ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR بر بهبود خواص مکانیکی بتن متخلخل

ماکان پدرام، دانشجوی دکتری، گرایش سازه، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان
رحمت مدندوست، استاد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت
مهیار عربانی*، استاد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

Email: arabani@guilan.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۰/۰۹/۲۵ – پذیرش: ۱٤۰۰/۱۱/۰۸

چکیده

با توجه به نفوذپذیری زیاد بتن متخلخل، استفاده از آن به عنوان لایه فوقانی در روسازی راه و فرودگاه می‌تواند کمک شایانی به هدایت بارندگی‌های شدید، مدیریت آب‌های سطحی و جمع‌آوری آنها نماید. بررسی‌ها نشان می‌دهند که علی‌رغم این مزیت مهم، به‌دلیل مشخصات مکانیکی نازل‌تر این نوع بتن نسبت به بتن معمولی، استفاده از آن به صورت گسترده رواج نیافته است. به منظور ارتقای خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل، در این تحقیق، به ارزیابی میزان تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR به صورت مجزا و همزمان بر درصد تخلخل، نفوذپذیری، مقاومت فشاری، کششی، خمشی، و چقرمگی شکست بتن متخلخل پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب بتن متخلخل، هر یک به صورت جداگانه، خواص مکانیکی بتن متخلخل بهبود می‌یابد؛ اما از تخلخل آن کاسته می‌شود. میزان این کاهش در مورد افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با افزودن لاتکس SBR بسیار بیشتر است. با افزودن همزمان لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن، خواص مکانیکی بتن متخلخل به میزان بیشتری بهبود می‌یابند؛ اما کاهش درصد تخلخل نیز بیشتر است. با کنترل مقدار الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی به لحاظ محدودیت‌های لازم برای رعایت حداقل مقدار ۱۵ درصد تخلخل، می‌توان به ترکیب بهینه لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن دست یافت. در این تحقیق، این ترکیب بهینه با افزودن ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن حاصل شده که در آن، تخلخل بتن با ۲٤ درصد کاهش نسبت به نمونه کنترل، ۱۵/٦۵ درصد می‌باشد. همچنین، مقادیر مقاومت فشاری ۳۷٪ (۲۷/٦ مگاپاسکال)، مقاومت کششی ۳٦ درصد (۳/٦۱ مگاپاسکال)، مقاومت خمشی ٤۱ درصد (٤/۵۱ مگاپاسکال) و چقرمگی شکست ۲٤ درصد (۰/۵۳۷ $MPa.m^{0.5}$) افزایش داشته‌اند که بیانگر بهبود قابل توجه خواص مکانیکی بتن متخلخل با به‌کارگیری این ترکیب بهینه در پژوهش حاضر است.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، الیاف پلی‌پروپیلن، لاتکس SBR، تخلخل، خواص مکانیکی

۱. مقدمه

با گسترش و پیشرفت علم و پیدایش تکنولوژی‌های فراوان در قرن اخیر، شناخت بتن و خواص آن نیز توسعه قابل ملاحظه‌ای داشته است، به نحوی که امروزه شاهد کاربرد انواع مختلف بتن مانند بتن متخلخل با مصالح مختلف هستیم که هر یک خواص و کاربری مخصوص به خود را داراست (مهرابی و همکاران، ۲۰۲۱).

طبق تعریف، بتن متخلخل ماده‌ای است با اسلامپ صفر که اجازه می‌دهد آب از آن عبور کرده، منابع آب زیرزمینی را تغذیه کند و مواد تشکیل دهنده آن سیمان پرتلند، سنگدانه درشت، مقدار کم یا فاقد ریزدانه، آب و مواد افزودنی می‌باشد. این عناصر در نهایت بتن با حفرات را تولید می‌کنند. دانه‌بندی، اندازه سنگدانه‌های درشت، نسبت آب به مواد سیمانی و میزان تراکم، بر اندازه حفرات اثر می‌گذارند. معمولاً برای ساخت بتن متخلخل از مصالح سنگی درشت‌دانه با اندازه یکسان استفاده می‌شود تا بتوان آسان‌تر به درصد حفرات بیش از ٪۱۵ رسید (چایتانیا و راماکریشنا، ۲۰۲۱).

بتن متخلخل عمدتاً دارای نفوذپذیری زیاد و مقاومت کمتر از بتن معمولی می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده که اندازه سنگدانه، دانه‌بندی و مقدار سنگدانه مصرفی در مخلوط بتن متخلخل، همگی از عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری آن می‌باشند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر آن، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن متخلخل با توجه به نسبت تخلخل زیاد و عدم وجود مصالح ریزدانه، کمتر از بتن معمولی می‌باشد (بو و همکاران، ۲۰۱۸).

بعد از اجرای بتن متخلخل در روسازی‌ها، سطح بتن حالت متخلخل پیدا کرده که افزایش اصطکاک بین روسازی و لاستیک را به همراه دارد و باعث افزایش ایمنی جاده‌ها می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر آن، تخلخل در این نوع بتن باعث می‌شود تا به عنوان یک لایه زهکش مناسب در سطح معابر عمل کرده و رواناب حاصل از بارش برف و باران را از خود عبور داده و به سفره‌های آب زیرزمینی انتقال دهد. این امر سبب کاهش رواناب سطحی و خطر ایجاد سیل شده و در نهایت نیاز به تأسیسات کنترل رواناب و سیلاب را کاهش می‌دهد. از طرفی، با کمک به نفوذ آب‌های سطحی به داخل زمین، منجر به بالا آمدن سطح آب زیرزمینی نیز می‌شود (ژونگ و همکاران، ۲۰۱۸).

از دیگر مزایای بتن متخلخل، عملکرد بهتر آن در مقابله با سیکل‌های ذوب و یخبندان به نسبت بتن معمولی (کاستکر، ۱۹۹۹؛ بونیسلی و همکاران، ۲۰۱٤)، کاهش خطر پاشیده شدن آب و حذف انباشت آن روی روسازی است که منجر به کاهش احتمال وقوع پدیده هیدروپلانینگ می‌شود (رهد، ۲۰۱۲). آلودگی صوتی کمتر در مقایسه با بتن معمولی به دلیل حضور حجم زیادی از منافذ به هم پیوسته (کاستکر، ۱۹۹۹)، جذب حرارت کمتر در طول روز به‌خاطر رنگ روشن‌تر آن (پوتمن و نپتون، ۲۰۱۱)، پتانسیل تصفیه آب و کاهش ناخالصی‌های آن پیش از ورود به منابع آب زیرزمینی (هسلباخ و همکاران، ۲۰۱۱) از دیگر مزایای استفاده از بتن متخلخل است.

علی‌رغم مزایای فراوان، این نوع بتن معایبی نیز دارد که دلیل عدم استفاده از آن در مقیاس گسترده است. جداشدگی دانه‌ها از هم شایع‌ترین نقص بتن متخلخل بوده که می‌تواند با استفاده از اختلاط خوب بتن و عمل‌آوری مناسب به حداقل برسد. همچنین، عدم وجود ریزدانه‌ها در بتن سبب می‌شود سطح آن خشن شده که می‌تواند مشکلاتی را در عمل‌آوری بتن ایجاد کند (کاستکر، ۱۹۹۹). با این‌حال، نقطه ضعف اصلی بتن متخلخل، مقاومت فشاری کم آن است که سبب می‌شود از آن بیشتر در مناطق کم‌ترافیک، پارکینگ‌ها و خیابان‌های محلی استفاده شود. این در حالیست که تحقیقات گذشته نشان داده که مواد افزودنی و ترکیبات خاصی را می‌توان برای افزایش مقاومت این نوع بتن مورد استفاده قرار داد.

در این تحقیق، با هدف ارتقای خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل، تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR به‌صورت جداگانه و همچنین به طور ترکیبی مورد بررسی و ارزیابی قرار داده شده است تا با دستیابی به بتن متخلخل با خصوصیات مکانیکی مطلوب‌تر بتوان از آن علاوه بر کاربردهای رایج ولی اندک امروزی (مناطق کم-ترافیک، پارکینگ‌ها و پیاده‌روها)، در معابر اصلی مناطق پربارش و راه‌های پُر اهمیت‌تر نیز استفاده نمود. استفاده همزمان از افزودنی‌های الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR با دید جامع‌تر نسبت به سایر تحقیقات (ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی به‌صورت همزمان) و برطرف کردن خلأهای تحقیقات گذشته در این خصوص را می‌توان از نوآوری‌های این تحقیق برشمرد.

۲. مطالعات پیشین

بتن‌های متخلخل تقویت شده با الیاف و لاتکس می‌توانند بسیار کاربردی باشند زیرا نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که این افزودنی‌ها (در صورت استفاده در مقدار و اندازه مناسب) تمایل به محدود کردن و کنترل مکانیسم انتشار ترک با جلوگیری از گسترش کرنش‌ها در هنگام اعمال بار دارند. ترکیبات بتنی اصلاح شده با الیاف توانایی بیشتری برای مقابله در برابر بارهای ضربه‌ای داشته و ویژگی‌های جذب انرژی بیشتری دارند (لیو و همکاران، ۲۰۱۸).

دین و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی، به بررسی تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن با سه مقدار مختلف ۰/۳، ۰/٦ و ۰/۹ کیلوگرم بر عملکرد بتن متخلخل پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این الیاف اثرات مفیدی بر خواص بتن شامل افزایش مقاومت فشاری از ۱۷ به ۲۱/٤ مگاپاسکال و افزایش مقاومت کششی از ۲/۰ به ۲/٤٥ مگاپاسکال داشته است. برای بهبود بیشتر خواص مقاومتی بتن متخلخل، علاوه بر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، محققین، ۷٪ از مصالح سنگی درشت را با ماسه جایگزین کردند که در این وضعیت مقاومت فشاری تا ۲٦/۵ مگاپاسکال و مقاومت کششی نیز تا ۲/۹۵ مگاپاسکال بهبود نشان داده‌اند. در این تحقیق، نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ بوده که یکی از علل افزایش نسبی مقاومت در نمونه‌های حاوی و بدون الیاف پلی‌پروپیلن و ماسه بوده است (دین و همکاران، ۲۰۰۸). وو و همکاران (۲۰۱۱) لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن را برای بهبود عملکرد مخلوط‌های بتنی متخلخل مورد استفاده قرار دادند. هدف اصلی این تحقیق، یافتن راهکاری برای ارتقای مقاومت بتن متخلخل در برابر سایش بوده است. با این‌حال، مقاومت فشاری و کششی بتن متخلخل نیز در این تحقیق بررسی شده است. آنها در این تحقیق از دو نوع سنگدانه آهکی و گرانیتی ریز و درشت و همچنین مقدار ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن با سه مقدار مختلف ۳۵، ۳٦ و ۳۷ کیلوگرم لاتکس SBR استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سنگدانه‌های آهکی درشت‌دانه بهترین عملکرد را داشته‌اند. همچنین، با افزودن لاتکس SBR مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش بتن متخلخل به میزان قابل توجهی افزایش یافته است، در حالی که الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر قابل توجهی بر مقاومت بتن متخلخل در برابر سایش نشان نداد. همچنین، در این پژوهش، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن هیچگونه تغییری در مقاومت فشاری و کششی بتن متخلخل ایجاد ننموده است. البته استفاده از ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR در این تحقیق منجر به رسیدن مقاومت فشاری بتن متخلخل با سنگدانه‌های آهکی درشت‌دانه به مقدار ۲۵ مگاپاسکال شده است. علاوه بر آن، حداکثر مقاومت کششی دست یافته شده در این تحقیق برای سنگدانه‌های آهکی درشت‌دانه حدود ۲/٦ مگاپاسکال می‌باشد.

ردر و همکاران (۲۰۱٤) در تحقیقی، به بررسی مقاومت بتن متخلخل حاوی الیاف و درصدهای مختلف

تخلخل در برابر پدیده شکست[1] پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که چقرمگی شکست[2] کاملاً وابسته به نسبت تخلخل بتن بوده و با آن رابطه معکوس دارد. همچنین در یک درصد تخلخل یکسان، هرچه اندازه حفرات[3] افزایش یافته، از میزان چقرمگی شکست کاسته شده است.

بونیسلی و همکاران (۲۰۱٦) در تحقیقی، به بررسی تأثیر انرژی‌های تراکم متفاوت بر عملکرد بتن متخلخل اصلاح شده با الیاف تقویت کننده پرداختند. در این پژوهش و تحت نسبت‌های مختلف آب به سیمان، درصدهای متفاوت ماسه و چندین الیاف تقویت‌کننده با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف به مخلوط‌ها افزوده شدند؛ در حالی که توزیع اندازه دانه و محتوای خمیر سیمان ثابت نگه داشته شد. نتایج این تحقیق اطلاعات مفیدی در مورد اثر تراکم آزمایشگاهی برای دستیابی به تعادلی بین مقاومت بتن و قابلیت نفوذپذیری مطلوب آن ارائه داده است. بعلاوه، این مطالعه درصدهای مناسب افزودن الیاف را برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب برای بتن ارائه داده تا منجر به استفاده بیشتری از آن در راه‌های با ترافیک متوسط و زیاد گردد.

رانگلُف و همکاران (۲۰۱٦) در تحقیقی، به ارزیابی تأثیر افزودن الیاف کربن به بتن متخلخل پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزودن این الیاف باعث افزایش کارایی مخلوط بتن متخلخل می‌شود. مخلوط‌های بتنی اصلاح شده، در مقایسه با نمونه کنترل، نفوذپذیری بیشتری را نشان دادند. بهبود خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه (٤ تا ۱۱ درصد)، مقاومت کششی ۷ روزه (۱۱ تا ٤٦ درصد) و ضریب ارتجاعی (٦ تا ٤٥ درصد) در نتایج این تحقیق پس از افزودن الیاف مشاهده شد. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف کربن در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن متخلخل مؤثر است.

پاتیل و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی، به بررسی اثرات افزودن مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۲، ۰/٤ و ۰/٦ درصد) بر خصوصیات مقاومتی بتن متخلخل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن متخلخل حاوی این نوع الیاف را در مقایسه با بتن متخلخل معمولی افزایش داده که علت آن بهبود پیوند بین سنگدانه و خمیر سیمان پس از افزودن الیاف پلی‌پروپیلن گزارش شده است. بررسی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت فشاری و خمشی به‌دست آمده با افزودن ۰/٦ درصد الیاف به‌دست آمده که مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۸/۹۵ مگاپاسکال (٤۱ درصد افزایش) و مقاومت خمشی ۱۲/۱۰ مگاپاسکال (۳٦ درصد افزایش) می‌باشد.

همچنین، اثرات نسبت آب به سیمان و افزودن انواع الیاف پلی‌پروپیلن با درصدهای مختلف بر ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل در تحقیق ژو و همکاران (۲۰۲۰) بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل با نسبت آب به سیمان ۰/۳۰ مناسب‌ترین است و مقدار آن می‌تواند تا ۸/۱۲ میلی‌متر بر ثانیه نیز برسد. همچنین، ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل با الیاف ضخیم پلی‌پروپیلن بیشتر از الیاف فولادی با روکش مس گزارش شده است.

همانطور که بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، پژوهش‌های مختلفی در خصوص افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR به‌صورت جداگانه در بتن متخلخل انجام شده که تعداد این تحقیقات در رابطه با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن بیشتر است. تحقیقات کمی نیز به افزودن توأم الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR در بتن

[1]- Fracture
[2]- Fracture toughness
[3]- Pore size

متخلخل پرداخته‌اند. در این تحقیقات، بیشتر مقاومت فشاری و کششی بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی دقیق‌تر مجموع این مطالعات نشان می‌دهد که در مورد تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری و کششی بتن متخلخل تفاوت‌های معنی‌داری در نتایج این پژوهش‌ها دیده می‌شود. در تحقیق پیش رو، از طریق انجام مطالعات آزمایشگاهی، به بررسی و ارزیابی تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR به‌صورت جداگانه و همزمان بر خصوصیات مقاومتی بتن متخلخل شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی و همچنین درصد تخلخل پرداخته شده است.

۳. مصالح و روش‌ها

۳-۱. مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی، سیمان، آب، روان کننده، الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR است. مصالح سنگی مورد استفاده از سنگ آهکی با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ درج شده است. دانه بندی مصالح سنگی مصرفی با درنظرگیری حداقل مقادیر معیارهای درصد تخلخل و مقاومت فشاری (۱۵ درصد و ۲/۸ مگاپاسکال) بر اساس گزارش ACI522-2010 در جدول ۲ نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق نیز از نوع سیمان پرتلند کارخانه تهران بوده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

آزمایش	استاندارد	مقدار
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۵۰۶
وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	ASTM C127	۲۶۷۰
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	ASTM C29	۱۵۹۰
درصد سایش	ASTM C535	۲۱/۷۲
ارزش خردشوندگی (%)	BS812: Part 112	۲۱/۳۸

جدول ۲. منحنی دانه بندی بتن متخلخل مورد استفاده در این تحقیق

سایز الک	درصد عبوری
(1/2 in) ۱۲/۵ mm	۱۰۰
(3/8 in) ۹/۵ mm	۳۸
٤/۷۵ mm	۱۷/۵
۲/۳٦ mm	۵
۱/۱۸ mm	۰

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و مقاومت فشاری سیمان پرتلند مورد استفاده در این تحقیق

خصوصیات فیزیکی	مقدار مجاز	مقدار
سطح مخصوص به‌دست آمده از آزمایش بلین (cm^2/gr)	۲۸۰۰	**۳۰۸۱**
وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	–	**۳۱۷۰**
ضریب انبساط در آزمایش اتوکلاو	حد اکثر ۰/۲	**۰/۲**
زمان گیرش اولیه از آزمایش سوزن ویکا (دقیقه)	حد اکثر ٤٥	**١٦٥**
زمان گیرش نهایی از آزمایش سوزن ویکا (دقیقه)	حد اکثر ٣٦٠	**٢٢٥**
مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/m^3)		**١٥٥**
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/m^3)		**٢٢٥**
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/m^3)		**٣٣٠**

۳-۲. الیاف پلی‌پروپیلن

مواد اصلی سازنده این الیاف از مونومرهای C3H6 تهیه شده است که به‌صورت هیدروکربن خالص می‌باشد. نحوه پلیمریزاسیون، وزن مولکولی زیاد و نحوه تولید این الیاف موجب می‌شود تا به دلایل زیر استفاده از این افزودنی در بهبود عملکرد بتن بسیار موفقیت‌آمیز و مؤثر باشد:

- آرایش مولکولی پلیمری منظم که موجب شده تا الیاف پلی‌پروپیلن به عنوان یک ماده ایرواستاتیک شناخته شود.
- مقاومت بسیار زیا در برابر انواع مواد خورنده و شیمیایی.
- سطح آبگریز آن موجب شده تا در صورت اختلاط با خمیر سیمان، آب موجود در این خمیر موجب خراب شدن الیاف پلی‌پروپیلن و جمع شوندگی آن نگردد.
- الگوی قرارگیری ذرات الیاف پلی‌پروپیلن موجب می‌شود تا به‌صورت جانبی به راحتی در معرض اتصال قرار گرفته که نتیجه آن نفوذ سیمان درون الیاف پلی‌پروپیلن بوده که موجب ایجاد پیوند و اتصال مکانیکی بین سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن می‌گردد (ژو و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل ۱، الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق را که دارای طول ٤٠ میلی‌متر و قطر ۲ میلی‌متر می‌باشند را نشان می‌دهد. همچنین، خصوصیات فیزیکی آنها در جدول ٤ نشان داده شده است.

شکل ۱. الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق

جدول ٤. مشخصات فیزیکی الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق

خصوصیات	نتایج
چگالی (gr/cm^3)	۰/۹۱
طول الیاف (mm)	٤۰
قطر الیاف (mm)	۲
نسبت ابعاد (L/D)	۲۰
مدول الاستیسیته (Kg/cm^2)	۳٥۰۰۰۰

۳-۳. لاتکس SBR

لاتکس SBR مصرفی در این تحقیق (شکل ۲) دارای چگالی ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، pH بین ۸-۱۰ و ذرات جامد ٤۸-٤٦ درصد می‌باشد.

شکل ۲. لاتکس SBR مورد استفاده در این تحقیق

۳-٤. طرح اختلاط

انتخاب نمونه‌های مورد نظر برای دستیابی به اهداف این تحقیق مطابق جدول ٥ می‌باشد. بررسی‌ها روی نمونه‌های بتن متخلخل کنترل (بدون افزودنی)، نمونه‌های با مقادیر متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR به‌صورت جداگانه و همچنین نمونه‌های ساخته شده با ترکیب هر دو افزودنی فوق صورت پذیرفته است. از آنجایی که نتایج در نمونه‌های حاوی افزودنی لاتکس SBR به‌صورت جداگانه، بیانگر آن بود که نمونه با ۳٥ کیلوگرم لاتکس SBR عملکرد بهتری داشته است، در بخش نمونه‌های حاوی افزودنی‌های ترکیبی تنها همین مقدار از افزودنی لاتکس SBR مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی، علی‌رغم آنکه نتایج مقاومت‌های مکانیکی بیانگر بهتر بودن نمونه‌های حاوی ۰/۹ الیاف پلی‌پروپیلن بوده‌اند، با این‌حال، در خصوص تخلخل آن نگرانی‌هایی وجود داشته است. در این بخش، به منظور اطمینان بیشتر هر دو مقدار ۰/۷ و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن به همراه لاتکس SBR، به بتن متخلخل افزوده شدند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای ساخت نمونه‌ها، الیاف پلی‌پروپیلن به مصالح سنگی افزوده شده و سپس به آن آب اضافه می‌شود. لاتکس SBR نیز از جمله لاتکس های محلول در آب بوده که پس از طی فرآیند امولسیونی و با از دست رفتن آب آنها، ذرات پلیمر به یکدیگر چسبیده و ساختار پیوسته‌ای تشکیل می‌شود. این ساختار ابتدا به مصالح سنگی افزوده شده و سپس آب به این ترکیب اضافه می‌شود. در

نمونه‌های ساخته شده با هر دو افزودنی نیز ابتدا الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR همانطور که ذکر شد با مصالح سنگی ترکیب شده و سپس به آنها آب اضافه می‌شود.

جدول ۵. مشخصات طرح اختلاط نمونه‌های مختلف بتن متخلخل ساخته شده در این تحقیق

W/C	سیمان (kg)	مصالح سنگی (kg)		فوق روان کننده (kg)	الیاف	لاتکس SBR
		درشت	ریز		پلی‌پروپیلن (kg)	(kg)
۰/۳	۳۲۰	۱۳٤۰	۲۸۵	۱/۵	–	–
					–	۳۵
					–	۳۰
					–	۲۵
					۰/۹	–
					۰/۷	–
					۰/۹	۳۵
					۰/۷	۳۵

۳-۵. آزمایش‌های فیزیکی

به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات فیزیکی بتن متخلخل از آزمایش‌های تخلخل طبق استاندارد ASTM C1688 و نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM D5084 استفاده شده است. مقدار تخلخل از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$p = \left(1 - \frac{W_{dry\ (oven)} - W_{sub}}{V * \rho_w}\right) * 100 \quad (۱)$$

که در آن:

$W_{Dry(oven)}$ وزن نمونه خشک شده در آون (کیلوگرم)، W_{Sub} وزن نمونه غوطه‌ور و اشباع شده در آب (کیلوگرم)، V حجم نمونه (متر مکعب) و ρ_W وزن مخصوص آب (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

همچنین، به منظور انجام آزمایش نفوذپذیری، از روش آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت استفاده شده است که ضریب نفوذپذیری با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$K = \left(\frac{V.L}{A.h(t_2 - t_1)}\right) \quad (۲)$$

که در آن:

K ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)، V حجم آب عبوری از نمونه (cm^3) از زمان t_1 تا t_2، L ارتفاع نمونه بتنی (سانتی‌متر)، A سطح مقطع نمونه بتنی (cm^2) و h اختلاف تراز سطح آب در بالا و پایین نمونه (cm) می‌باشد.

۳-٦. آزمایش‌های مکانیکی

به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل، آزمایش‌های مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39، مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM C496M-04، مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C293-2، و چقرمگی شکست طبق استاندارد ASTM E399 روی نمونه‌های کنترل و اصلاح شده انجام پذیرفت. شکل‌های ۳- الف و ۳- ب تصاویری از نمونه‌های تیری شکل و انجام آزمایش مقاومت خمشی در این تحقیق را نشان می‌دهند.

شکل ۳- الف: نمونه‌های تیری ساخته شده جهت آزمایش مقاومت خمشی در این تحقیق

شکل ۳- ب: انجام آزمایش مقاومت خمشی در این تحقیق

بر اساس گزارش ACI522-2010، حداقل مقدار تخلخل و مقاومت فشاری بتن متخلخل ۱۵ درصد و ۲/۸ مگاپاسکال توصیه شده است. همچنین، بر اساس گزارش FHWA-2012، حداقل مقاومت خمشی و نفوذپذیری بتن متخلخل یک مگاپاسکال و ۱/۳۵ میلی‌متر بر ثانیه توصیه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در جدول ٦ نشان داده شده است. این نتایج در بخش‌های ٤-١ تا ٤-٤ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

جدول ٦. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

آزمایش	کنترل	۰/۷ کیلوگرم الیاف	۰/۹ کیلوگرم الیاف	۲۵ کیلوگرم لاتکس	۳۰ کیلوگرم لاتکس	۳۵ کیلوگرم لاتکس	۰/۷ کیلوگرم الیاف و ۳۵ کیلوگرم لاتکس	۰/۹ کیلوگرم الیاف و ۳۵ کیلوگرم لاتکس
تخلخل (٪)	۲۰/٦۵	۱۷/۰۸	۱٦/۲۵	۲۰/۰	۱۹/۵۵	۱۹/۳۵	۱۵/٦۵	۱٤/۹۵
نفوذپذیری (mm/s)	٤/۸۵	٤/۱۰	۳/۰۰	٤/٦۸	٤/٦۵	٤/٦۳	۳/۲۳	۲/۳۹
مقاومت فشاری (MPa)	۲۰/۱	۲۳/۷	۲٤/۹	۲۲/۵	۲۳/۷	۲۵/۳	۲۷/٦	۲۸/٤
مقاومت کششی (MPa)	۲/٦۵	۳/٤۰	۳/۷۰	۲/۷۵	۲/۸۰	۲/۹۰	۳/٦۱	۳/۸۵
مقاومت خمشی (MPa)	۳/۲۰	٤/۲۳	٤/٤۱	۳/۸۰	٤/۰۰	٤/۲۰	٤/۵۱	٤/۷۳
چقرمگی شکست ($MPa.m^{0.5}$)	۰/٤۳۵	۰/۵۳۵	۰/۵۵۲	۰/٤۹٦	۰/۵۱۲	۰/۵۳۱	۰/۵۳۷	۰/۵۸۸

٤. تحلیل نتایج

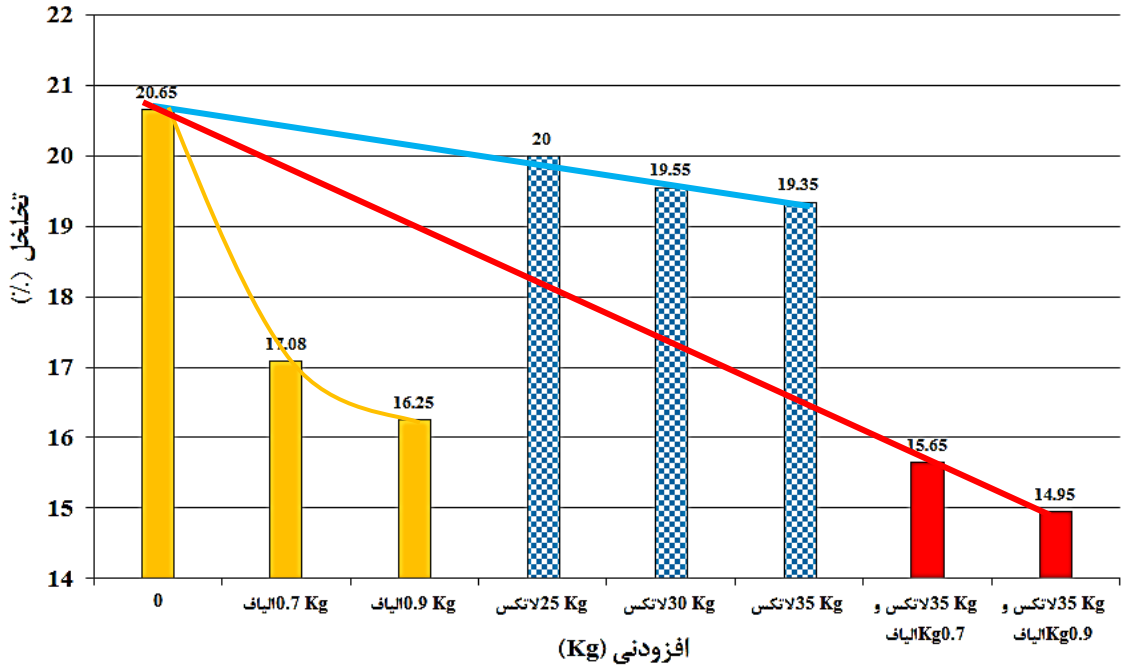
٤-١. نتایج آزمایش فیزیکی

نتایج آزمایش تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR در شکل ٤ نشان

داده شده است و بررسی آنها نشان‌دهنده آن است که توانایی الیاف پلی‌پروپیلن در کاهش تخلخل بسیار بیشتر از لاتکس SBR می‌باشد زیرا شیب کاهش تخلخل نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بسیار بیشتر از نمونه‌های حاوی لاتکس SBR است.

از طرفی، همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تخلخل نمونه کنترل در حدود ۲۱ درصد بوده که پس از اضافه کردن افزودنی‌ها، مقدار آن کاهش یافته است؛ به گونه‌ای که محدوده تغییرات تخلخل تمامی نمونه‌ها (به استثنای نمونه با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن) در ح

دود ۱۵ تا ۲۱ درصد بود. لذا، با توجه به این نتایج، نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل در محدوده قابل قبول قرار دارد. با این‌حال، با توجه به شکل ٤، مشاهده می‌شود که تخلخل نمونه با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن حدود ۲۸ درصد در مقایسه با نمونه کنترل کاهش یافته و به کمتر از ۱۵ درصد رسیده و در نتیجه در محدوده قابل قبول قرار ندارد.

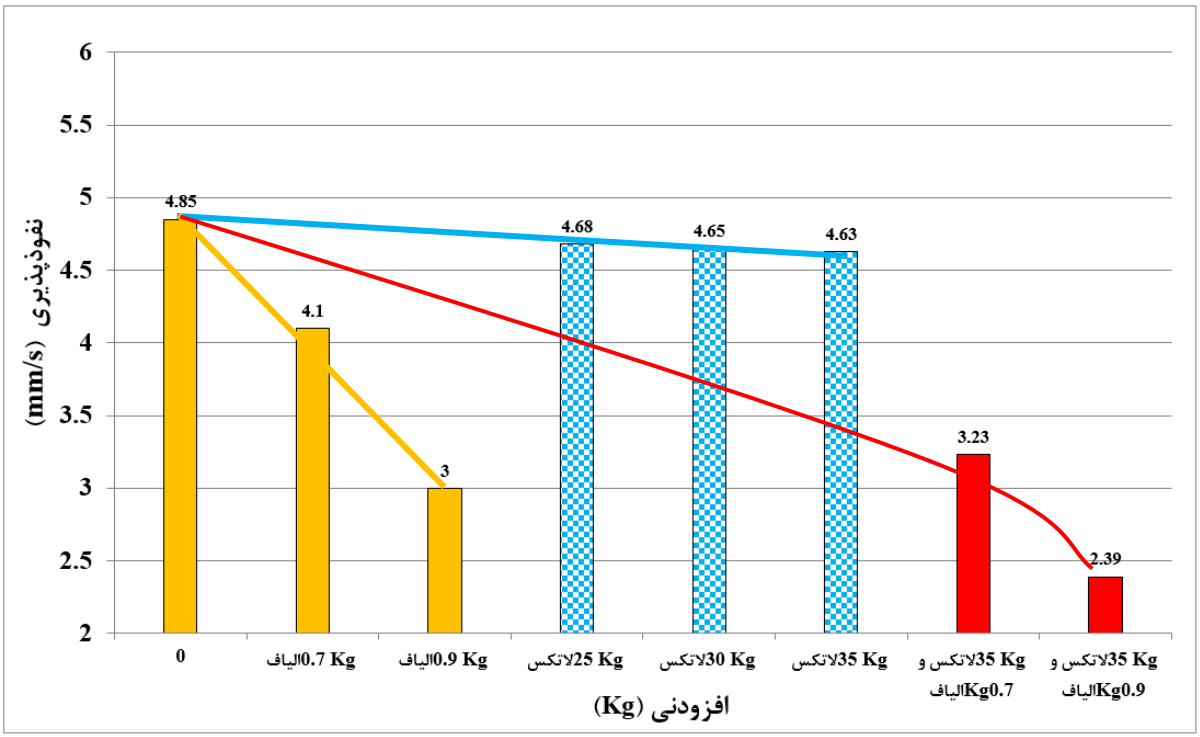


شکل ٤. نتایج آزمایش تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

از مقایسه تأثیرگذاری دو نوع افزودنی الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR می‌توان به این نتیجه رسید که با افزودن ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR در نمونه ترکیبی، تخلخل نمونه به میزان ٢٤٪ نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است؛ اما در حد قابل قبول قرار دارد. این در حالیست که میزان کاهش تخلخل برای نمونه‌های حاوی ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR به‌صورت جداگانه در مقایسه با نمونه کنترل به ترتیب ۲۱ و ٦ درصد بوده است.

همچنین، نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR در شکل ۵ نشان داده شده است که بیانگر گستردگی نفوذپذیری نمونه‌های این تحقیق در بازه ۲/۳۹ تا ٤/۸۵ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت، روند تغییرات نفوذپذیری در نمونه‌ها مشابه تغییرات تخلخل در آنها می‌باشد و نمونه‌های با تخلخل بیشتر

نفوذپذیری بیشتری دارند. در این بین، بررسی نتایج نشان می‌دهد که لاتکس SBR چندان بر نفوذپذیری تأثیرگذار نبوده و الیاف پلی‌پروپیلن سبب کاهش بیشتری در نفوذپذیری نمونه‌ها شده است. این کاهش در نمونه‌های با ترکیب الیاف و لاتکس همچنان ادامه داشته، به‌طوری که با افزودن ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن، نفوذپذیری بتن متخلخل حدود ۵۰ درصد کاهش داشته است. هرچند که اگر از ترکیب ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن استفاده شود، این کاهش در نفوذپذیری حدود ۳۳ درصد خواهد بود.



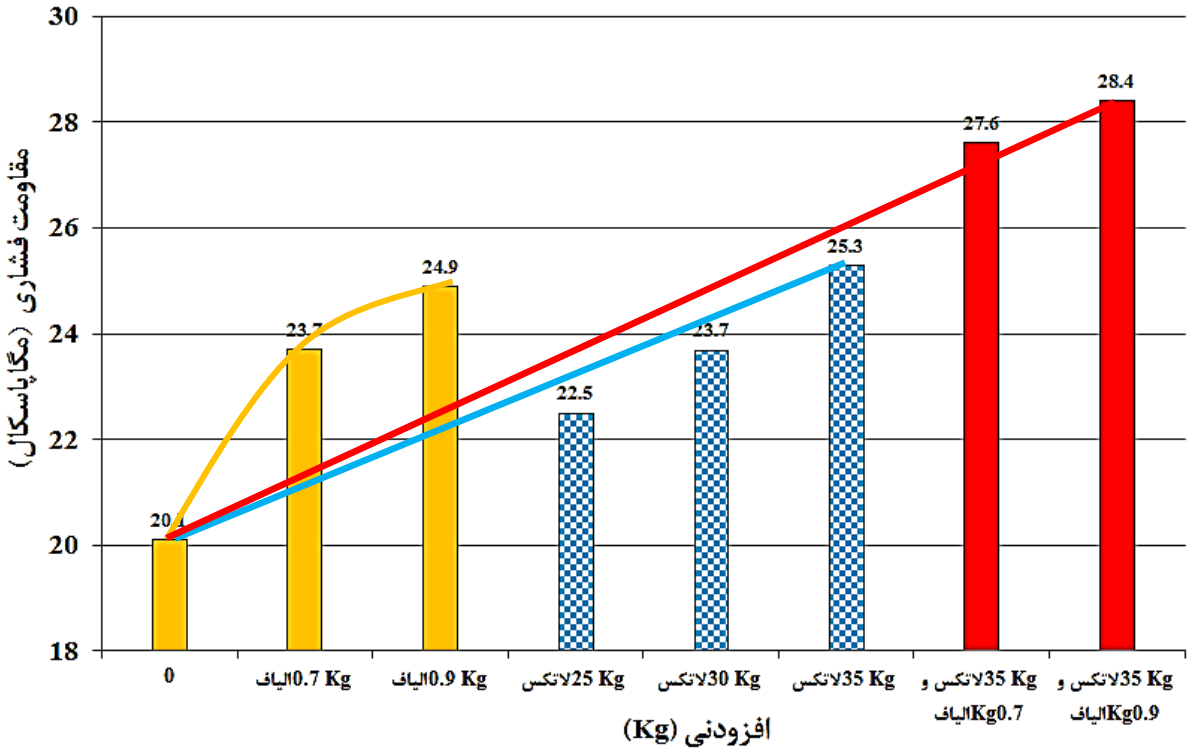
شکل ۵. نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

٤-٢. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شکل ٦، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل کنترل (بدون افزودنی) و حاوی مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج مشخص است، با افزودن هر دو افزودنی مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل افزایش یافته است و هرچه مقدار الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR اضافه شده، این افزایش در مقاومت فشاری بیشتر بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۵ کیلوگرم پلیمر لاتکس SBR به ترتیب منجر به افزایش حدود ٢٤ و ٢٦ درصد مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل شده است. همانگونه که در بخش مطالعات پیشین ذکر شد، در مطالعه وو و همکاران (۲۰۱۱) با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن هیچ تغییری در مقاومت فشاری بتن متخلخل مشاهده نشده است. اما نتایج مطالعه حاضر با مطالعات دین و همکاران (۲۰۰۸) و پاتیل و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. در این دو پژوهش، افزایش مقاومت فشاری بتن متخلخل با افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن نتیجه شده است.

از طرفی، با ترکیب دو نوع افزودنی در بتن متخلخل، روند افزایش مقاومت فشاری ادامه داشته و مقاومت فشاری بتن متخلخل تا ٢٧/٦ مگاپاسکال در نمونه حاوی

۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و تا ۲۸/٤ مگاپاسکال در نمونه حاوی ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن رسیده است. هرچند که نتایج آزمایش تخلخل نشان داده است که مورد آخر علی‌رغم داشتن مقاومت فشاری بیشتر، به علت تخلخل کمتر از ۱۵٪ نمی‌تواند انتخاب مطلوبی باشد و نمونه با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن با ۳۷ درصد افزایش در مقاومت فشاری و رسیدن به مقاومت ۲۷/٦ مگاپاسکال به عنوان بهترین پیشنهاد خواهد بود.



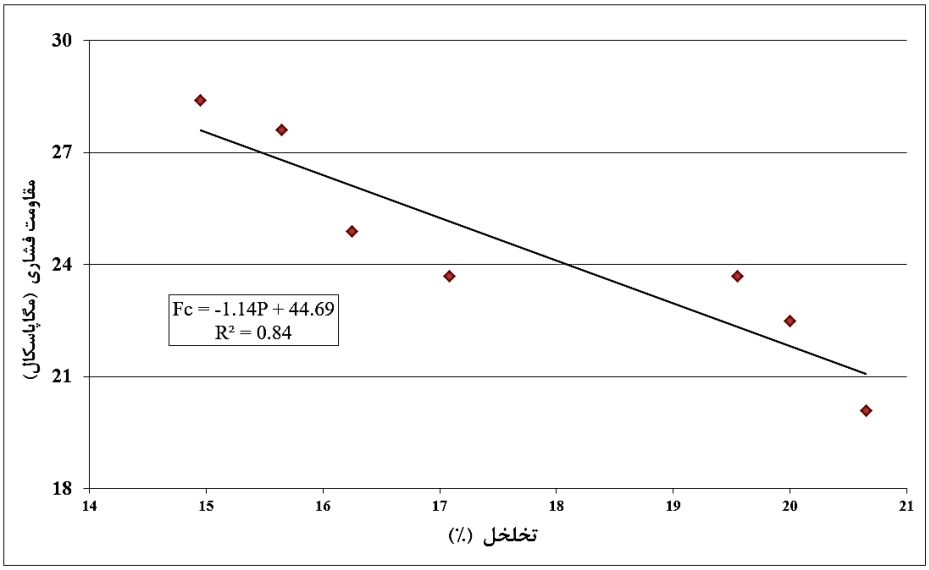
شکل ٦. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

از عمده دلایل بهبود مقاومت فشاری بتن متخلخل توسط الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR می‌توان به این مورد اشاره نمود که استفاده از این دو افزودنی سبب پر شدن بخشی از خلل و فرج در بتن متخلخل شده که با کاهش آنها مقاومت فشاری بتن متخلخل افزایش یافته است. علاوه بر آن، استفاده از لاتکس در مخلوط بتن متخلخل سبب ایجاد پیوند هیدراته بین ذرات سیمان و لاتکس SBR شده که این پیوند شیمیایی در کنار پیوند هیدراته بین سیمان و آب سبب بهبود مضاعف مقاومت بتن متخلخل می‌شود. البته باید این نکته را مد نظر داشت که استفاده بیش از اندازه از افزودنی‌ها و مواد ریزدانه سبب کاهش بیش از اندازه درصد تخلخل گردیده و این موضوع می‌تواند اصلی‌ترین قابلیت این نوع بتن، یعنی نفوذپذیری، آن را دچار مشکل نماید.

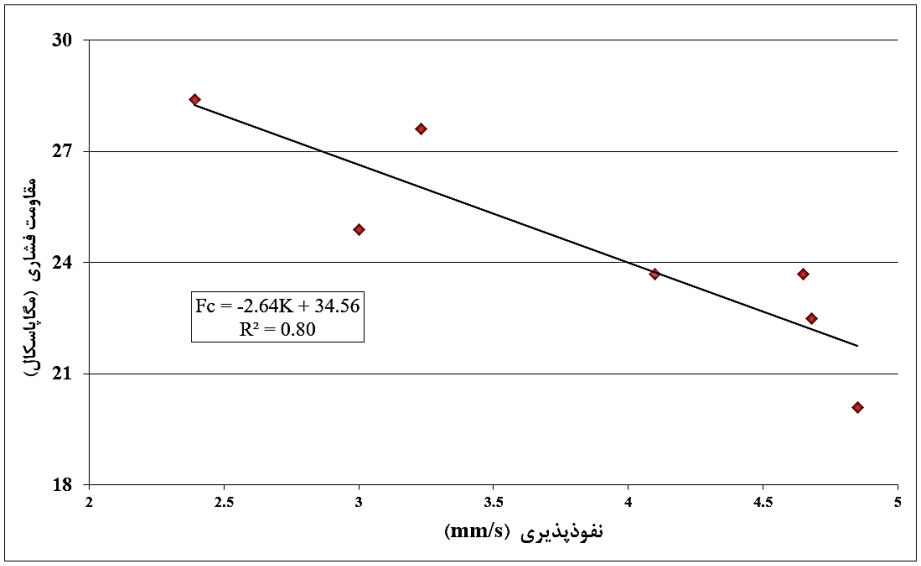
تحلیل‌های آماری نتایج به‌دست آمده حاصل از مقایسه مقادیر مقاومت فشاری با تخلخل و نیز نفوذپذیری نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، مشخص است که همبستگی بالایی (۸۰ درصد به بالا) بین مقادیر به‌دست آمده مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری وجود دارد. به این معنی که هر اندازه تخلخل نمونه‌ها کاهش یابد بیانگر آن است که نمونه‌ها با بافت مناسب‌تر و دانه‌بندی پرتر ساخته شده‌اند و دارای مقاومت فشاری بیشتری نیز خواهند بود. از طرفی، تخلخل کمتر بیانگر نفوذپذیری کمتر نیز می‌باشد.

٤-٣. نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی روی نمونه‌های بتن متخلخل کنترل (بدون افزودنی) و حاوی افزودنی‌های الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همانند روند نتایج آزمایش مقاومت فشاری، با افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR مقاومت کششی نمونه‌های بتن متخلخل نیز افزایش یافته است.



شکل ۷. رابطه مقاومت فشاری- تخلخل در نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR



شکل ۸. رابطه مقاومت فشاری- نفوذپذیری در نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

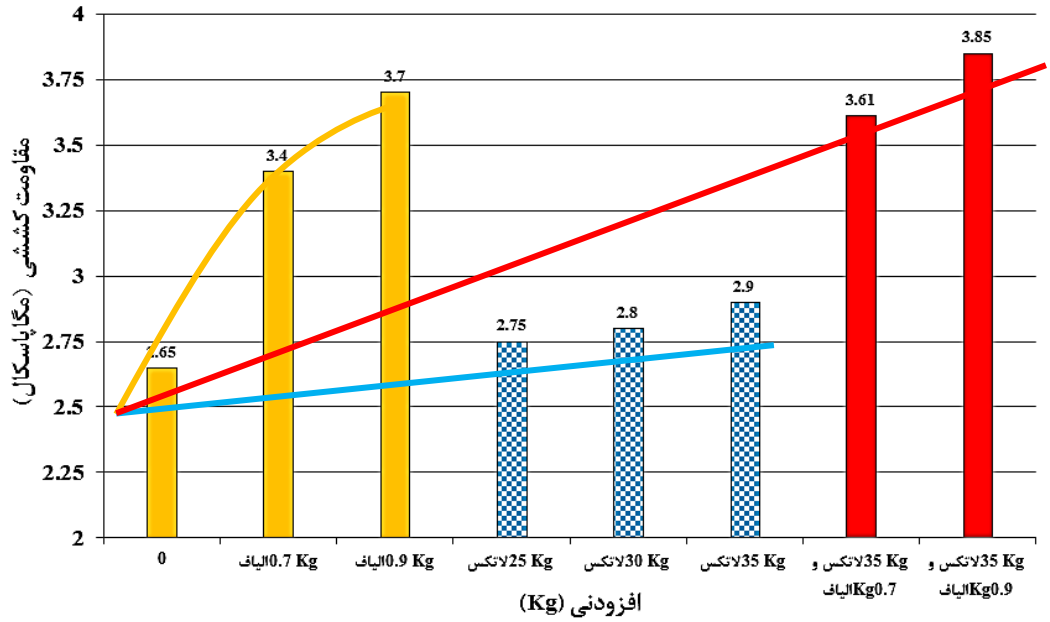
مقدار افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های بتن متخلخل حاوی ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۵ کیلوگرم پلیمر لاتکس SBR به ترتیب ٤۰ و ۱۰ درصد می‌باشد. همانگونه که در تحقیقات پیشین گفته شد، نتایج آزمایش‌های وو و همکاران (۲۰۱۱) نشان داده که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن هیچگونه تأثیری بر مقاومت کششی بتن متخلخل ندارد. اما نتایج دین و همکاران (۲۰۰۸) مبین روند افزایشی مقاومت کششی در برابر افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن بوده و با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

نکته حائز اهمیت، بیشتر بودن مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به پلیمر بوده

است. این در حالیست که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پلیمر بیش از الیاف پلی‌پروپیلن بوده است. این نکته به دلیل ماهیت الیاف پلی‌پروپیلن است و عمده‌ترین دلیل و ویژگی استفاده از آن در بتن، تأثیر زیاد آن در بهبود مقاومت کششی بتن می‌باشد که نتایج نشان داده این خاصیت در بتن متخلخل هم توانسته است تا حدود ٤٠ درصد بر مقاومت کششی بتن متخلخل بیفزاید. اگرچه افزودن الیاف پلی‌پروپیلن سبب کاهش نفوذپذیری بتن متخلخل می‌شود.

هر دو افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، با بهبود چسبندگی بین ماتریس سیمان و سنگدانه، سبب بهبود مقاومت کششی بتن متخلخل شده‌اند. بنابراین، افزایش ١٠ تا ٤٠ درصدی مقاومت کششی بتن متخلخل دلیل دیگری بر تأیید عملکرد مطلوب افزودنی‌های این تحقیق در راستای بهبود مشخصات مکانیکی بتن متخلخل برای استفاده گسترده‌تر از آن می‌باشد.

با استفاده همزمان دو نوع افزودنی لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی نمونه‌های بتن متخلخل نسبت به نمونه‌های کنترل افزایش می‌یابند. به‌گونه‌ای که با ترکیب ٣٥ کیلوگرم لاتکس SBR و ٠/٧ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی به حدود ٣/٦١ مگاپاسکال (٣٦درصد افزایش) رسیده است. این مقدار اندکی کمتر از مقدار مقاومت کششی نمونه بتن متخلخل حاوی ٠/٩ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن (به تنهایی) می‌باشد. هرچند که مقاومت کششی نمونه ٣٥ کیلوگرم لاتکس SBR و ٠/٩ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن بیش از تمامی نمونه‌ها می‌باشد، اما نمی‌توان این نمونه را به دلیل دارا بودن تخلخل کمتر از ١٥٪ قابل قبول دانست.



شکل ٩. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

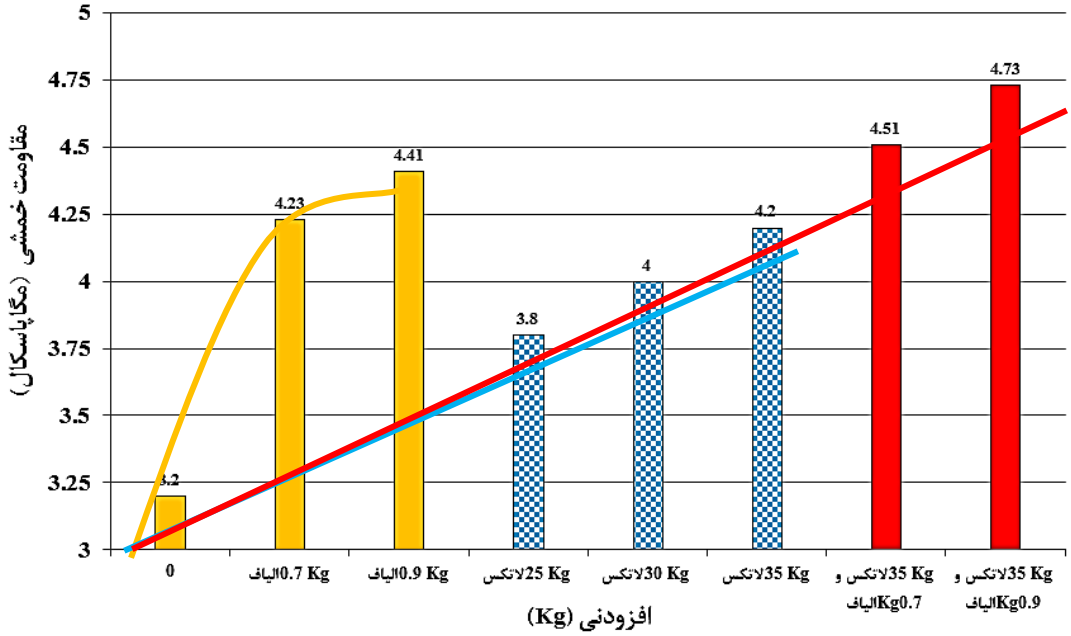
٤-٤. نتایج آزمایش مقاومت خمشی و چقرمگی شکست

شکل ١٠، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی روی نمونه‌های بتن متخلخل کنترل (بدون افزودنی) و حاوی افزودنی‌های الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصدهای الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR، مقاومت خمشی نمونه‌های بتن متخلخل افزایش یافته

است که این موضوع به دلیل ارتقای قابلیت چسبانندگی ملات سیمان پس از اضافه شدن این مواد و همچنین کاهش خلل و فرج مخلوط بتن متخلخل می‌باشد.

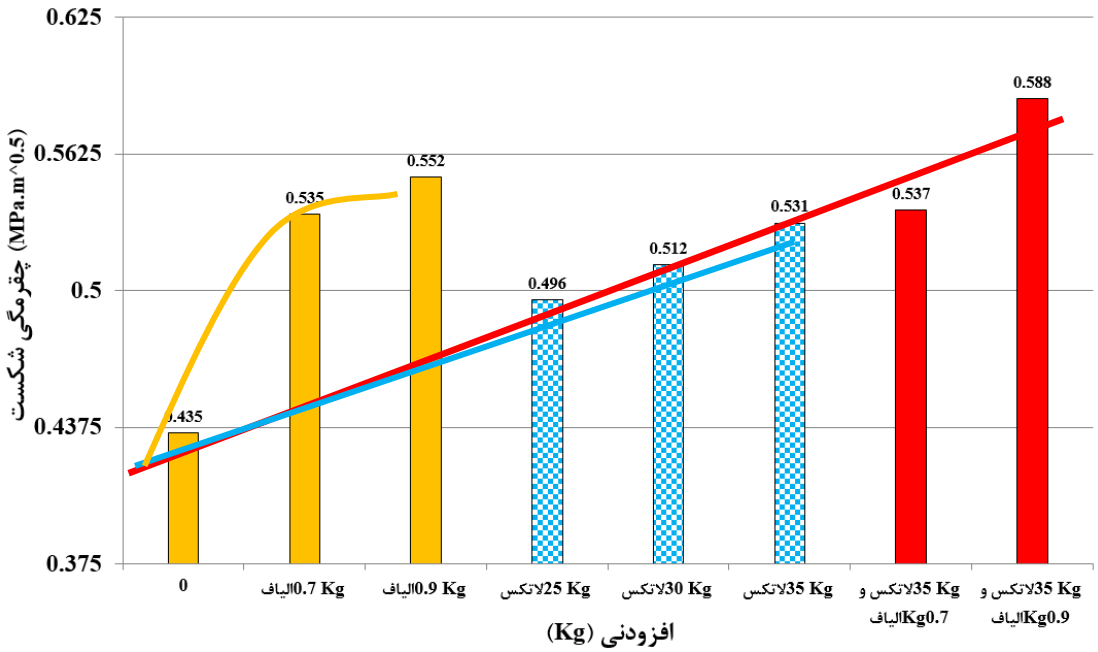
نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۵ کیلوگرم پلیمر لاتکس SBR، مقاومت خمشی بتن متخلخل را به ترتیب ۳۸ و ۳۱ درصد ارتقا داده که در این میان میزان اثرگذاری الیاف پلی‌پروپیلن بیشتر از پلیمر لاتکس SBR بوده است. دلیل این موضوع، قرارگیری ذرات الیاف پلی‌پروپیلن در بین پیوند سیمان و سنگدانه و تسلیح بتن متخلخل بوده که مانع گسیختگی آن در هنگام اعمال بارهای خمشی و کششی می‌گردد.

از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که افزودن ترکیبی افزودنی‌ها، مقاومت خمشی بتن متخلخل را تا ٤/٥١ و ٤/٧٣ مگاپاسکال رسانده است که در این بین و با درنظرگیری معیار تخلخل، نمونه با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن با حدود ٤١ درصد بهبود در مقاومت خمشی بهترین عملکرد را داشته است.



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

همچنین، شکل ۱۱، نتایج چقرمگی شکست نمونه‌های بتن متخلخل کنترل (بدون افزودنی) و حاوی افزودنی‌های الیاف پلی‌پروپیلن و لاتکس SBR را نشان می‌دهد. مشابه مقاومت خمشی، تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر چقرمگی شکست نمونه‌های بتن متخلخل بسیار بیشتر از لاتکس SBR بوده است؛ به‌گونه‌ای که با افزودن ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن چقرمگی شکست حدود ۲۳ درصد نسبت به نمونه کنترل بهبود یافته است. با این‌حال، اگر دو افزودنی لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت ترکیبی به بتن متخلخل افزوده شوند، بهبود در چقرمگی شکست بیشتر نیز خواهد شد. بنا بر آنچه پیشتر بیان شد، مخلوط حاوی ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل تخلخل کمتر از ۱۵ درصد قابل قبول نبوده، هرچند چقرمگی شکست آن در بین تمامی نمونه‌ها بیشتر است. در نتیجه، در بین نمونه‌ها، نمونه حاوی ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن را می‌توان بهینه‌ترین ترکیب برای دستیابی به چقرمگی بیشتر (حدود ٢٤ درصد بهبود) انتخاب نمود.



شکل ۱۱. نتایج چقرمگی شکست نمونه‌های بتن متخلخل حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلیمر لاتکس SBR

٤-۵. جمع‌بندی نتایج

نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق شامل نمونه‌های کنترل، اصلاح شده با ۰/۷ و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن، اصلاح شده با ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR، و نمونه ترکیبی اصلاح شده با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن، و نمونه اصلاح شده با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۹ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن بوده‌اند. انتخاب بهینه‌ترین ترکیب بر اساس داشتن بیشترین خصوصیات مکانیکی بوده است، به‌شرط اینکه درصد تخلخل آن ترکیب از حداقل توصیه شده (مقدار ۱۵درصد برای بتن متخلخل) کمتر نگردد. تحلیل نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهینه‌ترین ترکیب با شرایط فوق، نمونه ساخته شده با ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR و ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن بوده است که در آن با وجود کاهش ۲٤ درصدی تخلخل نسبت به نمونه کنترل، مقدار آن ۱۵/٦۵ درصد و بیشتر از مقدار حداقل درصد تخلخل لازم برای بتن متخلخل (۱۵ درصد) می‌باشد. علاوه بر این، مقاومت فشاری این ترکیب نسبت به نمونه کنترل ۳۷ درصد افزایش، مقاومت کششی ۳٦ درصد افزایش، مقاومت خمشی ٤۱ درصد افزایش و چقرمگی شکست ۲٤ درصد افزایش داشته است که این موضوع بیانگر بهبود قابل توجه خواص مکانیکی بتن متخلخل با استفاده از ترکیب بهینه دو افزودنی لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، ارتقای خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل از طریق استفاده از دو نوع افزودنی الیاف پلی‌پروپیلن و پودر لاتکس SBR بوده و بدین منظور آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، چقرمگی شکست، درصد تخلخل و نفوذپذیری روی نمونه‌های مختلف حاوی و بدون افزودنی‌های فوق انجام شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به قرار زیر است:

- با افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن، مقادیر مقاومت فشاری، کششی، خمشی و چقرمگی شکست بتن متخلخل افزایش می‌یابند. درصد این افزایش در مورد مقاومت کششی و خمشی بیشتر است.

افزایش بیش از حد الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند سبب کاهش قابل توجه درصد تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری بتن متخلخل گردد. لذا مقدار استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن متخلخل باید محدود گردد.

- با افزایش مقدار لاتکس SBR، مقادیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. این افزایش در ارتباط با مقاومت فشاری و خمشی بیشتر است. افزودن لاتکس SBR سبب کاهش درصد تخلخل بتن می‌گردد؛ اما این درصد کاهش قابل توجه نیست.

با افزودن همزمان لاتکس SBR و الیاف پلی‌پروپیلن، پارامترهای مقاومتی بتن متخلخل یعنی مقاومت فشاری، کششی، خمشی و چقرمگی شکست، به میزان زیادی افزایش می‌یابند. اما باید توجه نمود که کاهش درصد تخلخل مقدار نفوذپذیری را به کمتر از حد قابل قبول ۱۵ درصد نرساند. برای این منظور، باید مقدار بهینه (حداکثر) الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی تعیین گردد. در این پژوهش، این مقدار با توجه به مقدار و نوع مصالح سنگی و سیمان مصرفی و نسبت آب به سیمان، مقدار ۰/۷ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن بوده که به همراه ۳۵ کیلوگرم لاتکس SBR بهترین نتیجه را به‌دست داده است.

٦. مراجع

صالحی زاده، م. و دیزنگیان، ب. ۱۳۹۸. "ارزیابی مقاومت بتن متخلخل ساخته شده با استفاده از خرده لاستیک ضایعات". مجله تحقیقات بتن، ۱۳(۱): ۱۲۸-۱۱۳.

ACI Committee 522R-10. 2010. “Pervious concrete standard”. http://www.concrete.org/bookstorenet/productdetail.aspx?itemid=522108.

Bonicelli, A., Giustozzi, F., Crispino, M. and Borsa, M. 2014. “Investigation on the functional and mechanical performance of differentially compacted pervious concrete for road pavements”. Sustain., Eco-effic., Conserv. Transport. Infrastruct. Asset Manag., 265-272.

Bonicelli, A., Arguelles, G. M. and Pumarejo, L. G. 2016. “Improving pervious concrete pavements for achieving more sustainable urban roads”. Proc. Eng., 161: 1568-1573.

Bu, J., Chen, X., Liu, S., Li, S. and Shen, N. 2018. “Experimental study on the dynamic behavior of pervious concrete for permeable pavement”. Comput. Concrete, 22(3): 291-303.

Caestecker, C. 1999. “Test sections of noiseless cement concrete pavements–Conclusions”. R&T Adm., Belgium.

Chaitanya, M. and Ramakrishna, G. 2021. “Enhancing the mechanical properties of pervious recycled aggregate concrete using silicafumes”. Mater. Today: Proc., 46: 634-637.

Dean, S. W., Kevern, J. T., Schaefer, V. R., Wang, K. and Suleiman, M. T. 2008. “Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability”. J. ASTM Int., 5(2): 101320.

Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. T. and Schaefer, V. R. 2011. “Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems”. Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 2240(1): 107-115.

Lee, S., Kim, K., Park, J. and Cho, J. 2018. “Pure rate effect on the concrete compressive strength in the split Hopkinson pressure bar test”. Int. J. Impact Eng., 113: 191-202.

Liu, R., Liu, H., Sha, F., Yang, H., Zhang, Q., Shi, S. and Zheng, Z. 2018. “Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes”. Processes, 6(7); 78-85.

Mehrabi, P., Shariati, M., Kabirifar, K., Jarrah, M., Rasekh, H., Trung, N. T. and Jahandari, S. 2021. “Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate”. Constr. Build. Mater., 287: 122652.

Patil, C. B., Shinde, P. S. H., Mohite, B. M. and Ingale, S. H. S. 2017. “Experimental evaluation of compressive and flexural strength of pervious concrete by using polypropylene fiber”. Int. J. Eng. Res. Technol., V6 (04).

Pervious Concrete, Technical Brief, FHWA-HIF-13-006. 2012. www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete.

Putman, B. J., Neptune, A. I. 2011. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements". Constr. Build. Mater., 25(8): 3480-3485.
Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L. and Englund, K. 2016. "Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete". Constr. Build. Mater., 126: 875-885.
Rehder, B., Banh, K. and Neithalath, N. 2014. "Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers". Eng. Fract. Mech., 118: 1-16.
Rhead, D. 2012. "Evolution of pervious concrete pavement at the Ministry of Transportation Ontario, Canada". 10th International Conference on Concrete Pavements, International Society for Concrete Pavements, Holcim (Canada) Transports Quebec.
Wang, Y., Sun, M. and Song, B. 2017. "Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China". Resour., Conserv. Recy., 122: 11-20.
Wu, H., Huang, B., Shu, X. and Dong, Q. 2011. "Laboratory evaluation of abrasion resistance of Portland cement pervious concrete". J. Mater. Civ. Eng., 23(5): 697-702.
Zhong, R., Leng, Z. and Poon, C. 2018. "Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review". Constr. Build. Mater., 183: 544-553.
Zhu, H., Wen, C., Wang, Z. and Li, L. 2020. "Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers". Mater., 13(2): 321-329.