن‌های نفوذ پذیر با کارایی بالا، با استفاده از مصالح جایگزین سیمان مانند دوده سیلیسی، خاکستر بادی و یا استفاده از دوده سیلیسی به عنوان فیلر دانه بندی بتن نفوذ پذیر، مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر به بیش از ۴۰ مگاپاسکال رسید. پیش‌بینی رفتار مکانیکی برای طراحی و استفاده موثرتر از بتن نفوذ پذیر امری ضروری بوده و از آنجاییکه تخلخل مهمترین پارامتر بتن نفوذ پذیر می‌باشد، مطالعات صورت گرفته بیشتر بر روی پیش بینی مقاومت فشاری با استفاده از تخلخل و ایجاد رابطه بین این دو پارامتر متمرکز هستند. استفاده از مدل‌های رگرسیونی جهت ارزیابی ارتباط بین مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر با تخلخل، نفوذ پذیری و نسبت استفاده از مصالح در بتن‌های نفوذ پذیر، توسعه یافته‌اند. نصیری و الشریه (Nassiri & Alshareedah, 2017) از مدل‌های رگرسیونی خطی برای ایجاد ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن نفوذ پذیر با درصد تخلخل و به ترتیب با بررسی ۱۸ نمونه جهت آزمایش مقاومت فشاری و ۸ نمونه جهت آزمایش مقاومت خمشی، استفاده کردند. نتایج این مدلسازی و روابط بین پارامترهای مورد مطالعه در شکل ۴ قابل مشاهده است. با این حال با توجه به ماهیت تصادفی منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر، عملکرد مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر را نمی‌توان به طور قابل توجهی تنها با در نظر گرفتن پارامتر تخلخل پیش بینی کرد و استفاده از سایر پارامترهای سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر جهت ارزیابی دقیق‌تر، ضروری است (Zhong & wille, 2016).

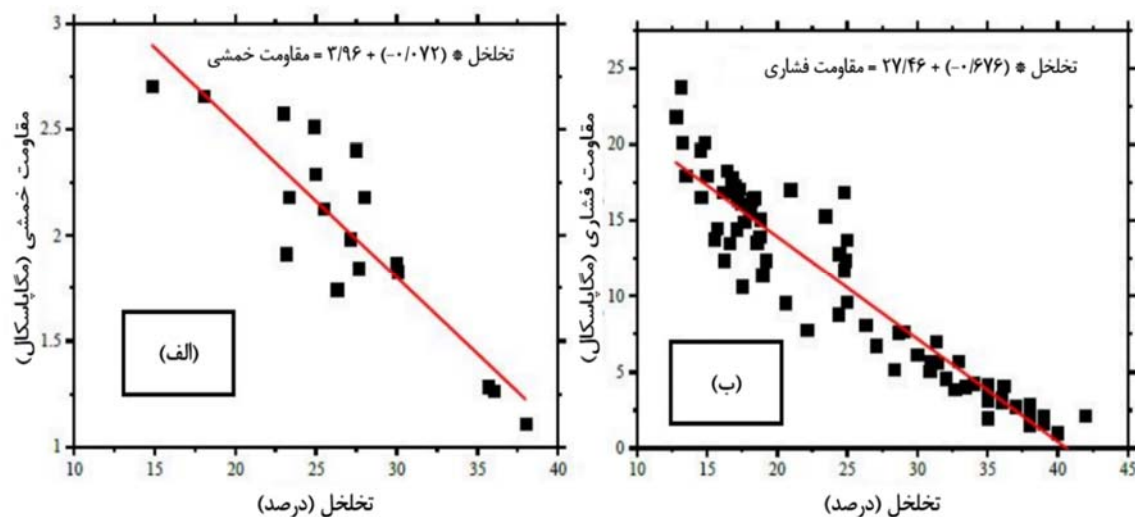
تجربی جهت محاسبه اندازه منافذ بر اساس پارامترهای ورودی مخلوط مانند اندازه سنگدانه، استفاده کردند ( Zhong & Wille, 2016; Neithalath et al., 2010). یکی دیگر از کاربردهای ترموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس که در مطالعات پیشین ذکر شده است، مدلسازی رفتار مکانیکی، هیدرولیکی و بررسی گرفتگی منافذ بتن‌های نفوذ پذیر با استفاده از مدل سه بعدی بتن نفوذ پذیر می‌باشد ( Yu et al., 2019; Wang et al., 2020; Nassiri & Alshareedah, 2019).

### ۳-۳- بررسی خصوصیات مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر

مطالعات زیادی جهت تجزیه و تحلیل خواص مقاومتی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و رفتار خستگی روسازی بتنی نفوذ پذیر انجام شده است که نشان می‌دهند مقاومت بتن نفوذ پذیر به طور غیرمستقیم توسط تخلخل در مخلوط بتن نفوذ پذیر کنترل می‌شود (Xie & Akin & Shi, 2019).

### ۳-۳-۱- عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر

مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر با مقدار تخلخل بین ۱۵ الی ۳۰ درصد، در محدوده بین ۷ الی ۲۵ مگاپاسکال گزارش شده است (Zhong & wille, 2016). همچنین راهکارهای مختلفی جهت بهبود مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر ارائه شده است. بطور مثال، در بعضی مطالعات نشان داده شده است که با کاهش نسبت سنگدانه به سیمان مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر از مقدار ۲۰ مگاپاسکال نیز فراتر رفته ( Bhutta et al.,



شکل ۴. رابطه بین (الف) مقاومت خمشی و (ب) مقاومت فشاری با درصد تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر (Zhong & wille, 2016)

### ۳-۲- عملکرد خستگی بتن‌های نفوذ پذیر

آب و هوای سرد، آب باقی مانده در این منافذ یخ زده و آب شود. این پدیده دوام روسازی بتنی نفوذ پذیر را به خطر می‌اندازد. از آنجاییکه هیچ روش آزمایش استاندارد برای تعیین دوام بتن‌های نفوذ پذیر وجود ندارد، تحقیقات صورت گرفته در این زمینه اغلب از استاندارد ASTM ۶۶۱C که مربوط به دوام بتن‌های متداول در برابر چرخه ذوب و یخبندان هست، استفاده می‌کنند. اما باید توجه داشت که در بتن‌های نفوذ پذیر هر چه ضخامت خمیر سیمان در اطراف سنگدانه‌ها کمتر باشد، بتن نفوذ پذیر سریع‌تر اشباع می‌شود که این امر بتن‌های نفوذ پذیر را در برابر چرخه ذوب و یخبندان آسیب پذیرتر می‌کند. بنابراین با توجه به محدودیت‌های بتن نفوذ پذیر در مقابله با چرخه ذوب و یخبندان نیاز هست تا استاندارد عملکردی مناسبی برای بتن‌های نفوذ پذیر نوشته شود (Kevern et al., 2011). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اگر چه بتن‌های نفوذ پذیر در مقایسه با بتن‌های متداول در برابر چرخه ذوب و یخبندان آسیب پذیرتر می‌باشند، اما می‌توان با استفاده از مواد افزودنی مختلف مانند افزودنی‌های حباب زای، چسب لاتکس، الیاف‌های مختلف و یا دوده سیلیسی دوام بتن‌های نفوذ پذیر را در برابر چرخه ذوب و یخبندان بهبود بخشید (Wu et al., 2016; Tan et al., 2021; Taheri et al., 2023; al.). گسوغلو و همکاران (Gesoglu et al., 2014) با اضافه کردن ضایعات حاصل از لاستیک به بتن‌های نفوذ پذیر، افزایش مقاومت بتن نفوذ پذیر در برابر سایش و چرخه ذوب و یخبندان را حتی پس از اعمال ۳۰۰ سیکل ذوب و یخبندان گزارش کردند. در مطالعه‌ای دیگر کوانگ و همکاران (Kuang et al., 2011) به این نتیجه رسیدند که جذب آب سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن‌های نفوذ پذیر بیشترین تاثیر را بر دوام بتن‌های نفوذ پذیر در برابر چرخه ذوب و یخبندان دارد. همچنین بیان کردند که سنگدانه‌های مورد استفاده می‌بایست وزن مخصوص بیش از ۲/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب، جذب آب کمتر از ۲/۵ درصد و افت وزنی ناشی از سایش کمتر از ۱۵ درصد داشته باشند، همچنین بیان کردند که جایگزین کردن مقدار ۷ درصد از سنگدانه‌های درشت با ماسه مقاومت بتن‌های نفوذ پذیر ذر برابر چرخه ذوب و یخبندان را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. سویی و همکاران (Sevi et al., 2016) در مطالعه‌ای دیگر با جایگزین کردن ۵ الی ۱۰ درصد از سنگدانه‌های درشت با سنگدانه‌های ریز و جایگزین کردن ۲۰ درصد از حجم سیمان مورد استفاده با مواد افزودنی مانند دوده سیلیسی یا سرباره، افزایش مقاومت بتن‌های نفوذ پذیر در برابر چرخه ذوب و یخبندان را گزارش کردند. در کنار

براهای وارده از ترافیک عبوری وسایل نقلیه ممکن است منجر به ترک خوردگی و ایجاد خرابی از نوع خستگی در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر شود. بنابراین نیاز هست تا رفتار خستگی بتن‌های نفوذ پذیر جهت استفاده در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد. محققان با مطالعه رفتار خستگی بتن نفوذ پذیر در حالت‌های بارگذاری خمشی و فشاری، مدل‌های آماری را براساس نتایج آزمایشات دوره‌ای با هدف تخمین عمر خستگی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر توسعه دادند. چادرا و بیلگری (Chandrappa & Biligiri, 2017) با آزمایش ۴۵ تیر بتنی تحت بارگذاری چرخه‌ای خمشی در فرکانس‌های ۵، ۲ و ۱۰ هرتز، تاثیر تخلخل و مقاومت خمشی را بر رفتار خستگی بتن‌های نفوذ پذیر مورد مطالعه قرار دادند. الشریده و نصیری (Alshareedah & Nassiri, 2019) با آزمایش و بررسی عملکرد خستگی ۶۶ تیر ساخته شده از بتن نفوذ پذیر تحت بارگذاری خمشی در فرکانس ۰/۵ هرتز، مدل آماری جهت بررسی عملکرد خستگی بتن‌های نفوذ پذیر ایجاد کردند. در این مطالعه تیرهای بتنی مورد آزمایش از دو نوع مختلف سنگدانه، دو طرح اختلاط مختلف و سه درصد تخلخل مختلف ساخته شده بودند. نتایج این آزمایش نشان دادند که عمر خستگی بتن نفوذ پذیر توسط نسبت تنش کنترل شده و تخلخل از نظر آماری تاثیری بر عمر خستگی بتن نفوذ پذیر ندارد. در مطالعه‌ای دیگر جیانو و همکاران (Jiao et al., 2020) با مدلسازی خستگی بتن نفوذ پذیر تحت بارگذاری چرخه‌ای فشاری در چهار نسبت تنش ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ و سه فرکانس ۱۰، ۱۵ و ۲۰ هرتز، به این نتیجه رسیدند که خرابی ناشی از خستگی در نسبت تنش ۰/۶ رخ نمی‌دهد و همچنین اثر فرکانس بر عمر خستگی بتن‌های نفوذ پذیر از نظر آماری ناچیز است.

### ۳-۴- دوام و استحکام بتن‌های نفوذ پذیر در برابر چرخه

#### ذوب و یخبندان

روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در برابر چرخه ذوب و یخبندان عملکرد مطلوبی را نشان داده‌اند (Dellate et al., 2009)، با این حال به دلیل وجود حجم زیاد حفره‌ها و منافذ در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر ممکن است آب در این منافذ نفوذ کرده و در آنجا باقی بماند و با قرار گرفتن روسازی بتنی نفوذ پذیر در معرض چرخه‌های دمایی متناوب، بخصوص در

در مطالعات پیشین نشان داده شد که گرفتگی منافذ به به حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها و یا درصد فضای خالی مخلوط وابسته نمی‌باشد و عمدتاً به توزیع و ساختار منافذ در بتن‌های نفوذ پذیر بستگی دارد (Sandoval et al., 2022). بنابراین ویژگی‌های سیستم ساختار منافذ نقش بسیار مهمی در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر دارند. همچنین انتظار می‌رود که روسازی‌های نفوذ پذیر علاوه بر عملکرد ساختاری، از عملکرد هیدرولوژیکی نیز برخوردار باشند، اما عملکرد هیدرولوژیکی روسازی‌های نفوذ پذیر به دلیل پدیده گرفتگی به طور مداوم در حال کاهش می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهند که شن و ماسه ریز در محدوده ۰/۱ الی ۰/۸ میلیمتر، میزان نفوذ پذیری روسازی‌های نفوذ پذیر را کاهش می‌دهند. در مطالعه‌ای دیگر کاکلیین و همکاران (Coughlin et al., 2012) مشاهده کردند که خاک رس در مقایسه با ماسه تقریباً گرفتگی منافذ را ده برابر شدیدتر می‌کند. همچنین حاصلیچ و همکاران (Haselbach et al., 2011) با بررسی رفتار گرفتگی منافذ روسازی بتنی نفوذ پذیر ناشی از خاک رس بتونیت و کائولیت، نشان دادند که سطح روسازی بعد از گرفتگی به یک سطح تقریباً غیر قابل نفوذ تبدیل شد. با توجه به مشکلات ناشی از گرفتگی روسازی‌های نفوذ پذیر، برخی از روش‌ها جهت برطرف کردن گرفتگی منافذ گسترش یافتند. از جمله متداول‌ترین روش‌های برطرف کردن گرفتگی منافذ به صورت دستی و مکانیکی، می‌توان به جارو کردن، شستشوی با استفاده از فشار و رفع گرفتگی با استفاده از پمپ خلاء اشاره کرد. فرگوسن (Ferguson, 2010) در مطالعه‌ای بیان کرد که گرفتگی منافذ ناشی از رسوبات ماسه را می‌توان بلافاصله با شستشوی فشار و جارو کردن سطح برطرف کرد. در بعضی از مطالعات نیز نشان داده شده است که روش شستشوی منافذ با استفاده از فشار قادر به برطرف کردن ۸۰ الی ۹۰ درصد گرفتگی منافذ بود. فشار اعمال شده در این روش معمولاً در حدود ۲۰/۷ مگاپاسکال گزارش شده است (Chopra et al., 2010). همچنین مطالعات نشان می‌دهند در میان روش‌های معرفی شده، روش شستشوی سطح با استفاده از فشار راندمان بالاتری جهت رفع گرفتگی منافذ سطح روسازی‌های نفوذ پذیر دارد (Sandoval et al., 2020). با این حال در کنار مطالعات صورت گرفته، انجمن بتن آمریکا در گزارشی بیان کرد که موثرترین روش جهت تمیز کردن سطح روسازی به منظور جلوگیری از گرفتگی منافذ روسازی‌های نفوذ پذیر، ترکیب دو روش مکش با استفاده از پمپ خلاء و شستشو با فشار می‌باشد.

مطالعات صورت گرفته، بانگ (Yong et al., 2013) و عامده (Amede et al., 2013) اثر افزودن الیاف را بر مقاومت بتن نفوذ پذیر در برابر چرخه ذوب و یخبندان را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که افزودن الیاف‌هایی مانند الیاف پلی پروپیلن و الیاف‌های سلولوزی علاوه بر اینکه سایر خواص بتن نفوذ پذیر مانند مقاومت خمشی آن را افزایش می‌دهد، عملکرد بتن نفوذ پذیر را در برابر چرخه ذوب و یخبندان به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

#### ۴- پدیده گرفتگی منافذ در روسازی‌های نفوذ پذیر

اگرچه استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر مزایای زیادی را به همراه دارد، اما مشکلاتی نیز وجود دارد که استفاده موثر طولانی مدت از این نوع روسازی‌ها را به خطر می‌اندازد. از جمله مهترین این مشکلات می‌توان به پدیده گرفتگی در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر اشاره کرد. اصطلاح گرفتگی تحت عنوان کاهش عملکرد هیدرولوژیکی روسازی بتنی نفوذ پذیر به دلیل آلودگی سیلاب‌ها در ترکیب با خاک یا زباله‌ها می‌باشد تعریف می‌شود، که منجر به مسدود شدن منافذ و کاهش نفوذ پذیری آب به داخل روسازی یا خروج آب از لایه‌های زیرین روسازی می‌شود (Marten et al., 2022). ابوت و متئو کومیکو (Abbot & Comino, 2003) با انجام آزمایش نفوذ پذیری بر روی روسازی بتنی نفوذ پذیر بعد از سه سال از ساخت آن، کاهش ۸۷ درصدی نفوذ پذیری را گزارش کردند. این کاهش نفوذ پذیری منجر به ایجاد جریان آب داخل لایه روسازی بتنی شده و روسازی بتنی نفوذ پذیر را در برابر چرخه ذوب و یخبندان آسیب پذیر می‌کند. این امر نهایتاً عمر مفید روسازی بتنی نفوذ پذیر را کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان با طراحی سازه‌ای مناسب، مکان یابی مناسب و نگهداری دوره‌ای گرفتگی در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر را به حداقل رساند (Wang et al., 2022). به طور مثال، با توجه به مشکلات ناشی از پدیده گرفتگی، استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در خیابان‌های عمومی که همواره در معرض گرفتگی هستند، عملی نمی‌باشد. از جمله مصالحی که منجر به گرفتگی در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر شود، می‌توان به رسوبات مصالح اطراف روسازی مانند ماسه، سیلیت و خاک رس، زباله‌های سطح جاده، خرده لاستیک‌های جدا شده از لاستیک وسایل نقلیه بر اثر سایش با سطح روسازی و پوشش‌های گیاهی در اطراف روسازی اشاره کرد (Ferguson, 2005).

## بررسی اثر استفاده از افزودنی‌های پوزولانی و مصالح بازیافتی

### بر خواص مکانیکی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر

یکی از چالش‌های مدیریتی در سطح شهر، مدیریت پسماند انباشته شده مانند لاستیک، شیشه، انواع پلاستیک و ضایعات حاصل از تخریب ساختمان‌ها و ... می‌باشد. محققان در نقاط مختلف جهان همواره به دنبال راه‌هایی هستند تا با استفاده از پسماندها در بخش مصالح ساختمانی، مخصوصاً در بتن و آسفالت، علاوه بر کمک به مدیریت پسماندها خواص مختلف مصالح مانند خواص مکانیکی مصالح ساختمانی را بهبود ببخشند. بنابراین در این بخش از مقاله سعی شده است تا مطالعات صورت گرفته در مورد استفاده از مصالح بازیافتی در بتن‌های نفوذ پذیر مورد بررسی قرار گیرند.

### خاکستر بادی

مطالعات متعددی در خصوص بتن نفوذ پذیر بدون سیمان و بتن نفوذ پذیر با حجم زیاد خاکستر بادی انجام شده است. تئو و همکاران (Thao et al., 2012) خواص بتن نفوذ پذیر بدون سیمان و حاوی خاکستر بادی ژئوپلیمریزه شده با سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر ذکر شده در محدوده ۵/۴ الی ۱۱/۴ مگاپاسکال و مقاومت خمشی در محدوده ۰/۷ الی ۱/۴ مگاپاسکال بودند. ساتا و همکاران (Sata et al., 2013) در ادامه مطالعه قبل، در کنار استفاده از خاکستر بادی پلیمریزه شده با مقدار کلسیم بالا به عنوان سیمان، از سنگدانه‌های بازیافتی به عنوان سنگدانه مخلوط بتن نفوذ پذیر استفاده کرد. مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر در این مطالعه در محدوده ۲/۹ الی ۱۰/۳ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین، استفاده از متاکائولین (در بازه ۰ الی ۲ درصد) و خاکستر بادی کلاس F (در محدوده ۱ الی ۲۰ درصد) علاوه بر کاهش تخلخل، منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن‌های نفوذ پذیر نیز شد (Saboo et al., 2019). جایگزین کردن ۱۵ الی ۲۵ درصد خاکستر بادی کلاس C با سیمان در بتن نفوذ پذیر، مقاومت فشاری ۶۱ الی ۱۲۰ درصد و مقاومت کششی ۵۷ الی ۹۴/۵ درصد افزایش یافتند اما مقاومت خمشی به اندازه ۱۶ الی ۲۸ درصد کاهش یافت.

### دوده سیلیسی

تحقیقات بر روی بتن‌های متداول نشان می‌دهد که دوده سیلیسی می‌تواند با ایجاد یک ناحیه انتقال سطحی مترامک

(ITZ) و یا بهبود چسبندگی خمیر سیمان، خواص مکانیکی بتن را بهبود دهد (Siddique, 2011). حال با توجه به اینکه مقدار سیمان در بتن‌های نفوذ پذیر در مقایسه با بتن‌های متداول کمتر می‌باشد، ناحیه انتقال سطحی نسبت به بتن‌های متداول کوچکتر بوده و اثر دوده سیلیسی بر این ناحیه در بتن‌های نفوذ پذیر ممکن است کمکی به بهبود مقاومت آن نکند. آکار اوزبک و همکاران (Agar-ozbek et al., 2013) با جایگزین کردن ۱۵ درصد از سیمان با دوده سیلیسی، بهبود جزئی در مقاومت فشاری و کششی بتن‌های نفوذ پذیر حاوی سنگدانه‌های درشت در محدوده ۴ الی ۸ میلیمتر را گزارش کردند. چینچیللاس و همکاران (Chinchillas-Chinchillas et al., 2019) نیز با جایگزین کردن ۱۰ درصد از سیمان با دوده سیلیسی، فاز مترامک‌تری از ناحیه انتقال سطحی مشاهده کردند. اما مانند سایر مطالعات به بهبودی در خواص مکانیکی دست نیافتن. دلیل کلی عدم بهبود خواص مکانیکی بر اثر افزودن دوده سیلیسی در بتن‌های نفوذ پذیر می‌تواند این باشد که، هیدروکسید کلسیم که در واکنش با دوده سیلیسی منجر به افزایش مقاومت در بتن می‌شود، در عمل آوری بتن نفوذ پذیر در زیر آب حل شده و از بین می‌رود. بنابراین نمی‌تواند با دوده سیلیسی واکنش داده و مقاومت بتن نفوذ پذیر را بهبود دهد.

بر خلاف مطالعات فوق، چندین مطالعه تجربی نشان می‌دهند که دوده سیلیسی می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن نفوذ پذیر شود. یانگ و جیانگ (Yang & Jiang, 2003) با بررسی بتن نفوذ پذیر حاوی ۶ درصد دوده سیلیسی، ۰/۸ درصد فوق روان کننده و ۲۰ درصد سنگدانه ریز، حداکثر مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۶ مگاپاسکال را گزارش دادند. در مطالعه‌ای دیگر چن و همکاران (Chen et al., 2013) با بررسی ۱۲ طرح اختلاط بتن نفوذ پذیر حاوی خاکستر بادی کلاس C (با درصدهای ۱۴، ۱۶ و ۱۸ درصد)، دوده سیلیسی (با درصدهای ۶، ۸ و ۱۰ درصد) و فوق روان کننده (با درصدهای ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد) و نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ الی ۰/۳۴، به مقاومت فشاری ۹۰ روزه بیشتر از ۵/۱ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۲۸ روزه بیشتر از ۵/۱ مگاپاسکال رسیدند. همچنین باید توجه داشت که، استفاده از فوق روان کننده در کنار استفاده از دوده سیلیسی در طرح اختلاط بتن‌های نفوذ پذیر به علت کمک به توزیع یکنواخت خمیر سیمان جهت پوشش سنگدانه‌ها و جلوگیری از کلوخه شدن خمیر سیمان ضروری می‌باشد.

فشاری، مقاومت خمشی و مقدار نفوذ پذیری بتن‌های نفوذ پذیر را کاهش می‌دهند (Chinchillas-Chinchillas et al., 2019). به طور کلی مهمترین ویژگی بتن‌های نفوذ پذیر حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، تخلخل و سطح مقاومت در منطقه انتقال سطحی (ITZ) خمیر سیمان می‌باشد. تخلخل در منطقه انتقال سطحی بتن نفوذ پذیر حاوی سنگدانه بازیافتی ۱۹۰ درصد بیشتر از بتن‌های نفوذ پذیر با سنگدانه‌های طبیعی گزارش شده است. با این حال، زیتانک و همکاران (Zaetang et al., 2016) با جایگزین کردن ۲۰ الی ۸۰ درصد از سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی، بهبود مقاومت فشاری و سایشی سطحی در بتن‌های نفوذ پذیر را گزارش کردند. محققان بر این باور هستند که بهبودهای حاصل شده از استفاده سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های نفوذ پذیر می‌تواند به دلیل پیوند بهتر بین خمیر سیمان و سنگدانه‌های بازیافتی باشد. ساتا و همکاران (Sata et al., 2013) در مطالعه‌ای اثر افزودن سنگدانه‌های بازیافتی و خاک رس حاصل از خرد شدن آجر<sup>۱۱</sup> را در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و خاک رس آجر مقاومت فشاری را در حدود ۶ الی ۷۷ درصد و نفوذ پذیری را در حدود ۱۹ الی ۴۰ درصد کاهش می‌دهند. لیو و همکاران (Liu et al., 2019) با بهبود توزیع خمیر سیمان در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی به واسطه عمل‌آوری پلیمری، سعی کردند تا ناحیه اتصال بین سنگدانه‌ها را مورد بررسی قرار دهند. نتایج این مطالعه بهبود ۳۲ الی ۱۱۴ درصدی مقاومت فشاری و ثابت ماندن نفوذ پذیری را نشان دادند.

#### کاربرد افزودنی‌های نانو در بتن نفوذ پذیر

نانو مواد با اندازه ذرات بین ۱ الی ۱۰۰ نانومتر جهت بهبود خواص مکانیکی در بتن‌های متداول توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌است. از جمله نانو موادهای می‌توان به نانو سیلیس، خاک رس و کلسیت اشاره کرد. با توجه به نسبت بالای سطح به حجم نانو موادهای، این مواد همواره از لحاظ شیمیایی بسیار واکنش پذیر می‌باشند و می‌توانند جهت ترویج و رشد هیدرات‌های سیمان، کاتالیزورهای هیدراتاسیون سیمان و بهبود رئولوژی به کار می‌روند (Parveen & Rana & Fangueiro, 2013). نانو الیاف‌ها و نانو لوله‌های کربنی با نسبت ابعاد بالا و مدول بالا به افزایش سختی بتن‌های نفوذ پذیر می‌شوند. همچنین این مواد با قرار گرفتن در نقش تقویت کننده، می‌توانند خواص مکانیکی بتن نفوذ پذیر را افزایش دهند

علاوه بر این استفاده بیش از ۱۰ درصد از دوده سیلیسی به صورت جایگزین سیمان در طرح اختلاط بتن نفوذ پذیر منجر به کاهش مقاومت بتن نفوذ پذیر می‌شود (Fu et al., 2004). لیو و همکاران (Liu et al., 2018) با بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر با دانه بندی سنگدانه در محدوده ۴/۷۵ الی ۹/۵ و ۹/۵ الی ۱۶ میلیمتر، نشان دادند که درصد بهینه دوده سیلیسی، فوق روان کننده و محدوده مناسب نسبت آب به سیمان جهت رسیدن به مقاومت ایده‌آل به ترتیب ۵ درصد، ۰/۵ درصد و ۰/۲۶ الی ۰/۳ می‌باشند.

#### سرباره فولاد

سرباره فولاد یکی از محصولات جانبی حاصل از فولاد می‌باشد که به دلیل مقاومت در برابر ضربه و خورد شدن، مقاومت سایشی بالا و اتصال مناسب با مخلوط سیمان، می‌تواند به عنوان جایگزین سنگدانه‌های درشت در بتن نفوذ نپذیر مورد استفاده قرار گیرد. سرباره فولاد بر حسب اندازه به سه دسته: ریز (بین ۲/۵ الی ۵ میلی‌متر)، متوسط (بین ۵ الی ۱۰ میلی‌متر) و درشت (بین ۱۰ الی ۱۵ میلی‌متر) تقسیم می‌شود. سرباره با اندازه متوسط به دلیل ظرفیت اتصال بالا با سیمان می‌تواند به بالاترین مقاومت فشاری در حدود ۴۱/۵ مگاپاسکال برسد و مقاومت خمشی ۸ مگاپاسکال برسد (Lang & Duan & Chen, 2019). وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) با جایگزین کردن سرباره فولاد با ۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های درشت طبیعی در بتن نفوذ پذیر، به بهبود ۳۴ درصدی مقاومت فشاری و ۵۰ درصدی مقاومت خمشی رسیدن، با این حال نفوذ پذیری در بتن نفوذ پذیر در این آزمایش ۱۸ درصد کاهش یافت. چن و همکاران (Chen et al., 2019) با جایگزین کردن ۲۵ درصد سرباره کوره بلند با سیمان به این نتیجه رسیدند که، سرباره کوره بلند مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن نفوذ پذیر را به ترتیب به اندازه ۳۰، ۲۲ و ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. استفاده از مصالح ساختمانی بازیافتی

موضوع استفاده از مصالح ساختمانی بازیافتی به خصوص سنگدانه‌های حاصل از تخریب بتن (سنگدانه‌های بازیافتی) در ساخت بتن‌های جدید، همواره در بین محققان از توجه بالایی برخوردار بوده است (Behera et al., 2014). استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های نفوذپذیر نیز در مطالعات زیادی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. که نتایج این مطالعات عمدتاً نشان می‌دهند که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت

بتن‌های نفوذ پذیر، با طول بین ۱۲ الی ۵۴ میلیمتر بر خواص مکانیکی (مانند تخلخل، نفوذ پذیری، مقاومت فشاری، خمشی و کششی) و دوام (مانند چرخه ذوب و یخبندان و سایش) بتن‌های نفوذ پذیر به این نتیجه رسیدند که این الیافها همواره تاثیر مثبتی بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های نفوذ پذیر می‌گزارند (Rehder & Banh & Neithalath, 2014; Kevern & Biddle & Cao, 2015). با این حال، ماکرو الیاف‌های پلی پروپیلن ممکن است منجر به کاهش نفوذ پذیری بتن‌های نفوذ پذیر شوند. علاوه بر این، رهدار و همکاران (Rehder & Banh & Neithalath, 2014) با مطالعه اثر این الیافها بر خواص شکست بتن‌های نفوذ پذیر. دریافتند که این الیافها تاثیری بر چقرمگی شکست بتن‌های نفوذ پذیر نداشته و چقرمگی شکست در بتن‌های نفوذ پذیر همانطور که قبلا هم اشاره شد، توسط تخلخل در بتن‌های نفوذ پذیر کنترل می‌شود. با توجه به اینکه استفاده از الیاف‌های طبیعی در بتن‌های نفوذ پذیر رایج نمی‌باشد اما مطالعاتی در این زمینه انجام شده است. بطور مثال، در مطالعه‌ای اثر الیاف‌های سلولوزی بر خواص مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این مطالعه تاثیر مثبت الیاف‌های سلولوزی بر خواص مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر را نشان دادند (Amde & Rogge, 2013). یکی دیگر از الیاف‌های مورد استفاده در بتن‌های نفوذ پذیر الیاف حاصل از بازیافت ضایعات کامپوزیت‌های فیبری کربن می‌باشد. این ضایعات ابتدا به واسطه چکش در ظرفی بزرگ آسیاب شده و بعد از تبدیل به حالت رشته‌ای در بتن‌های نفوذ پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۵ انواع این الیافها در سایزهای مختلف و حالت ترکیب ابعاد آن را نشان می‌دهد. این الیافها با طول متوسط ۱۱/۶ میلیمتر در چندین مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است (Rodin et al., 2018; Alshareedah et al., 2019). نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از این الیاف با درصد بین صفر الی ۵/۵ درصد، خواص مکانیکی و دوام بتن‌های نفوذ پذیر را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Rangelov et al., 2016). همچنین بتن‌های نفوذ پذیر تقویت شده با ۴ درصد از فیبرهای کربن ناشی از بازیافت ضایعات کامپوزیت‌های فیبر کربن (شکل ۸) در مقایسه با بتن‌های نفوذ پذیر شاهد، مقاومت کششی و فشاری به ترتیب ۶۴ و ۸۴ بیشتری را کسب کردند. همچنین چقرمگی شکست بتن‌های نفوذ پذیر مسلح شده با این الیافها ۴۱ الی ۵۴ درصد افزایش یافت (Rodin et al., 2018).

(Du et al., 2019). استفاده از نانو موادها به خصوص در بتن‌های نفوذ پذیر می‌توانند مزیت‌های زیادی داشته باشد، زیرا نانوموادها برخلاف ماسه نمی‌توانند فضای خالی در حد ماکرو را در بتن‌های نفوذ پذیر پر کنند بنابراین تاثیر منفی بر نفوذ پذیری بتن‌های نفوذ پذیر نداشته و علاوه بر آن خواص مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر را نیز افزایش می‌دهند.

بطورکلی، مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از نانوموادها در بتن‌های نفوذپذیر تنها تاثیر نانومواد بر روی خواص مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر را مورد بررسی قرار نمی‌دهند بلکه در کنار آن اثرات جانبی مانند تاثیر نانو موادها بر نفوذ پذیری و تصفیه آب بتن‌های نفوذ پذیر را نیز مورد مطالعه قرار می‌دهند. در مطالعه‌ای، ظرفیت بتن‌های نفوذ پذیر حاوی نانوسیلیس با اندازه ۵ الی ۲۰ نانومتر جهت حذف نیترات در آب‌های آلوده مورد بررسی قرار گرفت (Alighardashi & Mehrani & Ramezani pour, 2018). نتایج این مطالعه نشان دادند که ترکیب ۲۰ درصد خاکستر بادی و ۶ درصد نانوسیلیس در کنار عملکرد بهینه حذف نیترات از آب‌های آلوده، حداکثر مقاومت فشاری ۳/۶ مگاپاسکال با درصد فضای خالی ۱۹/۷ درصد و نفوذ پذیری ۱/۰۶ سانتی متر بر ثانیه را به همراه داشت. لیانگ و همکاران (Liang et al., 2019) نشان دادند که افزودن اگرچه منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن نفوذ پذیر می‌شود. اما با ایجاد کلوخه شدگی در ملات بتن‌های نفوذ پذیر، مقدار نفوذ پذیری را تا ۰/۲ سانتی متر بر ثانیه کاهش می‌دهد.

#### روسازی بتنی نفوذ پذیر مسلح شده با الیاف

مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با تاثیر انواع الیافها بر خواص مکانیکی بتن‌های نفوذ پذیر انجام شده است. الیاف‌های فولادی همواره یکی از پرکاربردترین الیافها در بهبود خواص مکانیکی بتن‌ها در مطالعات پیشین معرفی شده‌اند. با این حال، استفاده از الیاف‌های فولادی در بتن‌های نفوذ پذیر به دلیل قرار گرفتن در معرض آب و خطرات بالای ناشی از خوردگی، مناسب نیستند. در مطالعه‌ای ژو و همکاران (Zhu et al., 2020) با استفاده از الیاف‌های فولادی با روکش مس پلی پروپیلن در بتن‌های نفوذ پذیر، بهبود ۱۹ درصدی خواص مقاومت فشاری و ۴۲ درصدی مقاومت خمشی را گزارش کردند. در مطالعات پیشین با بررسی ماکرو الیاف‌های پلی پروپیلن تک رشته‌ای، به عنوان رایج‌ترین الیاف مورد استفاده در



شکل ۵. الیاف‌های بازیافتی حاصل از کامپوزیت‌های فیبر کربن (الف) در ابعاد مختلف و (ب) در نمونه‌های بتن نفوذ پذیر (Rodin et al., 2018)

از بارندگی، بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی، کاهش آلودگی صوتی ناشی از ترافیک، کاهش اثر جزایر گرمایی شهری و افزایش استحکام در برابر لغزش در سطح روسازی از جمله مزایای مهم استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر می‌باشند که در این بخش از مقاله مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. به طور کلی، روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در بسیاری از کشورها به عنوان راهکاری امیدوار کننده جهت شبیه سازی فرآیندهای طبیعی مانند نفوذ، و بهبود زیرساخت‌های سبز مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۶ به طور خلاصه مزیت‌های زیست محیطی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر را نشان می‌دهد.

### مزایای زیست محیطی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر

ارزیابی اثرات زیست محیطی در تمامی شاخه‌های علم عمران از جمله روسازی، خاک و پی، سدسازی و انتقال آب از اهمیت بالایی برخوردار است (Baradaran et al., 2024; Baradan and Ameri, 2023; Ayar et al., 2022; Tareghian et al., 2024; Balighi et al., 2024; Pargar et al., 2024; Baradaran et al., 2023; Yazdi et al., 2024; Pournoori et al., 2024; Niri et al., 2024; Baradaran et al., 2025a; Baradaran and Aliha, 2025; Baradaran and Ziaee, 2025; Nia et al., 2023; Shojamoghadam et al., 2024 کاهش سطح رواناب‌های سطحی و بهبود نفوذ پذیری آب حاصل



شکل ۶. مزایای زیست محیطی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر (Xie & Akin & Shi, 2018)

### عملکرد هدایت هیدرولیکی، کنترل سیلاب و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی

نفوذ پذیر نشان دادند که در نظر گرفتن پارامتر نسبت فضای خالی به تنهایی توانایی تعیین عملکرد هیدرولیکی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر را ندارند و نیاز هست تا پارامتر دیگری در کنار این پارامتر معرفی شود. بنابراین پارامتر تخلخل موثر یا حفره‌های موثر معرفی شدند. حفره‌های موثر در واقع به حفره‌های در بتن‌های نفوذ پذیر گفته می‌شود که آب را از خود عبور می‌دهند (Gruber et al., 2012). ابراهیم و همکاران (Ibrahim et al., 2017) با در نظر گرفتن این پارامتر، رابطه موثرتری را بین نفوذ پذیر و تخلخل ایجاد کردند.

علاوه بر کاهش مقدار رواناب سطحی، استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر می‌تواند کیفیت آب‌های زیرزمینی حاصل از رواناب‌های سطحی را با حذف آلاینده‌ها از طریق مکانیزم‌های مکانیکی و بیولوژیکی بهبود دهد. این نتایج همچنین از طریق آزمایشات آزمایشگاهی نیز تایید شدند. به طور مثال، حصیلیچ و همکاران (Haselbach et al., 2014) در مطالعه‌ای نشان دادند که فلزات مس و روی به طور قابل توجهی از رواناب‌های تصفیه شده توسط روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر حذف شده بودند. همچنین هلمز و همکاران (Holmes et al., 2017) نشان دادند که حذف این فلزات عمدتاً توسط سیمان موجود در بتن‌های نفوذ پذیر شکل گرفته بودند.

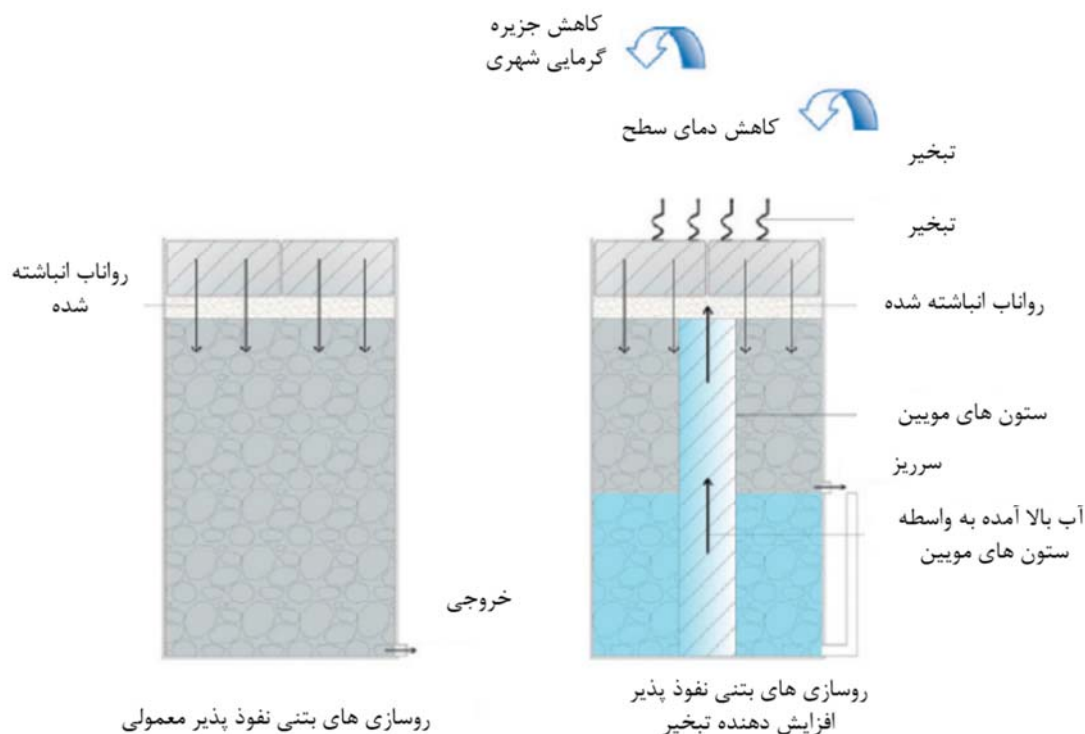
### کاهش اثر جزایر گرمایی و کنترل گرمایش جهانی

ایجاد جزایر گرمایی همواره یکی از مشکلات اساسی جهانی در زمینه گسترش شهری می‌باشد که این پدیده ناشی از ساخت و ساز شهری و فعالیت‌های انسان‌ها می‌باشد. روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به عنوان راهکاری ایده آل برای برطرف کردن این مشکل معرفی شده‌اند (Liu & Borst, 2018). لی و همکاران (Li et al., 2013) در مطالعه‌ای با اندازه‌گیری دمای سطح روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر و روسازی بتنی متداول، به این نتیجه رسیدند که پس از بارندگی، دمای سطح روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر نسبتاً پایین‌تر از روسازی‌های داده‌های هواشناسی و با توجه به شاخص بازتاب خورشید نشان دادند که شاخص بازتاب خورشید برای روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر مقدار ۱۴ بوده در حالیکه این مقدار برای روسازی‌های بتنی معمولی مقدار ۳۷ بود. موسسه LEED مقدار شاخص RSI کمتر از ۲۹ را به عنوان معیاری برای تعیین خنک بودن سطح، مشخص کرد.

هدایت هیدرولیکی که تحت عنوان نفوذ پذیری آب نیز شناخته می‌شود، معیاری جهت ارزیابی جریان آب در محیط‌های متخلخل می‌باشد و پارامتری مهم جهت ارزیابی عملکرد مطلوب بتن‌های نفوذ پذیر می‌باشند. این پارامتر می‌تواند توانایی روسازی نفوذ پذیر جهت کاهش رواناب را نیز بررسی کند. آزمایش‌های نفوذ پذیری اغلب براساس استانداردهای ASTM و در محیط آزمایشگاه و یا در محل انجام می‌شوند. رایج‌ترین نوع آزمایش نفوذ پذیری در آزمایشگاه، آزمایش هد افتان<sup>12</sup> می‌باشد (McCain et al., 2010). در این آزمایش، یک طرف نمونه آب بند شده و مدت زمانی کاهش ارتفاع آب در لوله طرف دیگر نمونه تا سطح نمونه، ثبت می‌شود. سپس زمان ثبت شده در کنار هد فشار شروع و پایان آزمایش جهت محاسبه هدایت هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. چوپرا و همکاران (Chopra et al., 2011) با مقایسه چندین روش آزمایش از جمله روش هد افتان، هد ثابت و تست نفوذ پذیری به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از آزمایشات ذکر شده تا ده برابر کمتر از نتایج واقعی بودند. مطالعات مختلف نقش مهم تخلخل را در عملکرد روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به وضوح نشان می‌دهند. به طور مثال، کاباگیر و یحیا (Kabagire & Yahia, 2016) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که حجم خمیر سیمان به نسبت فضای خالی بین ذرات بیشترین تاثیر را بر روی نفوذ پذیری و مقاومت بتن‌های نفوذ پذیر دارد. همچنین در یک مطالعه میدانی، سیپولا و همکاران (Cipolla et al., 2016) نشان دادند که تراکم بیش از حد می‌تواند باعث کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذ پذیری در بتن‌های نفوذ پذیر شود. شو و همکاران (Shu et al., 2011) نیز در مطالعه‌ای تاثیر مثبت تخلخل بر نفوذ پذیری و تاثیر منفی آن بر مقاومت را نشان دادند. فوا و همکاران (Fwa et al., 2015) با مقایسه روسازی بتنی نفوذ پذیر و روسازی بتن آسفالتی نفوذ پذیر با درصدهای تخلخل ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد نشان دادند که روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر عملکرد نفوذ پذیری بهتری در ابتدای عمر خود در مقایسه با روسازی بتن آسفالتی نفوذ پذیر داشتند و با افزایش درصد تخلخل، بتن‌های نفوذ پذیر عملکرد رفع پدیده گرفتگی بهتری در مقایسه با روسازی‌های بتن آسفالتی نفوذ پذیر داشتند. در سال‌های اخیر، مطالعات صورت گرفته بر روی بتن‌های

سطح روسازی بتنی نفوذ پذیر بتعش خنک نگهداشتن آن‌ها برای مدت زمان ۱۲ الی ۲۴ ساعت در طول روزهای گرم تابستانی می‌شود همچنین اگر سطح این نوع روسازی مرطوب نشود، روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر نمی‌توانند به سطحی خنک در طول روزهای گرم برسند. بنابراین، لیو و همکاران (Liu et al., 2018) در کنار روسازهای بتنی نفوذ پذیر که با توزیع تصادفی حفره‌ها و منافذ تشکیل شده‌اند، روسازی بتنی نفوذ پذیر تحت عنوان "روسازی نفوذ پذیر افزایش دهنده تبخیر" را ارائه دادند. در این مدل روسازی، ستون‌های مویین به صورت عمودی در روسازی به همراه آسترهای در سطح زیرین آن تعبیه می‌شوند (شکل ۷). با این ساختار، روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در طول دوره آزمایش کاهش دمای تا ۹/۴ درجه سانتیگراد را تجربه می‌کنند. علاوه بر این، اثر خنک کنندگی در این نوع روسازی می‌تواند تا بیش از ۷ روز حتی بدون بارندگی باقی بماند.

کین و هیلر (Qin & Hiller, 2016) با توجه به مطالعات میدانی نشان دادند که سطح روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر بسته به شرایط محیطی خاص می‌تواند سردتر و یا گرمتر از سطح روسازی‌های بتنی متداول باشند. حفره‌های موجود در روسازی‌های بتنی همواره به عنوان یکی از مزیت‌های این نوع روسازی جهت مقابله با اثر جزایر گرمایی به شمار می‌روند. بارندگی و یا آبیاری سطح روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر می‌تواند گرمای ذخیره شده در سیستم بتن نفوذ پذیر را کاهش دهد و مسیری را برای عبور رواناب‌های سطحی ایجاد کند. استاندارد بین المللی سازه‌های سبز (IGCC, 2012) بیان می‌کند که برای کاهش اثر جزایر گرمایی، می‌بایست دارای سرعت نفوذ پذیری ۲ گالن در دقیقه در هر فوت مربع یا ۱۰۰ لیتر در دقیقه در هر متر مربع باشند. همچنین آزمایشات میدانی انجام شده توسط کین و هیلر (Qin & Hiller, 2016) نشان می‌دهند که خیساندن



شکل ۷. شماتیک روسازی نفوذ پذیر افزایش دهنده تبخیر و مقایسه با روسازی بتنی نفوذ پذیر معمولی (Liu et al., 2018)

### کاهش آلودگی صوتی

منبع اصلی آلودگی صوتی در محیط می‌باشد (Bernhard et al., 2005). صدای تولید شده توسط ترافیک وسایل نقلیه برای ساکنان مجاور آن محل نیز آزار دهنده بوده و کیفیت زندگی

آلودگی صوتی همواره به عنوان یکی از موضوعات جدی زیست محیطی شناخته می‌شود. اگرچه صدا معمولاً از منابع مختلف تولید می‌شوند، اما مطالعات نشان می‌دهند که ترافیک

### بهبود استحکام در برابر لغزش

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر همواره استحکام لغزشی بالاتری نسبت به روسازی‌های بتنی معمولی دارند (Mc cain et al., 2010; Nguyen et al., 2014). Shaefer et al., 2013). نگوین (Nguyen et al., 2014) در مطالعه‌ای نشان داد که روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر استحکام لغزشی بسیار بالاتری نسبت به همتای غیرقابل نفوذ داشته که باعث ایجاد ایمنی بیشتر رانندگان در حین رانندگی می‌شود. با این حال، هول (۲۰۰۸) با انجام آزمایشی بر روی پارکینگ‌های ایالت پنسیلوانیا که از بتن‌های نفوذ پذیر ساخته شده‌اند با استفاده از آزمون آونگ بریتانیایی (ASTM E303) نشان داد که استحکام لغزشی روسازی بتنی نفوذ پذیر مشابه روسازی آسفالتی متخلخل می‌باشد. همچنین یه و همکاران (Yieh et al., 2015) نشان دادند که استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی خنک شده با هوا به جای شن، علاوه بر بهبود استحکام، استحکام لغزشی و ضریب نفوذ پذیری روسازی بتنی نفوذ پذیر را افزایش می‌دهد.

مطالعات پیشین نشان دادند که بافت سطح روسازی عامل مهمی است که باید برای ارزیابی استحکام لغزشی در نظر گرفته شود (Practico et al., 2012; Li & Harris & Wells, 2016). بافت روسازی می‌تواند به طور قابل توجهی استحکام لغزشی روسازی را بهبود دهد. به طور مثال، بافت ماکرو می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر مقاومت لغزشی روسازی در شرایط سرعت بالا و سطح مرطوب داشته باشد. همچنین بافت میکرو عمدتاً مربوط به اصطحکاک در روسازی‌های با سرعت کم و سطح خشک می‌باشد (Chen & Wang & Zhou, 2013). طبق مطالعات صورت گرفته توسط پراکتیکو (Practico et al., 2017) بافت‌های میکرو مسئول طول موج‌های کمتر از ۰/۵ میلیمتر و بافت‌های ماکرو مربوط به طول موج‌های در محدوده ۰/۵ الی ۵۰ میلیمتر می‌باشند. بافت میکرو به زبری سطح کمک می‌کند که در مقیاس مولکولی با لاستیک ماشین در تعامل بوده و چسبندگی ایجاد می‌کند.

### مروری بر استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در نقاط مختلف جهان

جهت استفاده در بزرگراه‌ها، بتن نفوذ پذیر به عنوان لایه رویه بر روی بتن غیر قابل نفوذ اجرا می‌شود (شکل ۸). در این حالت روسازی حاصله علاوه بر رفع و کاهش صدای ناشی از عبور تایرهای خودرو از سطح روسازی، قابلیت زهکشی نیز پیدا می‌کند کاهش سر و صدا به واسطه قابلیت جذب صدای بتن‌های

ساکنان آن مناطق را پایین می‌آورد (۳۶). همچنین آلودگی صوتی ناشی از ترافیک می‌تواند منجر به ایجاد مشکلات سلامتی مانند اختلال خواب و یا اختلال یادگیری در افراد شود. موارد ذکر شده تقاضا برای جلوگیری از آلودگی صوتی ایجاد شده توسط ترافیک را افزایش می‌دهد. در میان صداهای ناشی از ترافیک، صدای تعامل تایر و روسازی<sup>13</sup> بیشترین تاثیر را بر آلودگی صوتی ناشی از دارد، به ویژه هنگامیکه وسایل نقلیه با سرعت متوسط رو به بالا حرکت می‌کنند (Ohiduzzaman et al., 2016). راه حل‌های مختلفی نظیر نصب موانع صوتی، استفاده از مواد عایق جهت جلوگیری از صدای حاصل از ترافیک مورد استفاده قرار گرفتند، اما استفاده از روش‌های ذکر شده بسیار پر هزینه بودند. بنابراین محققان در سراسر جهان تلاش کردند تا با جایگزین کردن سطوح روسازی با عاملی مناسب صدای ایجاد شده توسط تعامل تایر با روسازی را در منبع آن یعنی سطح روسازی کاهش دهند. استفاده از یک لایه بتن نفوذ پذیر در سطح روسازی بتنی به عنوان راهکاری ایده‌آل جهت برطرف کردن این مشکل، پیشنهاد شد (Neithalath & Weiss & Olek, 2006). مطالعات نشان دادند که سیستم منافذ بتن نفوذ پذیر انرژی صوتی ایجاد شده از تعامل تایر با سطح روسازی را از طریق اصطحکاک جذب کرده و تولید صدای ایجاد شده را به حداقل می‌رساند و صدای حاصل از ترافیک بعد از اجرای روسازی بتنی نفوذ پذیر به مقدار ۴ الی ۸ دسی بل کاهش می‌یابد (Tian et al., 2014). مطالعات تجربی زیادی جهت بررسی کارآمد بودن کنترل آلودگی صوتی توسط روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر انجام شدند. بطور کلی، قابلیت جذب صدا در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به عوامل مختلفی نظیر ضخامت لایه نفوذ پذیر، اندازه سنگدانه‌ها و فضای خالی موجود در لایه بتن نفوذ پذیر بستگی دارد (Arenas & Crocker, 2010). نتایج مطالعات گرهز (Gerharz, 1999) نشان دادند که سنگدانه‌های ۴ الی ۸ میلیمتری برای تولید بتن نفوذ پذیر با هدف جذب صدا مناسب هستند. همچنین پارک و همکاران تاثیر نسبت فضای خالی و درصد سنگدانه‌های بازافتی در جلوگیری از کاهش صدا در بتن‌های نفوذ پذیر را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نسبت بهینه فضای خالی و درصد بهینه استفاده از سنگدانه بازافتی در تولید بتن نفوذ پذیر مقاوم در برابر انتشار صدا به روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر

ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد بیان شد. کیم و لی (Kim & Lee, 2010) با بررسی تاثیر کارایی (روانی) سیمان را بر قابلیت جذب صدای بتن نفوذ پذیر، به این نتیجه رسیدند که کارایی سیمان تأثیری بر خاصیت جذب صدا در بتن نفوذ پذیر ندارد.

پذیر به عنوان لایه رویه روسازی بتنی نفوذ پذیر، می‌بایست تمامی ضوابط مربوط به اصطحکاک و دوام تحت شرایط بارگذاری محیطی خاص رعایت شوند. در ادامه به بررسی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در نقاط مختلف جهان می‌پردازیم.

نفوذ پذیر بوده و لایه زیرین تقویت شده (لایه بتن غیرقابل نفوذ) در این روسازی منجر به بهبود استحکام و دوام آن می‌شود (Sandberg & Eismont, 2002). لازم به ذکر است که به منظور دستیابی به طراحی موفق و استفاده بهینه از رویه نفوذ

|                            |                      |                     |
|----------------------------|----------------------|---------------------|
| بتن نفوذ پذیر              | ۱۵ الی ۳۵ درصد تخلخل | ۱۰۰ الی ۳۰۰ میلیمتر |
| زیراساس (سنگدانه های درشت) | ۲۰ الی ۴۰ درصد تخلخل | ۱۵۰ الی ۳۰۰ میلیمتر |
| بستر روسازی (خاک)          | ۵ الی ۲۰ درصد تخلخل  | ژئوتکستایل          |

شکل ۸. شماتیک مقطع عرضی رویه بتنی نفوذ پذیر اجرا شده بر روی بتن غیرقابل نفوذ (Zhong & Leng & Poon, 2018)

گرفت و آب باران جذب شده به سرعت به محیط‌های اطراف روسازی انتقال یافتند. این امر همچنین از فرآیند پاشش رواناب‌های سطحی که یکی از عوامل تصادفات جاده‌ای می‌باشد نیز جلوگیری نمود. در ایالت فلوریدا نیز با اجرای رویه بتن نفوذ پذیر در شانه راه، این روسازی به مدت یکسال از نظر سایش و مدیریت سیلاب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که میانگین سرعت نفوذ آب در طول یکسال بیش از ۱/۵ اینچ در ساعت بوده و همچنین سایشی به صورت بصری در سطح رویه بتنی نفوذ پذیر مشاهده نشد.

### ژاپن

استفاده از بتن متخلخل به عنوان لایه رویه روسازی راه‌ها یکی از متداولترین کاربردهای بتن نفوذ پذیر در ژاپن می‌باشد (Kaijo et al., 1998). بر اساس سیاست فعلی، به دلیل بهبود ایمنی و راحتی در رانندگی تلاش شده تا تمام روسازی‌های راه موجود در ژاپن با سیستم نفوذ پذیر جایگزین شود. رویه‌های بتنی نفوذ پذیر با ضخامت نازک به عنوان یکی از کاربردی‌ترین گزینه‌ها برای تغییر روسازی بتنی معمولی به روسازی بتنی نفوذ پذیر می‌باشند. آزمایشات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بتن نفوذ پذیر در برابر شیار شدگی و مقاومت در برابر سایش تیره‌ها نسبت به آسفالت متخلخل عملکرد بهتری دارد. محققان ژاپنی با آزمایش دو مقطع بتن نفوذ پذیر با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر نشان دادند که در مقایسه با روسازی آسفالتی متراکم، روسازی بتنی نفوذ پذیر کاهش نریز ۶ الی ۸ دسی بل در سطوح خشک و ۴ الی ۸ دسی بل در سطوح مرطوب را ثبت کرد. لازم به ذکر است

### ایالات متحده آمریکا

بتن‌های نفوذ پذیر در ایالات متحده آمریکا به عنوان ابزاری برای مدیریت سیلاب‌ها استفاده می‌شود (Zhang et al., 2023). در حال حاضر در برخی از پارکینگ‌ها و مسیرها و جاده‌های کم حجم برخی از ایالت‌های آمریکا از رویه بتنی نفوذ پذیر جهت کنترل رواناب‌های سطحی و سیلاب‌ها استفاده می‌شود (Prakash et al., 2023). گود و حصلیچ (Goede & Haselbach, 2012) با بررسی داده‌های ۲۰ ساله مربوط به دو خیابان جمع‌کننده دارای روسازی بتنی نفوذ پذیر و با استفاده از شاخص ...، نشان دادند که بتن نفوذ پذیر با طراحی مناسب می‌تواند عملکرد سازه‌ای مطلوبی در طول عمر طراحی معمول روسازی (۲۰ تا ۳۰ سال) داشته باشد. در حالیکه روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر برای برای تاسیسات کم حجم استفاده می‌شوند، استفاده از این نوع روسازی به عنوان یک لایه سازه‌ای در سایر موارد نیز امکان پذیر می‌باشد. محققان در دانشگاه ایالتی آیووا با انجام پروژه‌ای در زمینه طرح مخلوط بتن‌های نفوذ پذیر مقاوم در برابر چرخه ذوب و یخبندان، به این نتیجه رسیدند که می‌توان با ترکیب کمی از ماسه ریزدانه با لاتکس پیوند بین ذرات را بهبود بخشید که در نهایت می‌تواند منجر به ایجاد یک طرح اختلاط بتن نفوذ پذیر مقاوم در برابر چرخه ذوب و یخبندان شود (Schaefer & Wang, 2006). همچنین در مطالعه‌ای دیگر که با همکاری دانشگاه ایالتی آیووا و دپارتمان حمل و نقل مینه سوتا بر روی بتن‌های نفوذ پذیر به عنوان لایه رویه روسازی‌های بتنی در مدت سه سال صورت گرفت. نتایج نشان دادند که در طول بارندگی، فرایند نفوذ پذیری به صورت مطلوب صورت

سیستم‌های زهکشی معمولی قادر به جذب، نگهداری و یا تصفیه آب برای رفع کمبود آب و یا جلوگیری از آلودگی و کاهش آب‌های زیرزمینی نبودند (Ning et al., 2017). بنابراین محققان چینی جهت مدیریت سیلاب‌های موجود و تصفیه و استفاده مجدد از آن‌ها مفهوم "شهر اسفنجی"<sup>14</sup> را ارائه کردند (Wang & Sun & Song, 2017). روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر جهت دستیابی به این هدف کمک قابل توجهی به محققان چینی کردند و در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ در چندین پروژه آزمایشی از بتن‌های نفوذ پذیر به عنوان روسازی مورد استفاده شده در این طرح استفاده شد. همچنین چن و همکاران (Chen et al., 2010) با انجام مطالعه‌ای در مورد زمان بهینه اجرای لایه رویه در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر، به این نتیجه رسیدند که لایه رویه که از جنس بتن نفوذ پذیر می‌باشد برای پیوند بهتر با لایه زیرین که از جنس بتن غیرقابل نفوذ می‌باشد، بهتر است پس از گیرش اولیه لایه زیرین اجرا شود.

#### ۵- نتیجه گیری

بتن‌های نفوذ پذیر به دلیل تاثیرات زیست محیطی، توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است. در این مقاله، به مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از بتن‌های نفوذ پذیر به عنوان جایگزین روسازی‌های بتنی متداول، مزایای زیست محیطی آن، طراحی و ساخت و نگهداری این نوع روسازی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات انجام شده نشان دادند که مشخصات ساختاری منافذ تشکیل دهنده بتن نفوذ پذیر بیشترین تاثیر را بر عملکرد مکانیکی، هیدرولیکی و دوام روازی‌های بتنی نفوذ پذیر دارند. همچنین مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده موفق از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در شبکه راه‌های با حجم ترافیک عبوری سبک انجام شده است که نشان می‌دهد، می‌توان با ترکیب طراحی بهبود یافته و تقویت روسازی بتنی نفوذ پذیر با عوامل مختلف مانند مصالح بازیافتی یا الیاف‌های مختلف، که به طور جامع در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، این نوع روسازی‌ها را در شبکه راه‌های با ترافیک عبوری متوسط و یا سنگین به کار برد. علاوه بر این، روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر از مزایای زیست محیطی زیادی نیز برخوردار هستند. این نوع روسازی به واسطه منافذی که دارند، به مدیریت سیلاب‌های سطح روسازی کمک می‌کنند و با تصفیه سیلاب‌ها به تقویت

که این آزمایش در شرایطی انجام شد که سرعت وسایل نقلیه سواری عبوری بین ۴۰ الی ۷۵ کیلومتر بر ساعت بود. همچنین برای مسیرهای که وسایل نقلیه سنگین‌تر از آن عبور می‌کنند، کاهش صدای نویز در سطوح خشک ۴ الی ۸ دسی بل و در سطوح مرطوب ۲ الی ۳ دسی بل گزارش شد (Descorn, 2000).

#### اروپا

محققان با بررسی عملکرد روسازی‌های ساخته شده با بتن‌های نفوذ پذیر در اروپا، پتانسیل بالای این نوع روسازی را در کاهش صدای ناشی از عبور تایر خودروها از سطح روسازی گزارش کردند. به طور مثال در یک دوره بتن نفوذ پذیر به عنوان لایه رویه روسازی در یکی از جاده‌های با حجم بالا در اروپا مورد استفاده قرار گرفت (Schaefer & Wang, 2006). بر اساس مطالعات صورت گرفته، روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر عملکرد مطلوبی در کاهش سر و صدا و کنترل پاشش آب‌های سطح روسازی داشتند و در کنار این موارد از اصطحکاک مطلوب نیز برخوردار بودند. با این حال، دوام پایین این نوع روسازی در فصول سرد سال استفاده گسترده آن را محدود کرد. این مشکل اولین بار در بلژیک شناسایی شد و بعدها با افزودن، افزودنی‌های پلیمری و افزایش درصد سیمان برطرف گردید (Crackler, 2006). در تحقیقی دیگر در بلژیک، کاهش نویز تا ۵ دسی بل به هنگام استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر با تخلخل ۱۹ درصد گزارش شد. با توجه به مشکلات عمده روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر از جمله گرفتگی منافذ، تعمیر و نگهداری زمستانی و سایر مشکلات، اداره بزرگراه فدرال با توجه به اسکن کلی روسازی‌های موجود در اروپا گزارش داد که، تمایل به استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر در این مناطق کم بوده و استفاده از بتن‌های نما (اکسپوز) از استقبال بیشتری برخوردار بوده است (Crackler, 2006).

#### چین

رشد سریع جمعیت در چین در اوایل دهه ۱۹۸۰ و گسترش سطوح غیر قابل نفوذ ناشی از شهرنشینی، باعث شد تا چین با موضوع جدی سیلاب‌های شهری مواجه شود. همچنین

Testing at different scales. *Construction and Building Materials*, 41, 480-490.

-Akand, L., Yang, M., & Gao. Z. (2016).

Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. *Construction and Building Materials*, 114, 547-555.

-Alghardashi, A., Mehrani, M. J., & Ramezaniapour, A. M. (2018). Pervious concrete reactive barrier containing nano-silica for nitrate removal from contaminated water. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 29481-29492.

-AlShareedah, O., & Nassiri, S. (2019). Methodology for mechanistic design of pervious concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 04019012.

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

-AlShareedah, O., Nassiri, S., & Dolan, J. D. (2019). Pervious concrete under flexural fatigue loading: Performance evaluation and model development. *Construction and Building Materials*, 207, 17-27.

-AlShareedah, O., Nassiri, S., Chen, Z., Englund, K., Li, H., & Fakron, O. (2019). Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00231.

-AM, A., & Rogge, S. (2013). Development of high quality pervious concrete specifications for Maryland conditions (No. MD-13-SP009B4F). Maryland. *State Highway Administration*.

-AM, A., & Rogge, S. (2013). Development of high quality pervious concrete specifications for Maryland conditions (No. MD-13-SP009B4F). Maryland. *State Highway Administration*.

-American Concrete Institute (2013). Concrete Technology, ACI CT-13, 78.

-Anastasiou, E.K., Liapis, A. and Papachristoforou, M., (2017). Life Cycle Assessment of concrete products for special applications containing EAF slag. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 469-476.

آب‌های زیرزمینی کمک می‌کنند. همچنین استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به تقویت استحکام لغزشی، کاهش آلودگی صوتی ترافیک و کاهش جزایر گرمایی در سطح شهر کمک می‌کنند. با این حال همچنان مشکلات زیادی وجود دارد که مانع از گسترش استفاده از روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر می‌شوند و نیاز هست تا تحقیقات بیشتری در زمینه‌های طرح مخلوط بتن نفوذ پذیر با عملکرد بالا، مدلسازی‌های رفتار مکانیکی و هیدرولیکی و ارزیابی میدانی بلند مدت عملکرد فیزیکی روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر اجرا شده انجام شود تا بتوان به استانداردی مناسب در این زمینه دست یافت. با برطرف کردن این شکاف‌های تحقیقاتی می‌توان به توسعه اجرای روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر به عنوان یک سیستم روسازی پایدار با دو عملکرد سازه‌ای و زهکشی جهت توسعه زیرساخت‌های سبز کمک کرد.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Water Reduce Admixtures
2. Hydration Stabilizer Admixture
3. Viscosity Modify Admixture
4. Prewetted Light Weight Aggregates
5. Image Processing
6. Scanning Electron Microscopy
7. Fracture Toughness
8. Acoustic Absorption Coefficient
9. Flat-Panel Scintillator
10. Interfacial Transition Zone (Itz)
11. Crushed Clay Brick
12. Failing Head
13. Tire-Pavement Interaction Zone
14. Sponge City

#### ۷- مراجع

- Abbott, C. L., & Comino-Mateos, L. (2003). In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system. *Water and Environment Journal*, 17(3), 187-190.
- ACI 522-R10, (2010). Report on Pervious Concrete, Farmington Hills, MI.
- ACI Committee 522, Report on Pervious Concrete (ACI 522-R10), (2010). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 42.
- Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E., & Van Breugel, K. (2013). Investigating porous concrete with improved strength:

- Bariş, K. E., & Tanaçan, L. (2017). Earth of Datca: Development of pozzolanic activity with steam curing. *Construction and Building Materials*, 139, 212-220.
- Barnhouse, P. W., & Srubar III, W. V. (2016). Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete.
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.
- Bernhard, R., Wayson, R. L., Haddock, J., Neithalath, N., El-Aassar, A., Olek, J., & Weiss, W. J. (2005). An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement. *Institute of Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University*, 26.
- Bhutta, M. A. R., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 31, 67-73.
- Bordelon, A. C., & Roesler, J. R. (2014). Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography. *Cement and Concrete Composites*, 53, 35-43.
- Cackler, E. T. (2006). *Evaluation of US and European Concrete Pavement Noise Reduction Materials*. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and building materials*, 111, 262-274.
- Chen, X., Wang, H., Najm, H., Venkitekela, G., & Hencken, J. (2019). Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117714.
- Chen, Y., Wang, K. J., & Zhou, W. F. (2013). Evaluation of surface textures and skid resistance of pervious concrete pavement. *Journal of Central South University*, 20, 520-527.
- Chen, Y., Wang, K., Wang, X., & Zhou, W. (2013). Strength, fracture and fatigue of
- Arenas, J. P., & Crocker, M. J. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, 44(7), 12-18.
- 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.
- Balighi, M., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. (2024). Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
- Baradaran, M. S., Aftabi Sani, A., & Abrishami, S. (2024). Application of Differential Transform Method for Solving Free-Surface Seepage Problem of One-Dimensional Porous Media. *Ferdowsi Civil Engineering*, 37(1), 1-18.
- 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.
- 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., & 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., 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.
- 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.

- Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2020). Pervious concrete as an alternative pavement strategy: A state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1516-1531.
- Delatte, N., Mrkajic, A., & Miller, D. I. (2009). Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2113(1), 132-139.
- Deo, O., & Neithalath, N. (2010). Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. *Materials Science and Engineering: A*, 528(1), 402-412.
- Descornet, G. (2000). FEHRL Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads. In *Concluding Workshop. Executive Summary. BRRC (BE) Nantes*.
- Dong, Q., Wu, H., Huang, B., Shu, X., & Wang, K. (2013). Investigation into laboratory abrasion test methods for pervious concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 886-892.
- Du, S., Wu, J., AlShareedah, O., & Shi, X. (2019). Nanotechnology in cement-based materials: A review of durability, modeling, and advanced characterization. *Nanomaterials*, 9(9), 1213.
- Eisenberg, B., Lindow, K. C., & Smith, D. R. (Eds.). (2015). Permeable pavements. Reston, VA, USA. *American Society of Civil Engineers*.
- Elango, K. S., & Revathi, V. (2017). Fal-G binder pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 91-99.
- Federal Water Pollution Control Act (33 U.S.C. 1251 et seq.) November 27th, 2002. 234.
- Ferguson, B.K., 2005. Porous pavements. Boca Raton, FL. *CRC Press*.
- FHWA, Federal Highway Administration. (2011). Highway traffic noise: *Analysis and Abatement Guidance*.
- Fu, T. C., Yeih, W., Chang, J. J., & Huang, R. (2014). The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 963971.
- Fwa, T. F., Lim, E., & Tan, K. H. (2015). Comparison of permeability and clogging characteristics of porous asphalt and pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 97-104.
- Chen, Y., Zhang, Q. S., & Gao, Y. (2010). Experiment on mechanical performances of porous cement concrete applied to surface layer of highway pavement. *China J. Highway Transport*, 23(2), 18-24
- Chinchillas-Chinchillas, M. J., Rosas-Casarez, C. A., Arredondo-Rea, S. P., Gómez-Soberón, J. M., & Corral-Higuera, R. (2019). SEM image analysis in permeable recycled concretes with silica fume. A quantitative comparison of porosity and the ITZ. *Materials*, 12(13), 2201.
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., & Wanielista, M. (2010). Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 426-433.
- Chopra, M., Wanielista, M., Stuart, E., Hardin, M., & Uju, I. (2011). Pervious pavements installation, operations and strength part 2: *Porous Asphalt Systems*.
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). Experimental infiltration tests on existing permeable pavement surfaces. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 44(1), 89-95.
- Construction and Building Materials*, 110, 89-97.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 69-76.
- Coughlin, J. P., Campbell, C. D., & Mays, D. C. (2012). Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 68-73.
- Crouch, L. K., Cates, M. A., Dotson Jr, V. J., Honeycutt, K. R., & Badoe, D. A. (2003). Measuring the effective air void content of Portland cement pervious pavements. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 25(1), 1-5.
- Dai, Z., Li, H., Zhao, W., Wang, X., Wang, H., Zhou, H., & Yang, B. (2020). Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, 233, 117178.

- aggregates. *Construction and Building Materials*, 253, 119251.
- Ibrahim, H. A., Razak, H. A., & Abutaha, F. (2017). Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method. *Construction and Building Materials*, 147, 576-587.
- Jiao, K., Chen, C., Li, L., Shi, X., & Wang, Y. (2020). Compression Fatigue Properties of Pervious Concrete. *ACI Materials Journal*, 117(2).
- Kabagire, K. D., & Yahia, A. (2016). Modelling the properties of pervious concrete using a full-factorial design. *Road Materials and Pavement Design*, 1-17.
- Kajio, S., Tanaka, S., Tomita, R., Noda, E., & Hashimoto, S. (1998, September). Properties of porous concrete with high strength. In *Proceedings 8th International Symposium on Concrete Roads*, Lisbon, Portugal. 171-177.
- Kamboozia, N., Salimi, A., & Dolati, H. (2024). Evaluation of widely used concrete self-healing methods for use in road infrastructure: A review. *Road*. doi:10.22034/ROAD.2024.452179.2274
- Kevern, J. T., & Nowasell, Q. C. (2018). Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 161, 229-235.
- Kevern, J. T., Biddle, D., & Cao, Q. (2015). Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 06014031.
- Kevern, J. T., King, G. W., & Bruetsch, A. P., 2011. Pervious 1207 concrete surface characterization to reduce slip-related falls. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4), 526-531.
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233.
- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2010). Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. *Applied Acoustics*, 71(7), 607-615.
- Kuang X., Sansalone J., Ying G., Ranieri V. 2011. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. *Journal of Hydrology*. 399. 148– 157.
- concrete pavement materials. *Transportation Research Record*, 2511(1), 72-80.
- Gerharz, B. (1999). Pavements on the base of polymer-modified drainage concrete. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 152(1-2), 205-209.
- Gesoglu, M., Guneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24.
- Goede, W., & Haselbach, L. (2012). Investigation into the structural performance of pervious concrete. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 98-104.
- Gruber, I., Zinovik, I., Holzer, L., Flisch, A., & Poulikakos, L. D. (2012). A computational study of the effect of structural anisotropy of porous asphalt on hydraulic conductivity. *Construction and Building Materials*, 36, 66-77.
- Haselbach, L. M. (2010). Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(1), 67-69.
- Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. T., & Schaefer, V. R. (2011). Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. *Transportation Research Record*, 2240(1), 107-115.
- Haselbach, L., Poor, C., & Tilson, J. (2014). Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 652-657.
- Holmes, R. R., Hart, M. L., & Kevern, J. T. (2017). Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete. *Journal of Contaminant Hydrology*, 196, 52-61.
- Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Patibandla, V. C. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 524-529.
- Ibrahim, H. A., Goh, Y., Ng, Z. A., Yap, S. P., Mo, K. H., Yuen, C. W., & Abutaha, F. (2020). Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as

- & Rodrigues, M. M. (2023). Mechanical and Environmental Performance of Asphalt Concrete with High Amounts of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Use in Surface Courses of Pavements. *Sustainability*, 16(1), 248-249.
- McCain, G. N., Suozzo, M. J., & Dewoolkar, M. M. (2010). A Laboratory Study on the Effects of Winter Surface Applications on the Hydraulic Conductivity of Porous Concrete Pavements 2. In *Transportation Research Board 2010 Annual Meeting CDROM, Washington, United States*.
- Merten, F. R. M., Dutra, V. F. P., Strieder, H. L., & Graeff, A. G. (2022). Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 342, 127939.
- Montes, F., Valavala, S., & Haselbach, L. M. (2005). *A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete*, Vol. 2, No. 1. ASTM International.
- Nassiri, S. (2020). *Development of Protocol to Maintain Winter Mobility of Different Classes of Pervious Concrete Pavement Based on Porosity*
- Nassiri, S., & AlShareedah, O. (2017). Preliminary procedure for structural design of pervious concrete pavements (No. WA-RD 868.2). *Washington (State)*. Dept. of Transportation. Research Office.
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M. S., & Deo, O. (2010). Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials characterization*, 61(8), 802-813.
- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, 73, 271-282.
- 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).
- Ning, Y. F., Dong, W. Y., Lin, L. S., & Zhang, Q. (2017, March). Analyzing the causes of urban waterlogging and sponge city technology in China. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 59, No. 1, 012047. *IOP Publishing*.
- Lang, L., Duan, H., & Chen, B. (2019). Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, 209, 95-104
- Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., & Kayhanian, M. (2013). Corrigendum: The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters*, 8(4).
- Li, S., Harris, D., & Wells, T. (2016). Surface texture and friction characteristics of diamond-ground concrete and asphalt pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5), 475-482.
- Li, T., Tang, X., Xia, J., Gong, G., Xu, Y., & Li, M. (2024). Investigation of mechanical strength, permeability, durability and environmental effects of pervious concrete from travertine waste material. *Construction and Building Materials*, 426, 136175.
- Lian, C., and Zhuge, Y., 2010. Optimum mix design of enhanced permeable concrete an experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 24, 2664–2671.
- Liang, X., Cui, S., Li, H., Abdelhady, A., Wang, H., & Zhou, H. (2019). Removal effect on stormwater runoff pollution of porous concrete treated with nanometer titanium dioxide. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 34-45.
- Liu, J., & Borst, M. (2018). Performances of metal concentrations from three permeable pavement infiltrates. *Water Research*, 136, 41-53.
- Liu, R., Liu, H., Sha, F., Yang, H., Zhang, Q., Shi, S., & Zheng, Z. (2018). Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes. *Processes*, 6(7), 78
- Liu, T., Wang, Z., Zou, D., Zhou, A., & Du, J. (2019). Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*, 122, 72-82.
- Liu, Y., Li, T., & Peng, H. (2018). A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Science of the Total Environment*, 634, 1119-1125.
- Martinho, F. C., Silva, H. M., Oliveira, J. R., Moura, C. F., Loureiro, C. D., Silvestre, J. D.,

- Rodin III, H., Nassiri, S., AlShareedah, O., Yekkalar, M., & Haselbach, L. (2021). Evaluation of skid resistance of pervious concrete slabs under various winter conditions for driver and pedestrian users. *Road Materials and Pavement Design*, 22(6), 1350-1368.
- Rodin III, H., Rangelov, M., Nassiri, S., & Englund, K. (2018). Enhancing mechanical properties of pervious concrete using carbon fiber composite reinforcement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 04018012.
- Saboo, N., Shivhare, S., Kori, K. K., & Chandrappa, A. K. (2019). Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, 223, 322-328.
- 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 fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, e03369. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03369>.
- Sandberg, U., & Ejsmont, J. (2002). Tyre/road noise. Reference book
- Sandoval, G. F., de Moura, A. C., Jussiani, E. I., Andrello, A. C., & Toralles, B. M. (2020). Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. *Construction and Building Materials*, 248, 118672.
- Sandoval, G. F., Pieralisi, R., de Souza Risson, K. D. B., de Moura, A. C., & Toralles, B. M. (2022). Clogging phenomenon in Pervious Concrete (PC): A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132579
- Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 42, 33-39.
- Schaefer, V. R., & Wang, K. (2006). Mix design development for pervious concrete in cold weather climates (No. 2006-01). Iowa. Dept. of Transportation. *Highway Division*.
- Schaefer, V.R. and Kevern, J.T., 2013. "Installation and Maintenance Considerations for Improved Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete," ASCE 10<sup>th</sup> International Symposium on Cold Regions Development,
- Niri, S. R., Akhtarpour, A., Daliri, F., & Baradaran, M. S. (2024). Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja).
- Ohiduzzaman, M. D., Sirin, O., Kassem, E., & Rochat, J. L. (2016). State-of-the-art review on sustainable design and construction of quieter pavements—Part 1: traffic noise measurement and abatement techniques. *Sustainability*, 8(8), 742.
- Pargar, J., Akhtarpour, A., & Baradaran, M. S. (2024). An Unsaturated Soil Mechanics-Based Numerical and Experimental Method to Assess Soil Settlement Due to Ground Water Level Rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1-26.
- Parveen, S., Rana, S., & Fanguero, R. (2013). A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites. *Journal of Nanomaterials*, 2013(1), 710175.
- Pournoori, P., Davarpanah TQ, A., Rajaei, A., Ghodrathnama, M., Abrishami, S., & Masoodi, A. R. (2024). Experimental exploration of fracture behavior (pure mode III) in co-friendly steel fiber-reinforced self-compacting concrete with waste tempered glass as coarse aggregates. *Scientific Reports*, 14(1), 9043.
- Prakash, R. J., Soundara, B., Elango, K. S., & Johnson, S. C. (2023). Performance Evaluation of Fibre Reinforced Pervious Concrete Pavement. *Revista Romana de Materiale*, 53(3), 237-247
- Praticò, F. G., & Astolfi, A. (2017). A new and simplified approach to assess the pavement surface micro-and macrotecture. *Construction and Building Materials*, 148, 476-483.
- Qin, Y., & Hiller, J. E. (2016). Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 111, 77-84.
- Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L., & Englund, K. (2016). Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 875-885
- Rehder, B., Banh, K., & Neithalath, N. (2014). Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 118, 1-16.

- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). Pervious concrete pavements (Vol. 8). Skokie, IL. *Portland Cement Association*.
- Tho-In, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., & Jaturapitakkul, C. (2012). Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 366-371.
- Tian, B., Liu, Y., Niu, K., Li, S., Xie, J., & Li, X. (2014). Reduction of tire-pavement noise by porous concrete pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 233-239.
- Usepa, S. (1999). Stormwater technology fact sheet: Porous pavement. *US Environmental Protection Agency, Washington DC*.
- Wang, G., Chen, X., Dong, Q., Yuan, J., & Hong, Q. (2020). Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121208.
- Wang, K., Schaefer, V. R., & Suleiman, M. T. (2008). Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability.
- Wang, X., Wang, Y., Ge, X., Tong, B., Schaefer, V., Wang, K., & Li, C. (2022). The quantitative assessment of clogging and cleaning effects on the permeability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 335, 127455.
- Wang, Y., Sun, M., & Song, B. (2017). Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 11-20.
- Wang, Y., Sun, M., & Song, B. (2017). Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 11-20.
- Weiss, P. T., Kayhanian, M., Gulliver, J. S., & Khazanovich, L. (2017). Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-20.
- Wu, H., Liu, Z., Sun, B., & Yin, J. (2016). Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). *Construction and Building Materials*, 117, 63-71.
- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of cleaner*
- Anchorage, AK, June 2-5, 2013, 12 pgs, CD-ROM.
- Shen, P., Lu, J. X., Zheng, H., Liu, S., & Poon, C. S. (2021). Conceptual design and performance evaluation of high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 269, 121342
- Shojamoghadam, S., Rajaei, A., & Abrishami, S. (2024). Impact of various additives and their combinations on the consolidation characteristics of clayey soil. *Scientific Reports*, 14(1), 31907.
- Shu X, Huang BS, Wu H, Dong Q, and Burdette EG., 2011, Performance Comparison of Laboratory and Field Produced Permeable Concrete Mixtures. *Construction and Building Materials*, 25, 3187-3192.
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932.
- Singh, A., Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2024). Evolution of Sustainable and Resilient Pervious Concrete Pavement Technologies in India. *Transportation in Developing Economies*, 10(1), 5.
- Sonebi, M., & Bassuoni, M. T. (2013). Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. *Construction and Building Materials*, 38, 147-154.
- Sun, Z., Lin, X., & Vollpracht, A. (2018). Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Construction and Building Materials*, 189, 797-803.
- Taheri, B. M., Ramezani-pour, A. M., Sabokpa, S., & Gapele, M. (2021). Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete. *Journal of Building Engineering*, 33, 101617
- Tan, Y., Zhou, C., Zhong, C., & Zhou, J. (2023). Freeze-thaw and thermal cycle durability of pervious concrete with different aggregate sizes and water-cement ratios. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2), 2021405.
- Tareghian, B., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. (2024). The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(1), 11.

- flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. *Construction and Building Materials*, 161, 468-478.
- Zhang, Z., Montas, H., Shirmohammadi, A., Leisnham, P. T., & Rockler, A. K. (2023). Modeling Spatio-Temporal Dynamics of BMPs Adoption for Stormwater Management in Urban Areas. *Water*, 15(14), 2549
- Zhong, R., & Wille, K. (2015). Material design and characterization of high-performance pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 51-60.
- Zhong, R., & Wille, K. (2016). Compression response of normal and high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 109, 177-187.
- Zhong, R., & Wille, K. (2016). Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70, 130-138.
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C. S. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544-553.
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C. S. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544-553.
- Zhong, R., Xu, M., Netto, R. V., & Wille, K. (2016). Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. *Construction and Building Materials*, 125, 1158-1168.
- Zhu, H., Wen, C., Wang, Z., & Li, L. (2020). Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers. *Materials*, 13(2), 321-322.
- production*, 210, 1605-1621. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134**
- Xu, Y., Jin, R., Hu, L., Li, B., Chen, W., Shen, J., & Fang, J. (2020). Studying the mix design and investigating the photocatalytic performance of pervious concrete containing TiO<sub>2</sub>-Soaked recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119281.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and concrete research*, 33(3), 381-386.
- Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M., & Baradaran, M. S. (2024). Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(3), 1008-1031.
- Yeih, W., Fu, T. C., Chang, J. J., & Huang, R. (2015). Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, 93, 737-745.
- Yong, C. F., D. T. McCarthy, and A. Deletic. (2013). Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *Journal of Hydrology*, 481, 48-55.
- Yu, F., Sun, D., Hu, M., & Wang, J. (2019). Study on the pore's characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images. *Construction and Building Materials*, 200, 687-702.
- Yu, F., Sun, D., Wang, J., & Hu, M. (2019). Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 463-475.
- Zaetang, Y., Sata, V., Wongsang, A., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15-21.
- Zhang, J., Ma, G., Ming, R., Cui, X., Li, L., & Xu, H. (2018). Numerical study on seepage

# **A Review of the Use of Permeable Concrete as Road Pavement: Evaluation of Physical, Mechanical Properties, Durability and Environmental Benefits**

*Amir Salimi, M.Sc., Grad., Department of Highway and Transportation Engineering  
School of Civil engineering Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Seyed Ali Ziaee, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*E-mail: sa-ziaee@um.ac.ir*

Received: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

The rapid expansion of urbanization, coupled with the conversion of agricultural land to residential areas and the increasing incidence of urban flooding, has posed significant challenges for surface runoff management in road pavements. Utilizing permeable concrete as the top layer of permeable pavements presents an effective solution to these issues. Over the past decade, permeable concrete pavements have garnered considerable attention within environmentally friendly pavement design systems due to their numerous ecological benefits, including flood mitigation, enhancement of groundwater quality and quantity, and reduction of noise pollution caused by traffic. This study aims to introduce the principles of permeable concrete while exploring its application as the top layer of road pavements. The focus is on optimizing the overall performance of permeable pavements while preserving their mechanical properties and durability. Additionally, various aspects of maintenance for this type of pavement will be investigated. In general, this review article seeks to provide practical insights into the advantages of employing permeable concrete pavements as a viable alternative to conventional concrete pavements.

**Keywords:** Permeable Concrete, Permeable Concrete Pavement, Mechanical Properties, Durability