ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

مجله علمی پژوهش در مهندسی عمران و معماری ایران (سال چهارم)
شماره ۱۳ / تابستان ۱۳۹۸ / ص ۳۳-۲۴

بهبود خواص فیزیکی بتن متخلخل با استفاده افزودن پوکه معدنی و زئولیت به طرح اختلاط پایه

امین فلامکی[۱]، مرجان سالاری[۲]، مریم حسینی خیرآباد[۳]، احسان تیموری[۴]

[۱] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

[۲] دکترای عمران محیط زیست، دانشگاه شیراز.

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- ژئو تکنیک، دانشگاه پیام نور شیراز.

[۴] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه سمنان.

نام نویسنده مسئول:
مرجان سالاری

چکیده

بتن متخلخل دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی است. از مزایای اقتصادی آن می‌توان به کم شدن هزینه‌ها به‌منظور هدایت آب باران و تصفیه مقدماتی فاضلاب اشاره داشت. جلوگیری از آب‌گرفتگی در معابر، آلوده شدن آب بارندگی‌ها و پر شدن ذخایر آب زیرزمینی از جمله مزایای زیست‌محیطی بتن متخلخل می‌باشد. در تحقیق حاضر، علاوه بر افزودن ۲۰٪ وزنی سنگدانه، ریزدانه به بتن متخلخل، از افزودنی‌های پوکه معدنی و زئولیت که توانایی بالایی در جذب آلاینده‌ها دارند در بتن متخلخل استفاده شد تا علاوه بر کاهش جریان رواناب در سیستم معابر شهری تأثیر مثبتی بر کیفیت رواناب نیز داشته باشد. مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) و درصد تخلخل که فاکتورهای مهمی برای استفاده بتن متخلخل در معابر شهری می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی زئولیت از مقاومت فشاری و نمونه‌های حاوی پوکه معدنی از تخلخل و نفوذپذیری بیشتری برخوردار هستند. بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های زئولیت بدون ریزدانه و حاوی ۲۰٪ ریزدانه به ترتیب در تیمارهای Z5-0 و Z15-20 مشاهده شد که ۱۹/۹ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت داشتند.

واژگان کلیدی: بتن متخلخل، مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، تخلخل، زئولیت، پوکه معدنی.

پژوهش در مهندسی عمران و معماری ایران ، شماره ۱۳، تابستان ۱۳۹۸، ص ۳۳- ۲۴

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

مقدمه

بتن متخلخل نوعی بتن با تخلخل بالاست که شامل سیمان، آب و سنگ‌دانه است. با این تفاوت که ریزدانه در این نوع بتن یا حذف می‌شود و یا کاهش می‌یابد. اگرچه بتن متخلخل از اواسط قرن ۱۹ وجود داشته، اما از سال ۱۹۸۰ در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در ایالات متحده امریکا و ژاپن، مورد استفاده قرارگرفته است. این نوع بتن به دلیل سازگاری با محیط‌زیست جایگزین مناسبی نسبت به سیستم روسازی آسفالتی و بتن معمولی است [1]. درجه تخلخل بتن برای روسازی و کاربردهای دیگر حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد است (۱۸). استفاده از بتن متخلخل در معابر، یکی از کارآمدترین روش‌های کنترل و ذخیره رواناب، مدیریت و هدایت آب‌های سطحی به سوی سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد [2].

بتن متخلخل به‌طور مرسوم در پارکینگ‌ها، مناطقی با ترافیک کم، پیاده‌رو و گلخانه مورداستفاده قرار می‌گیرد و با کاهش رواناب موجب کاهش نیاز به تأسیسات جداگانه‌ای برای کنترل رواناب و سیلاب می‌شود [3]. روسازی بتن متخلخل، که بتن نفوذپذیر نیز نامیده می‌شود، به‌عنوان یک راه‌حل مورد استفاده برای کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب به داخل زمین و بالا آوردن سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود [4].

از مزایای بتن متخلخل می‌توان به کاهش سروصدای وسایل نقلیه، کاهش بار آلودگی رواناب، کاهش حجم رواناب و جلوگیری از وقوع سیلاب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و بهبود شرایط ایمنی (ضریب اصطکاک) اشاره کرد. در شکل ۱ نمونه‌ای از بتن متخلخل آورده شده است که نشان می‌دهد چگونه آب به راحتی از آن عبور می‌کند.

شکل ۱: نمونه‌ای از بتن متخلخل

مقاومت این نوع بتن از بتن معمولی کمتر است، که دلیل اصلی آن وجود فضای خالی زیاد در ساختمان آن است. بنابراین، استفاده از این نوع بتن در روسازی با ترافیک متوسط و کم، مناسب خواهد بود. چهار دلیل اصلی برای توجیه مقاومت کم بتن متخلخل عبارت‌اند از: کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگ‌دانه‌ها به دلیل نبود ریزدانه، ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگ‌دانه، سطح چسبندگی پایین به دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم و وجود حفرات زیاد [5].

پوکه معدنی قدیمی‌ترین سبک‌دانه‌ای است که در اثر ورود مواد مذاب آتش‌فشانی به محیط‌های آبی مانند دریاها و دریاچه‌ها و سرد شدن سریع ایجاد می‌شود. رنگ آن سیاه، خاکستری روشن و قهوه‌ای تیره می‌باشد. به دلیل سرد شدن سریع مواد مذاب، حباب‌های نسبتاً درشتی در آن ایجاد می‌شود که گاهی اوقات به‌هم‌پیوسته و تا سطح سنگ‌دانه امتداد یافته‌اند [6].

زئولیت‌ها فراوان‌ترین رزین‌های معدنی هستند که بیش از ۴۰ نوع طبیعی و ۱۵۰ نوع مصنوعی آن وجود دارد. زئولیت‌ها، آلومینوسیلیکات‌هایی هستند که ساختار اسکلت سه‌بعدی آن‌ها از چهاروجهی‌هایی تشکیل شده که مرکز آن با اتم‌های سیلیسیم یا آلومینیم اشغال شده و اتم اکسیژن در چهار رأس آن قرارگرفته است. زئولیت یکی از پوزولان‌های طبیعی است که در ایران به‌وفور یافت می‌شود و به‌راحتی قابل استخراج و فرآوری است. وجود زئولیت در مناطقی از سمنان، میانه، ورامین، رودهن، طالقان و کرمان گزارش شده است. زئولیت‌ها به دلیل ویژگی‌های خاص خود از جمله توان تبادل یونی، چگالی پایین و روزنه‌های فراوان، امروزه کاربرد گسترده‌ای در فناوری پیدا کرده‌اند [7]. تحقیقات انجام شده روی تأثیر زئولیت بر بتن نشان می‌دهد که این ماده می‌تواند از آب‌اندازی و جداشدگی بتن تازه جلوگیری کند و سبب افزایش مقاومت بتن شود [8].

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

در گذشته، محققین از انواع مواد معدنی و آلی برای کاهش بار آلودگی آب استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به زئولیت‌های طبیعی، خاک اره، خاکستر، پوسته برنج و پوسته درخت اکالیپتوس اشاره کرد [9 and 10].

آزاد و همکاران [11] در سال ۲۰۱۸، از جاذب‌های ورمیکولیت و کوارتز برای بهبود کیفیت رواناب شهری در بتن متخلخل استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزودن ۳۰٪ جاذب به بتن متخلخل، کیفیت رواناب شهری برای پارامترهای مواد جامد معلق کل (TSS)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و کدورت از ۴۵، ۱۴ و ۵۴٪ در نمونه شاهد به ۸۵، ۴۳ و ۷۶٪ و برای جاذبورمیکولیت و ۷۸، ۴۵ و ۸۴٪ برای جاذب کوارتز افزایش یافت که این امر اهمیت استفاده از جاذب‌ها در بتن متخلخل را نشان می‌دهد.

مجدی و همکاران [12]، در سال ۱۳۹۰، به بررسی ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه اسکریا به‌منظور کاربرد در بتن سبک سازه‌ای پرداختند. در این تحقیق، ظرفیت مقاومتی یکی از سبک‌دانه‌های طبیعی معمول ایران (اسکریا)، بررسی و با نتایج تحقیقات قبلی در باره ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه پومیس، مقایسه گردید. منحنی نتایج نهایی نشان داد که سبک‌دانه اسکریا نسبت به سبک‌دانه پومیس از ظرفیت مقاومتی بالاتری برخوردار است.

احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [13]، حبیبی و همکاران در سال ۱۳۹۱ [14]، و سقائیان‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۱ [15]، به بررسی عملکرد جاذب‌های مختلف از جمله زئولیت، پوکه معدنی و سرباره بر روی کارایی بتن متخلخل پرداختند که نتایج تحقیقات آنها نشان از اثرات مثبت استفاده از جاذب داشت.

اسماعیل نیا و همکاران [8]، در سال ۱۳۹۳، در پژوهشی، امکان استفاده از زئولیت به‌عنوان یک پوزولان طبیعی و همچنین سنگ‌دانه بازیافتی بتن به‌عنوان یک ماده بازیافتی در بتن خودمتراکم را بررسی کردند. برای این منظور از طرح اختلاط بهینه بتن خودمتراکم بازیافتی استفاده شد و نقش جایگزینی درصدهای متفاوت از سیمان با زئولیت بر خواص مقاومتی و مکانیکی آن ارزیابی شد.

خدادوست گمچی و همکاران [2]، در سال ۱۳۹۴، به بررسی تأثیر کاربرد بتن متخلخل در معابر عمومی شهری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر احیای دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که بتن نفوذپذیر ساخته شده از سنگ‌دانه‌هایی با اندازه یکسان دارای نفوذپذیری بالایی می‌باشد؛ ولی مقاومت آن کافی نیست. اضافه کردن مقدار کمی ماسه (تقریباً ۷٪ وزن کل سنگ‌دانه‌ها) به مخلوط، مقاومت بتن را افزایش داده و در عین حال نفوذپذیری آن حفظ می‌شود.

یوساک و همکاران [16]، در سال ۲۰۱۵، در پژوهشی، ۵ روش مختلف عمل‌آوری روسازی بتن متخلخل را مقایسه کردند و خواصی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و استحکام خمشی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. کوسیک و همکاران [1]، در سال ۲۰۱۵، پژوهشی در زمینه تأثیر نوع و سایز سنگ‌دانه بر خواص بتن متخلخل انجام دادند. نتایج نشان داد که بتن متخلخل ساخته شده با سنگ‌دانه‌های دولومیت، تخلخل بالاتری نسبت به بتن متخلخل ساخته شده از سنگ‌دانه‌های سرباره فولاد دارد.

تامای و هریادی [17]، در سال ۲۰۱۵، به بررسی بهبود عملکرد بتن متخلخل با استفاده از پوکه معدنی پرداختند. در این تحقیق، اثر استفاده از پوکه معدنی جایگزین سنگ‌دانه در بتن متخلخل برای تخمین مقاومت فشاری، استحکام خمشی، تغییرات چگالی و تخلخل استفاده شده است. همچنین، رابطه‌ای بین پارامترهای ذکر شده به‌دست آمده و با نتایج حاصل از دیگر تحقیق‌ها در این زمینه و استاندارد ACI مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که استفاده از پوکه معدنی در ترکیب بتن متخلخل باعث افزایش تخلخل و کاهش مدول الاستیسیته می‌شود. علاوه بر این، استفاده از پوکه معدنی باعث مقاومت کششی بالاتر بتن متخلخل نسبت به استاندارد ACI شد. زیتنگ و همکاران [18]، در سال ۲۰۱۶، تحقیقاتی درزمینه خواص بتن متخلخل شامل سنگ‌دانه‌های از جنس سنگ آهک طبیعی به‌عنوان جایگزینی با بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی انجام دادند.

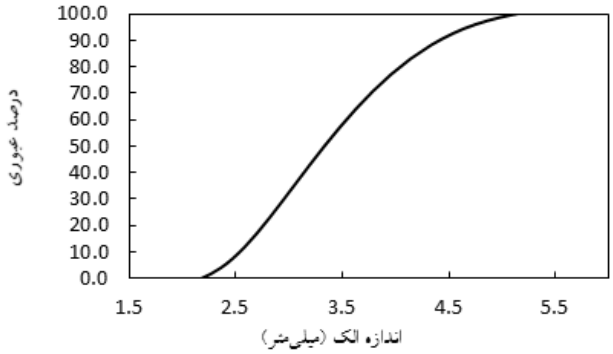
با توجه به مطالعات گذشته استفاده از جاذب‌های معدنی با توجه به فراوانی و صرفه اقتصادی که دارند بسیار مورد توجه هستند. از این رو، در این پژوهش به بررسی اثر بتن متخلخل حاوی جاذب‌های پوکه معدنی و زئولیت بر پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) و درصد تخلخل نسبت به بتن معمولی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق، از جاذب‌های معدنی زئولیت و پوکه معدنی به‌عنوان افزودنی در بتن متخلخل استفاده گردید. مصالح مصرفی از معادن موجود در استان سمنان تهیه گردید. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۵ می‌باشد که از کارخانه سیمان تهران تهیه شد که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق از دانه‌بندی پیشنهادی در ACI 211/3R برای ساخت بتن متخلخل استفاده شد [19]. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی آورده شده است. افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای اندازه ۰/۶ تا ۱/۲ میلی‌متر بودند. در جدول ۲ برخی مشخصات شیمیایی افزودنی‌های مصرفی آورده شده است.

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۵

ترکیبات	Si_2O_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
درصد وزنی	۲۰/۶۸	۴/۴۸	۴/۶۲	۶۲/۱۲	۳/۱۱	۱/۹۱	۰/۶۶	۰/۳۷

جدول ۲: برخی مشخصات شیمیایی جاذب‌های مصرفی

نوع افزودنی	درصد ترکیب							
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	P2O5	LOI
زئولیت	۶۵/۱۵	۱۱/۸۳	۱/۲	۲/۵۱	۰/۶۴	۱/۹۶	۰/۲۷	۱۲/۸۱
پوکه معدنی	۴۸/۳۷	۱۲/۴۹	۸/۰۷	۸/۴۳	۹/۵۸	۴/۳۶	۱/۷۹	۰/۶

طرح اختلاط بتن

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل با توجه به آیین‌نامه ACI211.3R، یک طرح اختلاط پایه انتخاب گردید. در این تحقیق، مقدار سنگ‌دانه و عیار سیمان به ترتیب ۱۴۰۰ و ۳۴۰ کیلوگرم در متر مکعب به‌طور ثابت در نظر گرفته شد. همچنین، نسبت آب به سیمان (W/C) برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۳۸ بود. برای ساخت بتن متخلخل حاوی افزودنی، جاذب‌ها با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سنگ‌دانه شدند و نمونه‌ها بدون ریزدانه و حاوی ۲۰ درصد ریزدانه هستند. جدول ۳ نشان‌دهنده طرح اختلاط نمونه‌های حاوی افزودنی می‌باشد.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن متخلخل

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد ریزدانه	درصد وزنی افزودنی
شاهد (صفر)	C-0	۰	۰
زئولیت ۰-۵	*Z5-0	۰	۵
زئولیت ۰-۱۰	Z10-0	۰	۱۰
زئولیت ۰-۱۵	Z15-0	۰	۱۵
پوکه معدنی ۰-۵	Pu5-0	۰	۵
پوکه معدنی ۰-۱۰	Pu10-0	۰	۱۰
پوکه معدنی ۰-۱۵	Pu15-0	۰	۱۵
شاهد (۲۰)	C-20	۲۰	۰
زئولیت ۲۰-۵	Z5-20	۲۰	۵
زئولیت ۲۰-۱۰	Z10-20	۲۰	۱۰
زئولیت ۲۰-۱۵	Z15-20	۲۰	۱۵

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

پوکه معدنی ۱۰-۵	Pu5-20	۲۰	۵
پوکه معدنی ۱۰-۱۰	Pu10-20	۲۰	۱۰
پوکه معدنی ۱۰-۱۵	Pu15-20	۲۰	۱۵

*عدد بعد از خط تیره نشان دهنده درصد ریزدانه و عدد چسبیده به حرف انگلیسی، درصد افزودنی می‌باشد.

روش ساخت نمونه

برای ساختن نمونه‌ها، مصالح مصرفی بتن مطابق با طرح اختلاط وزن شده و به‌وسیله مخلوط‌کن، سیمان، آب و سنگ‌دانه با هم مخلوط گردیدند. سطح داخلی قالب‌ها به‌وسیله روغن چرب گردید تا بتن سخت شده از قالب جدا گردد. بتن در سه لایه داخل قالب ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه میله استاندارد متراکم گردید و توسط ماله بنایی سطح قالب مسطح گردید. حدوداً تا ۲ روز بعد از بتن‌ریزی نمونه‌ها از قالب خارج و در درون حوضچه عمل‌آوری قرار داده شد. مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در آب ۴۲ روز می‌باشد.

آزمایش مقاومت فشاری

تاکنون آزمایش استانداردی جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل در استانداردهای ارائه شده توسط سازمان بین‌المللی توسعه استانداردها (ASTM) ارائه نشده است که این امر به علت پراکندگی بالای نتایج مقاومت‌های فشاری با روش‌های مختلف اندازه‌گیری می‌باشد. به عبارتی، با توجه به این نکته می‌توان گفت که برخلاف بتن‌های معمولی، در بتن‌های متخلخل، مقاومت فشاری به‌عنوان تنها ملاک پذیرش بتن تلقی نمی‌شود. بلکه به‌موازات مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری هم حائز اهمیت می‌باشند [20].

در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر،۴۲ روزه انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش از دستگاه تست مقاومت فشاری آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان استفاده شد که مطابق با استاندارد ASTM C39 می‌باشد [21].

آزمایش نفوذپذیری

میزان ضریب نفوذپذیری متوسط، طبق رابطه (۱) و براساس قانون دارسی و فرض جریان لایه‌ای محاسبه می‌شود. در این تحقیق، از آزمایش هد افتان برای تعیین نفوذپذیری استفاده شده است. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰، به‌عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش می‌شود. برای این آزمایش، دستگاهی به روش بار افتان در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته شد. در شکل ۳، تصویری از دستگاه تعیین نفوذپذیری بتن متخلخل که برای انجام این پروژه ساخته شده است ملاحظه می‌گردد.

شکل۳: دستگاه ضریب نفوذپذیری

در رابطه (۱)، K نفوذپذیری برحسب میلی‌متر بر ثانیه، a سطح مقطع محفظه شیشه‌ای برحسب میلی‌متر مربع،A سطح مقطع نمونه برحسب میلی‌متر مربع، t زمان افت هد آب از h_1 تا h_2 برحسب ثانیه، h_1 ارتفاع اولیه ستون آب برحسب میلی‌متر و h_2 ارتفاع نهایی ستون آب برحسب میلی‌متر می‌باشد.

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

$$K = \frac{aL}{At}\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad (۱)$$

آزمایش تخلخل

برای اندازه‌گیری میزان تخلخل نمونه‌ها، ابتدا نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار می‌دهیم. سپس با توزین آن، وزن خشک (W_2) به دست می‌آید. سپس با استفاده از ترازوی ارشمیدس، وزن غوطه‌وری (W_1) به دست می‌آید. سپس، با استفاده از رابطه (۲) تخلخل نمونه محاسبه می‌شود:

$$A_t = \left(1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w V}\right)\right) \times 100 \qquad (۲)$$

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

نتایج و بحث

در جداول ۴ تا ۶ نتایج تجزیه واریانس برای پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل آورده شده است. در این جداول، مقدار F برای تیمارها و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود دارد. ضریب تبیین نیز برای تمامی پارامترها بالای ۰/۹۸ می‌باشد که نشان می‌دهد رابطه خطی بین تیمارها وجود دارد.

جدول ۴: نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R^2
تیمار	۱۳	۲۲۲۹/۴۰۳	۱۷۱/۴۹۲	۸۹/۴۹	<۰/۰۰۰۱	۵/۴۵۸	۰/۹۸
بلوک	۲	۲۷/۱۷۲	۱۳/۵۸۶	۷/۰۱	۰/۰۰۳۷		
خطا	۲۶	۵۰/۳۸۶	۱/۹۳۷	-	-		
کل	۴۱	۲۳۰۶/۹۶۱	-	-	-		

** معنی‌دار در سطح ۱٪

جدول ۵: نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R^2
تیمار	۱۳	۳/۱۴۲	۰/۲۴۱	۶۲۸/۱۵	<۰/۰۰۰۱	۱/۵۵۱	۰/۹۹۷
بلوک	۲	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۶۹	۱/۹۶	۰/۱۶۱۸		
خطا	۲۶	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۰۳۵	-	-		
کل	۴۱	۳/۱۵۳	-	-	-		

** معنی‌دار در سطح ۱٪

جدول ۶: نتایج تجزیه واریانس درصد تخلخل تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R^2
تیمار	۱۳	۱۹۷۱/۸۳۲	۱۵۱/۶۷۹	۱۰۶/۵۵	<۰/۰۰۰۱	۸/۸۸۱	۰/۹۸
بلوک	۲	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۴	۰/۹۶۳۵		
خطا	۲۶	۳۷/۰۱۶	۱/۴۲۳	-	-		
کل	۴۱	۲۰۰۸/۹۴۹	-	-	-		

** معنی‌دار در سطح ۱٪

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

در جدول ۷ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌های بتنی متخلخل مختلف به‌صورت میانگین و همچنین، میزان اختلاف نمونه‌های مورد نظر با نمونه شاهد آورده شده است.

جدول ۷: خواص فیزیکی متوسط نمونه‌ها و تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه مرجع

ردیف	کد آزمایشگاهی	مقاومت فشاری متوسط (MPa)	ضریب نفوذپذیری متوسط (mm/s)	درصد تخلخل متوسط	بیشترین اختلاف با نمونه مرجع		
					مقاومت فشاری	ضریب نفوذپذیری	درصد تخلخل
۱	C-0	۱۷/۵۵	۱/۵۱۷	۲۰/۹۶	-	-	-
۲	Z5-0	۲۱/۹۱	۱/۴۳۷	۱۸/۹۴	۱۹/۸۹	-۵/۹۳	-۹/۶۳
۳	Z10-0	۱۷/۷۴	۱/۵	۲۱/۳۳	۱/۰۸	-۱/۱۲	۱/۷۳
۴	Z15-0	۱۸/۰۷	۱/۴۷	۱۷/۹۸	۲/۸۷	-۳/۰۹	-۱۴/۲۱
۵	Pu5-0	۱۸/۹۳	۱/۵۱	۲۲/۰۵	۷/۲۹	-۰/۴۶	۴/۹۴
۶	Pu10-0	۱۸/۶۲	۱/۴۹۷	۱۹/۰۶	۵/۷۴	-۱/۳۱	-۹/۰۶
۷	Pu15-0	۱۷/۸۸	۱/۴۲۷	۱۹/۸۸	۱/۸۴	-۵/۹۳	-۵/۱۵
۸	C-20	۳۰/۷۳	۱/۱۸۳	۹/۱۴	-	-	-
۹	Z5-20	۳۲/۴۸	۰/۹۴۲	۷/۸	۵/۳۸	-۲۰/۳۷	-۱۴/۶۶
۱۰	Z10-20	۳۵/۱۶	۰/۸۹۷	۶/۳	۱۲/۶	-۲۴/۱۷	-۳۱/۰۷
۱۱	Z15-20	۳۸/۴۲	۰/۸۲	۵/۲۶	۲۰/۰۱	-۳۰/۶۸	-۴۲/۴۵
۱۲	Pu5-20	۲۷/۲۹	۱/۰۴۷	۱۰/۱۷	-۱۱/۱۹	-۱۱/۴۹	۱۰/۱۲
۱۳	Pu10-20	۳۰/۹۵	۱/۰۰۳	۸/۸۱	۰/۷۱	-۱۵/۲۱	-۳/۶۱
۱۴	Pu15-20	۳۱/۳۲	۰/۹۹۷	۶/۱۲	۱/۸۸	-۱۵/۷۲	-۳۳/۰۴

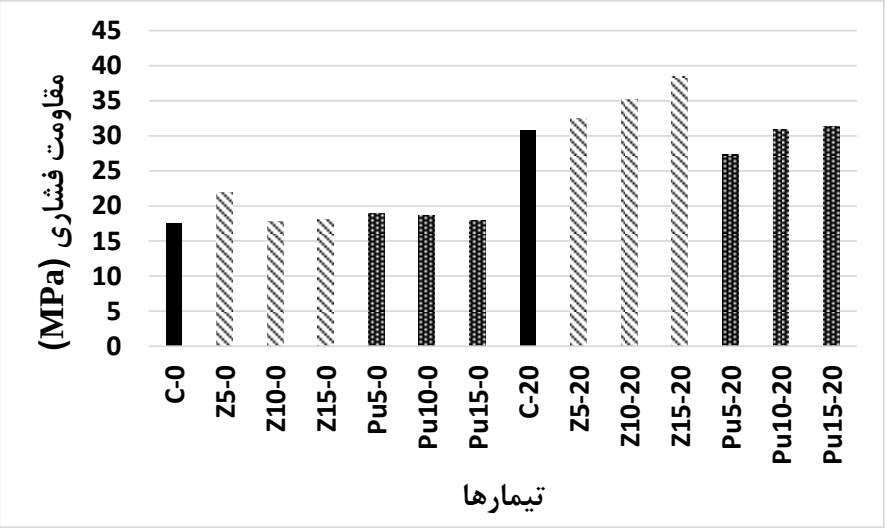
** **علامت منفی نشان‌دهنده کاهش پارامتر نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.**

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های بدون ریزدانه، با افزایش درصد زئولیت، روند خاصی در مقاومت فشاری مشاهده نمی‌شود. اما نمونه‌های حاوی زئولیت دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه مرجع هستند که ناشی از وزن مخصوص زئولیت (۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. همچنین، برای نمونه‌های حاوی پوکه معدنی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع بیشتر می‌باشد. اما با افزایش درصد افزودنی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ اما این کاهش خیلی چشمگیر نیست که ناشی از وزن مخصوص کم این جاذب (۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. نفوذپذیری و تخلخل به دلیل ریزدانه بودن افزودنی‌های استفاده شده نسبت به نمونه مرجع کاهش‌یافته است که دلیل آن پر شدن خلل و فرج به‌وسیله افزودنی می‌باشد.

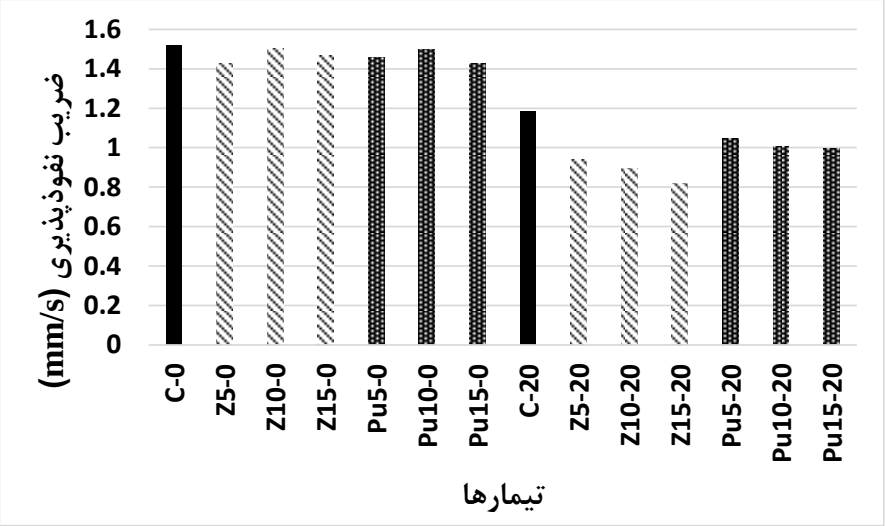
برای نمونه‌های حاوی ۲۰٪ ریزدانه، نمونه‌های حاوی زئولیت و پوکه معدنی با افزایش درصد افزودنی، افزایش مقاومت فشاری را به دنبال دارند. اما تغییرات نمونه‌های حاوی زئولیت بسیار بیشتر از نمونه‌های حاوی پوکه معدنی می‌باشد که دلیل آن وزن مخصوص بیشتر زئولیت است. با این وجود، نفوذپذیری و تخلخل در نمونه‌های حاوی پوکه معدنی بیشتر از نمونه‌های حاوی زئولیت است و دلیل آن وجود خلل و فرج در ساختمان دخلی این افزودنی می‌باشد.

در شکل‌های ۴ تا ۶ به ترتیب نمودار تغییرات مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل برای نمونه‌های بتن متخلخل شاهد و حاوی افزودنی آورده شده است.

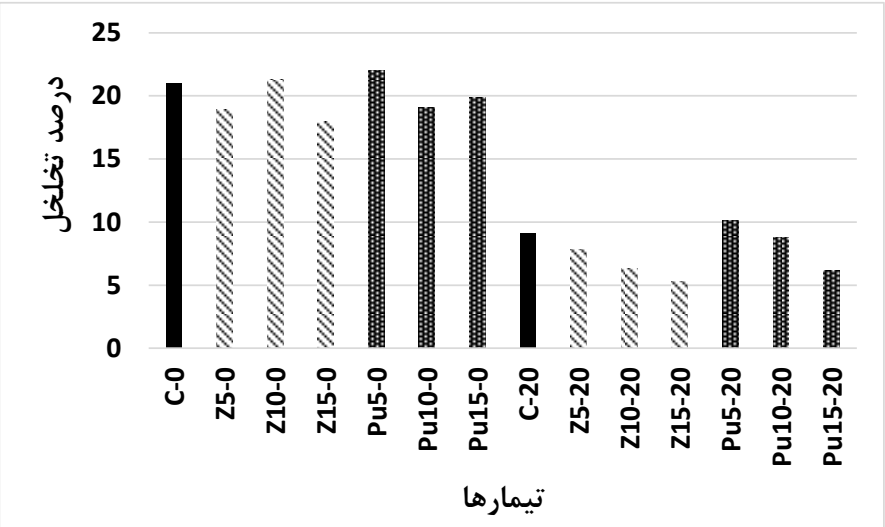
ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir



شکل ۴: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی متخلخل



شکل ۵: تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتنی متخلخل



شکل ۶: تغییرات درصد تخلخل نمونه‌های بتنی متخلخل

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از سبک‌دانه‌های پوکه معدنی و زئولیت، که دارای صرفه اقتصادی هستند و توانایی جذب آلاینده‌ها را دارند، در بتن متخلخل، به‌منظور کاربرد در سیستم معابر شهری، پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، کاهش و به تأخیر انداختن جریان رواناب شهری بهره گرفته شد. اهم نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

- استفاده از بتن متخلخل می‌تواند به‌عنوان گامی نو در کاهش حجم رواناب شهری و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی مطرح شود.
- بسته به منطقه مورد استفاده می‌توان از درصد ریزدانه متفاوت برای دستیابی به مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری مورد نیاز بتن متخلخل استفاده کرد.
- نمونه‌های حاوی زئولیت از مقاومت فشاری و نمونه‌های حاوی پوکه معدنی از تخلخل و نفوذپذیری بیشتری برخوردار بودند. اما با توجه با اینکه تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌های حاوی افزودنی‌ها اختلاف چندان فاحشی با یکدیگر نداشت به‌صرفه است که از زئولیت به‌عنوان افزودنی استفاده شود.
- بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ۲۰ درصد ریزدانه به ترتیب در Z5-0 و Z15-20 مشاهده شد که ۱۹/۸۹ و ۲۰/۰۱ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت داشتند.
- بیشترین نفوذپذیری و تخلخل در نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ۲۰ درصد ریزدانه به ترتیب در Pu5-0 و Pu15-20 مشاهده شد که ۰/۴۶- و ۱۱/۰۹- درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش نفوذپذیری داشتند.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از زئولیت در بتن متخلخل نسبت به پوکه معدنی بهتر می‌باشد

ISSN: 2475-3673
http://www.Racj.ir

منابع و مراجع

[1] Ćosić, K., L. Korat, V. Ducman and I. Netinger. (2015). "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete." Construction and Building Materials. Vol. 78, PP. 69-76.

[۲] خدادوست گمچی، م. و پاشایی گلمرز، ل.، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر کاربرد بتن متخلخل در معابر عمومی شهری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر احیای دریاچه ارومیه. چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین.

[۳] دایی چینی، م. و محبوبی، ا.، ۱۳۸۷. بتن متخلخل (اسفنجی). چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

[4] Ramadhansyah, P. J., M. Ibrahim, M. Yusak, H. Mohd Rosli, M. N. M. Warid, W. Ibrahim and M. Haziman. (2014). "Porous Concrete Pavement Containing Nano-silica: Pre-Review." Advanced Materials Research. Vol. 911, PP. 454-458.

[5] Tennis, P. (2004). "Pervious concrete pavement." Portland cement Assoc.

[۶] شکرچی زاده، م.، فرزانه پور، م.، علی لیبر ن. و ناصری، ع.، ۱۳۸۷. بررسی کاربرد سبک‌دانه طبیعی اسکریا در بتن سبک سازه‌ای. نشریه داخلی انجمن بتن ایران، سال هفتم، شماره ۳۱.

[۷] صداقت دوست، ا.، اخوان خرازیان ح. و نیکوان، پ.، ۱۳۹۱. بررسی تأثیرات زئولیت بر مقاومت فشاری بتن سبک. اولین کنفرانس ملی صنعت بتن، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی.

[۸] اسماعیل نیا، م. و فریدی، م.، ۱۳۹۳. رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی در بتن خود تراکم حاوی سنگ‌دانه بازیافتی و زئولیت طبیعی. تحقیقات بتن، سال هفتم، شماره اول، ص ۷-۲۲.

[۹] عابدی کوپایی، ج. و موسوی، س. ف.، ۱۳۸۲. جذب سرب از پساب صنعتی توسط خاکستر پوسته شلتوک. آب و فاضلاب. شماره ۴۸، ص ۱۷-۲۳.

[10] Strain, V. and K. Pant. (2005). "Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark." Bioresour. Technol. Vol. 97, PP. 15-20.

[11] Azad, A., S., F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin and V., P. Singh. (2018). "The effect of vermiculite and quartz in porous concrete on reducing storm-runoff pollution." ISH Journal of Hydraulic Engineering. PP. 1-9.

[۱۲]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.

[13] Ahmadi, B. and M. Shekarchi. (2010). "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material." Cement & Concrete Composites. Vol. 32, PP. 134-141.

[۱۴]حبیبی، ع.، وزیری، ا. و محمدی، ا.، ۱۳۹۱. رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با پوکه معدنی منطقه کردستان. تحقیقات بتن، سال پنجم، شماره دوم، ص ۳۳-۴۴.

[۱۵]سقاییان نژاد، س.، ۱۳۹۱. کاهش بار آلودگی رواناب‌های شهری با استفاده از بتن متخلخل جاذب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[16] Yusak, M. I. M., R. P. Jaya, M. R. Hainin, C. R. Ismail and M. H. W. Ibrahim. (2015). "Strength of porous concrete pavement at different curing methods." Jurnal Teknologi, Vol. 76, No. 14.

[17] Tamai, H. (2015). "Enhancing the Performance of Porous Concrete by Utilizing the Pumice Aggregate." Procedia Engineering. Vol. 125, PP. 732-738.

[18] Zaetang, Y., V. Sata, A. Wongsa and P. Chindaprasirt. (2016). "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate." Construction and Building Materials. Vol. 111, PP. 15-21.

[19] ACI Committee 211. (2006). "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete." ACI 211.3R Report.

[۲۰]رستمی گله‌دار، م. و بهرامی چگینی، ا.، ۱۳۹۴. بررسی خواص مکانیکی و تأثیرات سنگ‌دانه‌های متداول در ساخت بتن متخلخل. فصلنامه مهندسی سازه، دوره ۱۲، شماره ۳، ص ۱۷-۲۴.

[21] ASTM C39. (20040. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." Annual Book of ASTM Standards.