

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر سبک‌دانه‌های طبیعی بر برخی خصوصیات فیزیکی روسازی بتن متخلخل و ارائه رابطه مقاومت فشاری بر حسب درصد تخلخل

مهسا دوست‌محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
حجت کرمی، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
سعید فرزین\*، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
سید فرهاد موسوی، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: [saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:saeed.farzin@semnan.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲

### چکیده

روسازی بتن متخلخل باعث کاهش حجم رواناب سطحی، جلوگیری از ایجاد سیل و تقویت آب‌های زیرزمینی می‌شود. در تحقیق حاضر، تأثیر جایگزینی سبک‌دانه‌های پومیس، اسکریا و زئولیت با مقادیر حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد با سنگ‌دانه بتن متخلخل، بر خصوصیات فیزیکی شامل مقاومت فشاری و درصد تخلخل بررسی گردید. ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان صورت گرفت. تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که با جایگزینی سبک‌دانه‌ها در ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگ‌دانه اصلی، روند خاصی در بین نمونه‌ها مشاهده می‌شود. به صورتی که با افزایش درصد تخلخل، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین میانگین مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن متخلخل با جایگزینی ۵۰ و ۲۵ درصد اسکریا با سنگ‌دانه مشاهده شد که به ترتیب برابر با ۱۱/۰۸ و ۱۰/۷۶ مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین میانگین تخلخل نیز در نمونه حاوی ۱۰۰٪ پومیس به عنوان سنگ‌دانه مشاهده شد که نسبت به تخلخل نمونه شاهد ۵۵/۹۵ درصد افزایش داشته است. بر اساس معادله تجربی به دست آمده با ضریب تبیین ۰/۹، مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتن متخلخل با تخلخل متفاوت، قابل تخمین می‌باشد. سبک‌دانه‌های طبیعی پیشنهادی در این پژوهش، به دلیل فراوانی، اقتصادی بودن، تخلخل زیاد و کاهش حجم رواناب شهری، پتانسیل خوبی در استفاده در روسازی‌ها، به‌ویژه در مناطق با ترافیک کم، را دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، سبک‌دانه، مقاومت فشاری، تخلخل، رواناب شهری

### ۱. مقدمه

بتن تشکیل می‌شود. روسازی بتن متخلخل از انواع روسازی صلب است که از ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع روسازی، نفوذپذیری زیاد به دلیل تخلخل آن است. این نوع روسازی می‌تواند رواناب موجود در سطح معابر را از خود عبور داده و به سفره‌های آب زیرزمینی منتقل کند. با کاهش رواناب‌های سطحی، خطر ایجاد سیل کمتر

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن به شمار می‌رود که دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی است. به‌طور معمول، بتن متخلخل فاقد مصالح ریزدانه و یا دارای ریزدانه کم می‌باشد. در این نوع بتن، مصالح درشت‌دانه با ملات سیمان به هم می‌چسبند و ساختار متخلخل این

خیره کننده در شب را کاهش می‌دهد که باعث بهبود ایمنی و راحتی رانندگان می‌شود (یانگ و جیانگ، ۲۰۰۳). شکل ۱ تصویری از روسازی بتن متخلخل را نشان می‌دهد.

می‌شود و نیاز به تأسیسات کنترل رواناب و سیلاب کاهش می‌یابد (ACI 522R-10؛ هندرسون، ۲۰۱۲). از دیگر مزایای بتن متخلخل، کاهش صداهای ایجاد شده توسط وسایل نقلیه است. همچنین، روسازی بتن متخلخل، نور



شکل ۱. نمونه‌هایی از کاربرد روسازی بتن متخلخل

فشاری تأثیر می‌گذارد. زاتانگ و همکاران (۲۰۱۳)، برای ساخت بتن متخلخل از سنگ‌دانه‌های سبک استفاده کردند. نتایج نشان داد که چگالی و هدایت حرارتی این نوع بتن، ۳-۴ مرتبه نسبت به بتن متخلخل حاوی سنگدانه طبیعی کاهش می‌یابد. کوسیچ و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر دانه‌بندی سنگ‌دانه را روی پنج نوع مختلف نمونه بتن متخلخل بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش ریزدانه، مقاومت نمونه بتنی بیشتر می‌شود. به طوری که مقاومت فشاری برای طرح‌های اختلاط مختلف به ترتیب افزایش درصد ریزدانه برابر ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. کیم و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی با بتن متخلخل حاوی درصد‌های مختلف سنگ-دانه سرباره‌ای توانستند حداقل مقاومت فشاری ۷ روزه مورد نیاز برای فرودگاه، که برابر با ۵ مگا پاسکال است، را تأمین کنند. جوشقانی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای، از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن متخلخل استفاده کردند. براساس نتایج حاصل از این مطالعه، مقاومت نمونه‌های بتن متخلخل بستگی به نسبت تخلخل نمونه‌ها دارد و مقاومت فشاری و مقاومت خمشی با نفوذپذیری رابطه معکوس دارند. لی و همکاران

بتن متخلخل در روسازی به عنوان لایه رویی در پارکینگ‌ها کاربرد دارد. این بتن در دهه ۱۹۶۰ میلادی به عنوان لایه رویه در روسازی پارکینگ‌ها در فلوریدا استفاده شد. بتن متخلخل معمولاً در راه‌ها به عنوان اساس نفوذپذیر و یا زیراساس و یا لایه رویه استفاده می‌شود. در هر دو مورد، ویژگی نفوذپذیری مطلوب است. اما بسته به این که در کدام قسمت از سیستم روسازی مورد استفاده قرار گیرد، مقاومت‌های فشاری مختلفی می‌طلبد. نخستین بار در فرانسه از بتن متخلخل در شانه جاده استفاده شد. مقاومت فشاری مورد نیاز در شانه جاده معمولاً کمتر از ۱۴ مگاپاسکال است (ACI 522R-10؛ حسین‌زاده حجازی، ۱۳۹۰).

فناوری بتن متخلخل در برخی از کشورهای صنعتی مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. کرهونن و بایر (۱۹۸۹)، بتن سیمانی پرتلند متخلخل را برای پوشش باند فرودگاه بررسی کرده‌اند. گادیک و همکاران (۲۰۱۳)، دریافتند که هر چه نسبت تخلخل بتن متخلخل بیشتر باشد به مقاومت فشاری کمتری منجر می‌شود و همچنین بیان کردند که علاوه بر تخلخل، مقدار ریزدانه، مواد افزودنی و سطح تراکم روسازی در هنگام اجرا بر مقاومت

ایشان از پومیس به عنوان جایگزین سنگدانه بتن متخلخل استفاده کردند و مقاومت فشاری، استحکام خمشی، تغییرات چگالی و تخلخل را بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که استفاده از پومیس در بتن متخلخل باعث افزایش تخلخل، کاهش مدول الاستیسیته و افزایش مقاومت کششی می‌شود. کورت و همکاران (۲۰۱۶)، اثر پودر پومیس را بر خاصیت خودمتراکمی بتن سبک حاوی سنگدانه پومیس بررسی کردند. ناگروکین و همکاران (۲۰۱۷)، اثر افزودنی‌های معدنی را بر خواص بتن بررسی کردند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، مقاومت در برابر سیکل ذوب و یخ نمونه‌های حاوی ژئولیت طبیعی ۳/۳۲ مرتبه افزایش یافته است.

مجدی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی ظرفیت مقاومتی سبکدانه اسکریا به منظور استفاده در بتن سبک سازه‌ای پرداختند. در این مطالعه، ظرفیت مقاومتی یکی از سبکدانه‌های طبیعی معمول ایران (اسکریا)، بررسی شد. نادری و همکاران (۱۳۹۱)، بتن‌های سبک ساخته شده با سه گونه سبکدانه شامل لیکا، پرلیت و پوکه معدنی اسکریا را ارزیابی کردند. با توجه به نتایج حاصل، نمونه‌های حاوی اسکریا دارای مقاومت فشاری بیشتری می‌باشند. حبیبی و همکاران (۱۳۹۱)، نشان دادند که با به کار بردن سبکدانه پوکه در بتن سبک به‌عنوان سنگدانه و ثابت نگه‌داشتن میزان سیمان و سایر مصالح مصرفی، ضمن کاهش وزن مخصوص بتن، در بیشتر موارد می‌توان به مقاومت فشاری مطلوبی دست یافت. اسماعیل نیا و همکاران (۱۳۹۳)، امکان استفاده از ژئولیت به‌عنوان یک پوزولان طبیعی و همچنین سنگدانه بازیافتی بتن به‌عنوان یک ماده بازیافتی در بتن خودتراکم را بررسی کردند. برای این منظور، از طرح اختلاط بهینه بتن خودتراکم بازیافتی استفاده شد و نقش جایگزینی درصد-های متفاوت از سیمان با ژئولیت بر خواص مقاومتی و مکانیکی آن بررسی گردید. براساس مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب کشسانی اندازه‌گیری شده، رابطه تجربی بین این پارامترها به دست آمد. تیموری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی، اثر اضافه کردن افزودنی-های پرلیت، لیکا، ژئولیت و پوکه معدنی به بتن متخلخل را بررسی کردند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق،

(۲۰۱۷)، عملکرد روسازی بتن متخلخل را ارزیابی کردند و بیان داشتند که بتن متخلخل به علت مقاومت کم در کاربرد گسترده دچار مشکل می‌شود. ایشان اقدام به ساخت بتن متخلخل با مقاومت زیاد کردند. براساس نتایج حاصل، مقدار مقاومت فشاری ۷ روزه این بتن برابر با ۶۱/۳۷ مگاپاسکال و ضریب نفوذپذیری برابر با ۱۳/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این نوع بتن متخلخل برای کاربرد گسترده است.

سبکدانه‌ها نوعی دانه با اندازه درشت و چگالی کم هستند که دارای ساختار متخلخل می‌باشند. نوع تخلخل موجود در این دانه‌ها و اندازه آن‌ها متفاوت می‌باشد. سبکدانه‌ها به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. سبکدانه‌های طبیعی از جمله پومیس، اسکریا و ژئولیت موادی هستند که به طور طبیعی دارای تخلخل خوبی هستند و تنها در فرایند تولید آن‌ها سنگ‌های این مواد خرد شده و به مصرف می‌رسند (تیموری، ۱۳۹۵). پومیس نوعی سنگ اسفنجی سبک وزن است که از فوران‌های آتشفشانی انفجاری به وجود می‌آید. این سنگ، به دلیل داشتن ویژگی‌هایی از جمله ساختمان حجره‌ای، وزن مخصوص ظاهری کم، عایق صدا و گرما و سبک وزنی در صنعت کاربردهای سودمندی دارد. کاربرد عمده پومیس و خاکسترهای آتشفشانی در صنعت راه سازی به عنوان مصالح روکش سطح جاده‌ها، ساخت و تعمیر و نگهداری جاده و شن‌ریزی راه آهن است (شرکت کانیار سبکدانه). اسکریا سبکدانه‌ای است که در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به محیط‌های آبی مانند دریاها، دریاچه‌ها و سرد شدن سریع ایجاد می‌شود. اسکریا دارای ویژگی‌های وزن مخصوص بسیار کم، درجه سختی و تخلخل زیاد می‌باشد (شکرچی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷). ژئولیت نیز یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده است. از جمله کاربردهای ژئولیت، تصفیه آب، حذف فلزات سنگین، پاک کننده لباس در صنعت، جذب رطوبت در زراعت، محوطه‌سازی و جذب آلودگی‌های نفتی می‌باشد (فروشگاه ایران ژئولیت؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۰).

در مورد کاربرد بتن متخلخل با مصالح سبک وزن، می‌توان به پژوهش‌های هریدی و تامای (۲۰۱۵) اشاره کرد.

مقرون به صرفه هستند. سبک‌دانه زئولیت از معادن استان سمنان تهیه شده است که قیمت هر تن آن ۲۵ هزار تومان می‌باشد. چگالی زئولیت استفاده شده برابر ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. زئولیت به رنگ سفید، زرد و سبز می‌باشد. بهترین انواع آن در شرق سمنان پراکنده‌اند. از آنجایی که زئولیت به شدت آب را جذب می‌کند، لذا دانه‌های آن به رطوبت حساسند. زئولیت، سبک و سطح آن صاف و بدون خاکه است. مقاومت مکانیکی این سبک‌دانه با توجه به سختی ۵/۵ - ۵ در اشل موس نسبتاً زیاد است و به آسانی در بین انگشتان یا با فشار خرد نمی‌شود. سبک‌دانه‌های پومیس و اسکریا از یک مصالح فروشی در سمنان تهیه گردیده که از معادن استان کردستان و تبریز ارسال شده‌اند و قیمت آن‌ها با هزینه حمل حدود ۶۰ هزار تومان برای هر تن می‌باشد. چگالی پومیس و اسکریای مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب برابر ۰/۵۸ و ۰/۹۱ گرم بر سانتی-متر مکعب می‌باشد. رنگ پومیس خاکستری مایل به سفید یا زرد اسیدی می‌باشد. پوکه معدنی اسکریا به رنگ خاکستری تیره که به قهوه‌ای می‌گراید و ظاهری شبیه به سنگ پا دارد. همچنین، نقطه ذوب پومیس و اسکریا برابر ۱۳۴۳ درجه سلسیوس می‌باشد. جدول ۲ نشان‌دهنده برخی مشخصات شیمیایی سبک‌دانه‌ها می‌باشد. اندازه سنگ‌دانه‌ها و سبک‌دانه‌های مصرفی بین ۴/۷۵ و ۹/۵ میلی‌متر است.

جایگزین کردن افزودنی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل می‌شود.

مطالعات گذشته حاکی از آن است که بتن متخلخل دارای توانایی خوبی در زمینه روسازی می‌باشد. در این راستا، استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به دلیل بهبود برخی از خصوصیات بتن و همچنین فراوانی و اقتصادی بودن آن‌ها مورد توجه است. نوع، کیفیت و مقدار این مصالح، بر خصوصیات بتن متخلخل بسیار تأثیر می‌گذارد. از این رو، هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی اثر جایگزینی سبک‌دانه‌های مختلف با سنگ‌دانه بتن متخلخل بر مقاومت فشاری و تخلخل نسبت به بتن متخلخل معمولی می‌باشد. رابطه تجربی مقاومت فشاری بر حسب درصد تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل نیز ارائه می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش، برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل و نمونه شاهد، از سیمان پرتلند تیپ ۵ (ضد سولفات) کارخانه سیمان تهران استفاده شد. مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۵ در جدول ۱ ارائه شده است. سنگ‌دانه مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است که از معادن استان سمنان تهیه گردید. سبک‌دانه‌های مورد استفاده شامل پومیس، زئولیت و اسکریا می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند و از نظر اقتصادی

جدول ۱. مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۵ کارخانه سیمان

تهران

مشخصات شیمیایی	میانگین (%)
$SiO_2$	$0.4 \pm 22.6$
$Al_2O_3$	$0.3 \pm 4.4$
$Fe_2O_3$	$0.3 \pm 4.4$
$CaO$	$0.5 \pm 63.1$
$MgO$	$0.2 \pm 1.7$
$SO_3$	$0.3 \pm 1.5$
$Na_2O$	$0.1 \pm 0.2$
$K_2O$	$0.1 \pm 0.5$



شکل ۲. سنگ دانه مصرفی برای ساخت نمونه بتن متخلخل

جدول ۲. برخی مشخصات شیمیایی سبک دانه‌ها

نوع افزودنی	درصد ترکیب							
	LOI	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
زئولیت	۱۲/۸۱	۰/۲۷	۱/۹۶	۰/۶۴	۲/۵۱	۱/۲	۱۱/۸۳	۶۵/۱۵
اسکریا	-	۱/۵۴	۳/۵۹	۵/۱۶	۸/۵۱	۷/۸۸	۱۰/۵۹	۵۰/۷۸
پومیس	۰/۶	۱/۷۹	۴/۶۳	۹/۵۸	۸/۴۳	۸/۰۷	۱۲/۴۹	۴۸/۳۷



زئولیت

اسکریا

پومیس

شکل ۳. سبک دانه‌های مورد استفاده

سبک دانه‌های پومیس، اسکریا و زئولیت با درصد‌های حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگ دانه گردید. در جدول ۳، طرح اختلاط نمونه‌های بتن متخلخل مشاهده می‌شود.

## ۲-۲. طرح اختلاط بتن متخلخل

در این تحقیق، طبق استاندارد ACI 211.3R، مقدار سنگ دانه و عیار سیمان به ترتیب برابر با ۱۳۳۰ و ۳۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل،

### ۲-۳. روش ساخت نمونه‌های بتن متخلخل مورد آزمایش

نمونه‌های بتن متخلخل در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان ساخته شدند. به منظور انجام آزمایش‌های مربوط به تخلخل، از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر و برای دقیق بودن آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر استفاده شد. برای جداسازی راحت بتن سخت شده از قالب، سطح داخلی قالب‌ها به وسیله روغن چرب گردید. مقادیر مصالح مصرفی در بتن مطابق طرح‌های اختلاط وزن گردید و سپس مصالح مصرفی در دستگاه مخلوط‌کن مکانیکی مخلوط شدند. پس از اختلاط کامل، بتن به داخل قالب‌ها ریخته شد و در ۳ لایه با کوبه استاندارد، هر لایه با ۲۵ ضربه، متراکم گردید. همچنین، سطح قالب به کمک ماله بنایی صاف گردید. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب بیرون آورده شده و برای عمل‌آوری به حوضچه آب منتقل گردیدند. دوره عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب به دلیل استفاده از سیمان تیپ ۵، برابر ۴۲ روز می‌باشد. در شکل ۴، تصویری از روند ساخت نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳. طرح اختلاط بتن متخلخل با مقدار سنگ‌دانه و سیمان برابر ۱۳۳۰ و ۳۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۳۸

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد حجمی
شاهد	C	۰
پومیس	Pu-25	۲۵
پومیس	Pu-50	۵۰
پومیس	Pu-75	۷۵
پومیس	Pu-100	۱۰۰
اسکریا	S-25	۲۵
اسکریا	S-50	۵۰
اسکریا	S-75	۷۵
اسکریا	S-100	۱۰۰
زئولیت	Z-25	۲۵
زئولیت	Z-50	۵۰
زئولیت	Z-75	۷۵
زئولیت	Z-100	۱۰۰



شکل ۴. روند ساخت نمونه‌های بتن متخلخل

به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد قرار داده تا خشک شوند و سپس با استفاده از جک بارگذاری (شکل ۵) موجود در آزمایشگاه تکنولوژی بتن، مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

### ۲-۴. آزمایش مقاومت فشاری

طبق استاندارد BS 1881، برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر استفاده شد. پس از عمل‌آوری ۴۲ روزه نمونه‌ها، آن‌ها را



شکل ۶. ترازوی ارشمیدس

### ۲-۶. تحلیل آماری

به منظور تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شده است. طرح آماری به کار برده شده، بلوک-های کاملاً تصادفی می‌باشد. در مواردی که ماده آزمایشی یکنواخت نبوده و دارای تغییرات یک جهته باشد، اگر این تغییرات در نظر گرفته نشود دقت طرح کاهش یافته و خطای آزمایش افزایش می‌یابد. به همین دلیل از طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی استفاده می‌شود. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ۵٪ انجام شده است.

### ۳. نتایج و بحث

نمودار تغییرات درصد تخلخل برای نمونه‌های بتن متخلخل شاهد و حاوی سبک‌دانه‌های مختلف در شکل ۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که با جایگزین کردن سبک‌دانه‌های مختلف، تخلخل نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، وجود خلل و فرج در سبک‌دانه‌ها است. با توجه به این نمودار، نمونه Pu-100 دارای بیشترین درصد تخلخل نسبت به دیگر نمونه‌های بتن متخلخل و نمونه شاهد می‌باشد. تخلخل این نمونه نسبت به نمونه شاهد ۵۵/۹۵ درصد افزایش یافته است. کمترین افزایش تخلخل نسبت به نمونه شاهد (۱/۰۹ درصد) مربوط به نمونه S-25 می‌باشد. همچنین، با توجه به شکل ۷، نمونه‌های شامل درصد‌های مختلف



شکل ۵. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

### ۲-۵. آزمایش تخلخل

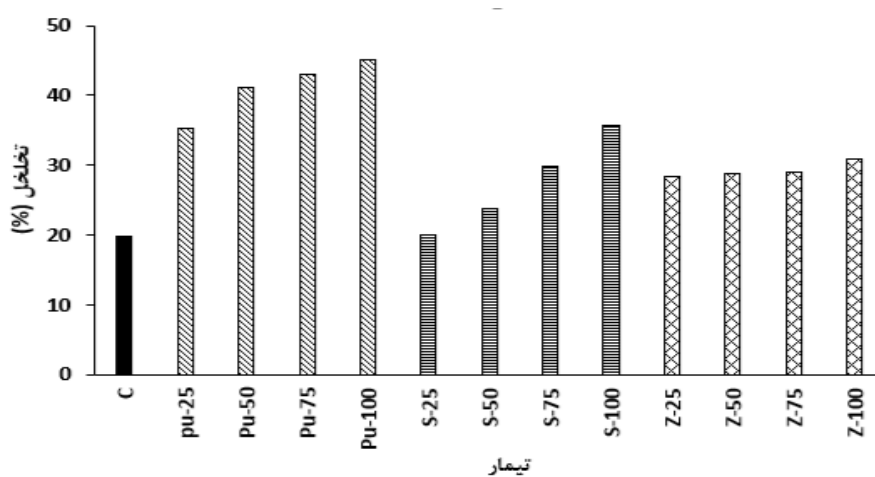
برای اندازه‌گیری درصد تخلخل نمونه‌ها، از استاندارد ASTM c1745/1754M-12 استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا هر نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس، با توزین آن، وزن خشک ( $W_2$ ) محاسبه شد. برای به دست آوردن وزن غوطه‌وری، از ترازوی ارشمیدس استفاده گردید که در شکل ۶ نشان داده شده است. ابتدا نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در داخل ظرف آب قرار گرفت و به بدنه ظرف آب ۱۰ ضربه زده شد و وزن غوطه‌وری ( $W_1$ ) به دست آمد. در نهایت، با استفاده از رابطه (۱) تخلخل نمونه محاسبه گردید.

$$A_t = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w V}\right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه،  $A_t$  تخلخل کل (درصد)،  $V$  حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب)،  $\rho_w$  دانسیته آب در دمای  $21^\circ\text{C}$  (گرم بر سانتی‌متر مکعب)،  $W_2$  وزن نمونه خشک (گرم) و  $W_1$  وزن نمونه در آب (گرم) می‌باشد.

<sup>1</sup> Least Significant Difference

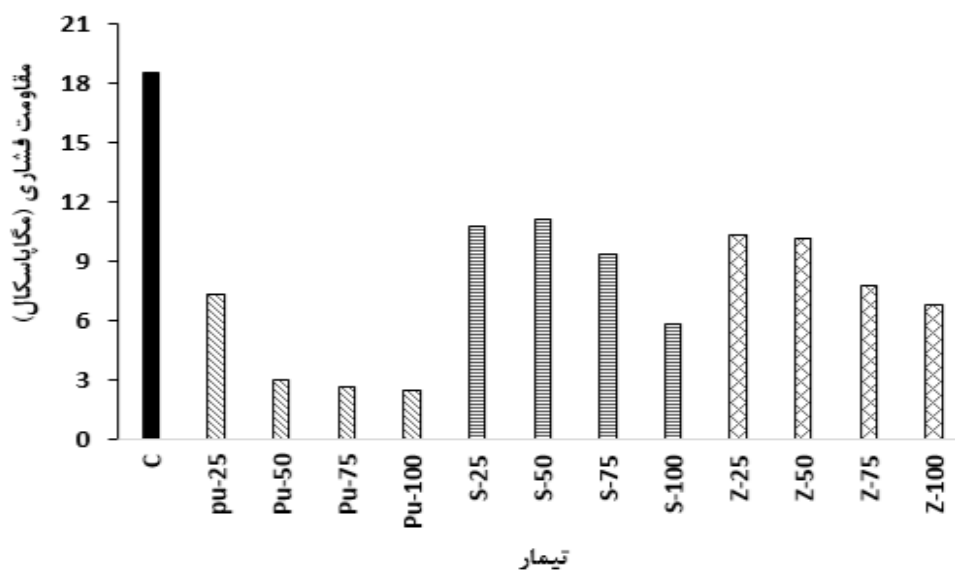
زئولیت دارای تغییرات نسبتاً یکسان درصد تخلخل می- باشند. ولی در نمونه‌های شامل سبک‌دانه اسکریا، با افزایش درصد جایگزینی اسکریا، میزان درصد تخلخل نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه تغییرات درصد تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سبک‌دانه

مخصوص پومیس از اسکریا و زئولیت کمتر است (۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، نمونه‌های حاوی پومیس دارای بیشترین کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می‌باشند. کمترین کاهش مقاومت نمونه بتن متخلخل نسبت به نمونه شاهد (۴۰/۲۳ درصد) نیز مربوط به نمونه S-50 می‌باشد.

در شکل ۸، نمودار تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سبک‌دانه‌های مختلف و نمونه شاهد آورده شده است. با توجه به این نمودار، با جایگزینی سبک‌دانه‌های پومیس، زئولیت و اسکریا، به دلیل وزن مخصوص کم آن‌ها و حفرات موجود در ساختمان سبک‌دانه‌ها، مقاومت نمونه‌های بتن متخلخل نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. با توجه به این که وزن



شکل ۸. مقایسه تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سبک‌دانه



برای نمونه‌های با تخلخل بیشتر از ۳۰٪ به مقاومت کمتر از ۱۰ مگاپاسکال رسیدند. همچنین، با توجه به نمودار، در نمونه‌های حاوی زئولیت، با افزایش درصد جایگزینی زئولیت با سنگدانه بتن متخلخل، درصد تخلخل نمونه‌ها نزدیک به یکدیگر است و نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. با افزایش درصد زئولیت، کاهش بیشتری در مقاومت مشاهده می‌شود که با نتایج تحقیق تیموری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. ایشان در پژوهش خود، افزودنی زئولیت را با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین سنگدانه کردند و به نتیجه کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی زئولیت دست یافتند.

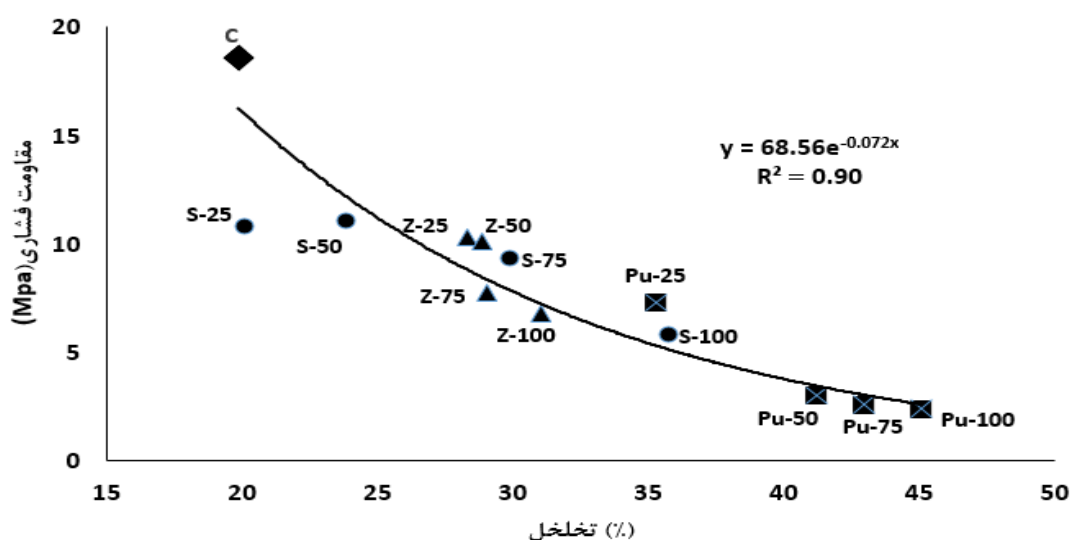
در نهایت، از برازش مقادیر مقاومت فشاری و درصد تخلخل نمونه‌ها (شکل ۹)، معادله تجربی (۲) به دست آمده است. این معادله با ضریب تبیین ۰/۹، دارای دقت مناسبی می‌باشد.

$$y = 68.56e^{-0.072x} \quad (2)$$

در این رابطه،  $y$  مقاومت فشاری بر حسب مگا پاسکال و  $x$  درصد تخلخل می‌باشد.

نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل برحسب درصد تخلخل در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که نمونه شاهد (C) دارای بیشترین مقاومت فشاری (۱۸/۵۴ MPa) و کمترین تخلخل (۱۹/۸۴ درصد) می‌باشد. به دلیل خلل و فرج موجود در ساختمان سبک‌دانه‌ها، با افزایش درصد جایگزینی آن‌ها، درصد تخلخل نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و در نتیجه به دلیل وزن مخصوص کم سبک‌دانه‌های جایگزین شده و افزایش حفرات، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار، نمونه‌های S-25 و S-50 دارای بیشترین مقاومت فشاری می‌باشند که به ترتیب برابر با ۱۱/۰۸ و ۱۰/۷۶ مگاپاسکال است و میزان تخلخل آن‌ها به ترتیب برابر ۲۳/۸ و ۲۰/۰۶ درصد می‌باشد.

با جایگزینی پومیس در ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگدانه، ملاحظه می‌شود که برای جایگزینی بیش از ۲۵٪، شیب نمودار کاسته شده و نمونه‌ها از نظر مقاومتی و تخلخل دارای مقادیر نزدیک به هم می‌شوند. تخلخل نمونه‌های پومیس بیشتر از ۳۵٪ می‌باشد و تمامی مقاومت‌های مربوط به نمونه‌های حاوی پومیس کمتر از ۸ مگاپاسکال می‌باشد که با نتایج تحقیق ایوکی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد. ایشان در پژوهش خود



شکل ۹. نمودار مقاومت فشاری بر حسب تخلخل

نتایج تجزیه واریانس برای پارامترهای مقاومت فشاری و درصد تخلخل به روش LSD در سطح اطمینان ۹۵٪ به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. در این جداول، مقدار F برای نمونه‌ها و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌ها وجود دارد. ضریب همبستگی برای تمامی پارامترها بیش از ۰/۹۸ است که حاکی از وجود رابطه خطی بین نمونه‌ها است.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۱۲	۶۹۵/۰۰۲۱	۵۷/۹۱	۲۲۱/۶۰	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۷۰۰۳	۰/۳۵۰۱	۱/۳۴	۰/۲۸۰۸	-	-
خطا	۲۴	۶/۲۷۲۶	۰/۲۶۱۳	-	-	۶/۲۸۱۹	۰/۹۹۱۰
کل	۳۸	۷۰۱/۹۷۵۱	-	-	-	-	-

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس درصد تخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۱۲	۲۴۴۶/۳۳۶۰	۲۰۳/۸۶۱۳	۱۲۹/۳۸	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۶/۰۴۱۶	۳/۰۲۰۸	۰/۱۶۸۹	۱/۹۲	-	-
خطا	۲۴	۳۷/۸۱۷۳	۱/۵۷۵۷	-	-	۳/۹۸۲۶	۰/۹۸۴۸
کل	۳۸	۲۴۹۰/۱۹۵۰	-	-	-	-	-

همچنین، از لحاظ میانگین درصد تخلخل، نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سبک‌دانه اسکریا، با درصد‌های جایگزینی متفاوت، دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر و با دیگر نمونه‌های بتن متخلخل می‌باشند. نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف ژئولیت نیز از لحاظ میانگین درصد تخلخل نزدیک به هم هستند و اختلاف معنی‌داری ندارند. نمونه‌های حاوی سبک‌دانه پومیس از لحاظ میانگین درصد تخلخل، دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌های بتن متخلخل می‌باشند و نمونه Pu-100 بیشترین میانگین تخلخل (۴۵/۰۳ درصد) را دارا می‌باشد.

جدول ۶ مقایسه میانگین پارامترهای مقاومت فشاری و درصد تخلخل را به روش LSD در سطح ۵٪ نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، از لحاظ میانگین مقاومت فشاری، در اکثر نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف، اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. نمونه S-50، در سطح اطمینان ۹۵٪، از نظر مقاومتی، عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، که دارای میانگین مقاومت فشاری ۱۱/۰۸ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه‌های Pu-50، Pu-75 و Pu-100 از نظر پارامتر مقاومت فشاری نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند و نزدیک به هم هستند که به دلیل وزن مخصوص کم سبک‌دانه پومیس، دارای کمترین میانگین مقاومت فشاری می‌باشند.

جدول ۶. مقایسه میانگین پارامترهای مقاومت فشاری و درصد تخلخل در نمونه‌های مختلف

نمونه	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	میانگین درصد تخلخل
C	۱۸/۵۳ <sup>a</sup>	۱۹/۸۴ <sup>g</sup>
Pu-25	۷/۳۲ <sup>ef</sup>	۳۵/۲۱ <sup>c</sup>
Pu-50	۲/۹۹ <sup>h</sup>	۴۱/۲۳ <sup>b</sup>
Pu-75	۲/۶۰ <sup>h</sup>	۴۲/۹۲ <sup>ab</sup>
Pu-100	۲/۴۱ <sup>h</sup>	۴۵/۰۳ <sup>a</sup>
S-25	۱۰/۷۶ <sup>bc</sup>	۱۹/۱۱ <sup>g</sup>
S-50	۱۱/۰۸ <sup>b</sup>	۲۳/۸۰ <sup>f</sup>
S-75	۹/۲۹ <sup>d</sup>	۲۹/۸۲ <sup>de</sup>
S-100	۵/۷۹ <sup>g</sup>	۳۵/۷۱ <sup>c</sup>
Z-25	۱۰/۲۹ <sup>bc</sup>	۲۸/۲۷ <sup>e</sup>
Z-50	۱۰/۱۳ <sup>dc</sup>	۲۸/۸۰ <sup>e</sup>
Z-75	۷/۷۷ <sup>e</sup>	۲۸/۹۹ <sup>e</sup>
Z-100	۶/۷۹ <sup>f</sup>	۳۰/۹۷ <sup>d</sup>

در هرستون، میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، فاقد اختلاف معنی‌دار به روش LSD در سطح ۵٪ می‌باشند.

### نتیجه‌گیری

- بیشترین میانگین درصد تخلخل در نمونه Pu-100 مشاهده شد (۴۵/۰۳ درصد) که نسبت به تخلخل نمونه شاهد ۵۵/۹۵ درصد افزایش یافته است.

- بیشترین میانگین مقاومت فشاری در نمونه‌های S-50 و S-25 مشاهده شد (به ترتیب ۱۱/۰۸ و ۱۰/۷۶ مگاپاسکال). کمترین میانگین مقاومت فشاری (۲/۴۱ مگاپاسکال) مربوط به نمونه Pu-100 است.

- کمترین میانگین تخلخل (۲۰/۰۶ درصد) مربوط به نمونه S-25 می‌باشد، که تخلخل آن نسبت به نمونه شاهد ۱/۰۹ درصد افزایش یافته است.

- با مشاهده نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های حاوی ژئولیت و اسکریا از نظر مقاومت فشاری عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی پومیس دارند.

- از برآزش مقادیر مقاومت فشاری و درصد تخلخل نمونه‌ها، رابطه‌ای تجربی ارائه گردید. پیشنهاد می‌گردد با ساخت چند نمونه آزمایشی، رابطه ارائه شده مورد صحت-سنجی قرار گیرد. سپس، می‌توان برای نمونه‌های بتن متخلخل با سبک‌دانه و تخلخل متفاوت، مقاومت فشاری را محاسبه نمود.

در این پژوهش، به دلیل صرفه اقتصادی و ساختار متخلخل سبک‌دانه‌های پومیس، اسکریا و ژئولیت، از آن‌ها در ساخت بتن متخلخل به عنوان جایگزین سنگ‌دانه استفاده شده است. این امر علاوه بر کاهش حجم رواناب شهری، باعث تقویت سفره‌های آب زیرزمینی نیز می‌شود. نتایج به‌دست آمده عبارت‌اند از:

- با جایگزینی سبک‌دانه‌های پومیس، اسکریا و ژئولیت در ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگ‌دانه، مقاومت فشاری نمونه‌ها، به دلیل خلل و فرج موجود در ساختمان سبک‌دانه، کاهش می‌یابد.

- با توجه به مقاومت فشاری کم نمونه‌های بتن متخلخل حاوی افزودنی، می‌توان از این بتن در مناطقی با بار ترافیکی کم همانند پارکینگ‌ها، پیاده‌روها، گلخانه‌ها، محوطه‌سازی پارک‌ها، شانه جاده‌ها و پوشش روسازی باند فرودگاه‌ها استفاده کرد.

- به دلیل تخلخل زیاد نمونه‌های بتن متخلخل حاوی سبک‌دانه، این نوع بتن برای کاهش حجم رواناب شهری مناسب است.

## ۵. مراجع

- اسماعیل‌نیا، م. و فریدی، م. ۱۳۹۳. "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی در بتن خودتراکم حاوی سنگ‌دانه بازیافتی و زئولیت طبیعی". تحقیقات بتن، (۱)۷: ۷-۲۲.
- تیموری، ا.، موسوی، س. ف.، کرمی، ح.، فرزین، س. و جواهری طهرانی، م. ۱۳۹۵. "بررسی آزمایشگاهی اثر اضافه کردن افزودنی‌های مختلف بر ویژگی بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب شهری". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، (۲)۵۱: ۶۵-۵۱.
- تیموری، ا. ۱۳۹۵. "بهبود کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب و رواناب شهری با استفاده از بتن متخلخل به همراه افزودنی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان.
- حبیبی، ع.، وزیری، ا. و محمدی، ا. ۱۳۹۱. "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با پوک معدنی منطقه کردستان". تحقیقات بتن، (۲)۵: ۳۳-۴۴.
- حسین‌زاده حجازی، س. ا. ۱۳۹۰. "بررسی آزمایشگاهی دوام روسازی‌های بتن متخلخل". پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران- راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- خسروی، ا.، اسم حسینی، م.، خضری، س. و حبیبی مهر، م. ۱۳۹۰. "حذف فلزات سنگین دوظرفیتی (کادمیم، کبالت، روی و سرب) و آمونیوم از پساب‌ها با استفاده از زئولیت طبیعی استان آذربایجان غربی". مجله اندیشه علوم- شیمی کاربردی، (۲۰)۶: ۶۱-۷۴.
- شکرچی زاده، م.، فرزانه‌پور، م.، علی لیبر، ن. و ناصری، ع. ۱۳۸۷. "بررسی کاربرد سبک‌دانه طبیعی اسکریا در بتن سبک سازه‌ای". نشریه داخلی انجمن بتن ایران، (۳۱)۷.
- مجدی، ع.، شکرچی‌زاده، م.، جعفری، ا.، علی لیبر، ن. و ناصری، ع. ۱۳۹۰. "بررسی ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه اسکریا به‌منظور کاربرد در بتن سبک‌دانه سازه‌ای". اولین کنفرانس ملی بتن سبک، ص ۲۶۳-۲۷۳.
- نادری، م. و بنیادی، ع. ۱۳۹۱. "مقایسه طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن‌های سبک ساخته شده با سبک‌دانه‌های لیکا، اسکریا و پرلیت با استفاده از روش پیچش". نشریه مهندسی عمران فردوسی، (۲)۲۳: ۷۱-۹۰.
- ACI Committee 522R-10. 2010. "Pervious Concrete". American Concrete Institute.
- ACI Committee 211. 2006. "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete". ACI 211.3R Report.
- Aoki, Y., Sri Ravindrarajah, R., and Khabbaz, H. 2009. "Environmentally Friendly Sustainable Pervious Concrete". Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Taylor and Francis Group.
- ASTM C1754.C1754M-12. 2012. "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete". ASTM International, USA.
- British Standard, Testing Concrete, 1983. "Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete". BS 1881, Part 108.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V. and Netinger, I. 2015. "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete". Constr. Build. Mater., 78: 69-76.
- Gaedicke, C., Marines, A. and Miankodila, F. 2014. "A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete". Constr. Build. Mater., 52: 494-503.
- Hariyadi and Tamai, H. 2015. "Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate". Proc. Eng., 125: 732-738.
- Henderson, V. 2012. "Evaluation of the performance of pervious concrete pavement in the Canadian climate". Ph.D Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Joshaghani, A., Ramezani-pour, A. A., Atefi, O. and Golroo, A. 2015. "Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method". Constr. Build. Mater., 101: 317-325.
- Kim, I. T., Park, C., Kim, S. and Cho, Y. H. 2015. "Evaluation of field applicability of pervious concrete materials for airport pavement cement treated drainage base course". Mater. Res. Innov., 19(sup8), S8-378-S8-388.
- Korhonen, C. J. and J. J. Bayer. 1989, "Porous Portland Cement Concrete as an Airport Runway Overlay". Special Report 89-12, U.S.Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N. H., 20 p.

- Kurt, M., Gül, M. S., Gül, R., Aydin, A. C. and Kotan, T. 2016. "The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete". *Constr. Build. Mater.*, 103: 36-46.
- Li, J., Zhang, Y., Liu, G. and Peng, X. 2017. "Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement". *Constr. Build. Mater.*, 138: 479-485.
- Nagrockienė, D., Girskas, G. and Skripkiūnas, G. 2017. "Properties of concrete modified with mineral additives". *Constr. Build. Mater.*, 135: 37-42.
- [www.Iranzeolite.com](http://www.Iranzeolite.com)
- [www.Kaniarsabokdane.ir](http://www.Kaniarsabokdane.ir)
- Yang, J. and Jiang, G. 2003. "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials". *Cement and Concrete Res.*, 33(3): 381-386.
- Zaetang, Y., Wongsu, A., Sata, V. and Chindaprasirt, P. 2013. "Use of lightweight aggregates in pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 48: 585-591.

