

بررسی برخی مشخصات مکانیکی بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس

وحید باقری^۱، علیرضا محمدجعفری صادقی^{۲*}، حسن افشین^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

*mohammadjafari@sut.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۹/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۷

چکیده

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن، با تخلخل بالا و بیشتر فاقد مصالح ریزدانه است که کاربرد اصلی آن در اجرای روسازی بوده و برای مدیریت روانابها استفاده می‌شود. در این مقاله مقاومت فشاری، نفوذپذیری و مقاومت در برابر ذوب و یخبندان بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس بررسی شده است. بدین منظور مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط حاوی اندازه‌ها و مقادیر مختلف سنگدانه و نسبت‌های متفاوت آب به مواد سیمانی حاوی میکروسیلیس بررسی شد. سپس آزمایش تعیین سرعت نفوذ، دبی و مقاومت در برابر ذوب و یخبندان روی طرح‌های منتخب انجام شد. طبق نتایج حاصل، نمونه‌های بتن متخلخل به دلیل داشتن سطوح نفوذپذیر، دوام بهتری نسبت به بتن معمولی داشتند. در آزمایش ذوب و یخبندان، نمونه بتن معمولی پس از ۱۶ چرخه به طور کامل دچار شکست شد در حالی که نمونه‌های بتن متخلخل تا ۲۳ چرخه هیچ ترک از خود نشان ندادند. طرح اختلاط شماره ۱۰ حاوی سنگدانه شن بادی، مقاومت بهتری در برابر ذوب و یخبندان از خود نشان داد و کاهش وزن کمتری پس از ۲۳ سیکل در مقایسه با سایر طرح‌ها مشاهده شد. طرح اختلاط شماره ۹ حاوی میکروسیلیس به میزان ۷ درصد وزنی سیمان با مقاومت فشاری ۲۸۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و قابلیت عبور آب با دبی ۱۱۱/۱ سی‌سی بر ثانیه برای استفاده در روسازی پارکینگ‌ها و پیاده‌روها مناسب است.

واژگان کلیدی: بتن متخلخل، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، ذوب و یخبندان

۱. مقدمه

دوام بیشتر، طراحی و ساخته شود، می‌تواند مدت زمان زیادی را بدون تعمیر و یا با تعمیر اندک سپری کند. هزینه‌های ابتدایی بتن در مقایسه با آسفالت بالا است ولی هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتری دارد. با توجه به مشکلات روسازی آسفالتی در محورهای پرتراфик که اغلب دارای خرابی‌هایی از جمله ناهمواری‌ها و ترک زود هنگام است، کاربرد روسازی بتنی سبب رفع مشکلات

سال‌های زیادی از کاربرد روسازی‌های بتنی در دنیا می‌گذرد. روسازی بتنی برای ساخت راه‌ها، فرودگاه‌های نظامی، خیابان‌ها، جاده‌های با اهمیت زیاد، محوطه‌های روباز و در انواع کف‌سازی‌ها به کار می‌رود. چنانچه روسازی بتنی با مصالح با

شکل ۱. ویژگی‌های بتن متخلخل و بتن معمولی

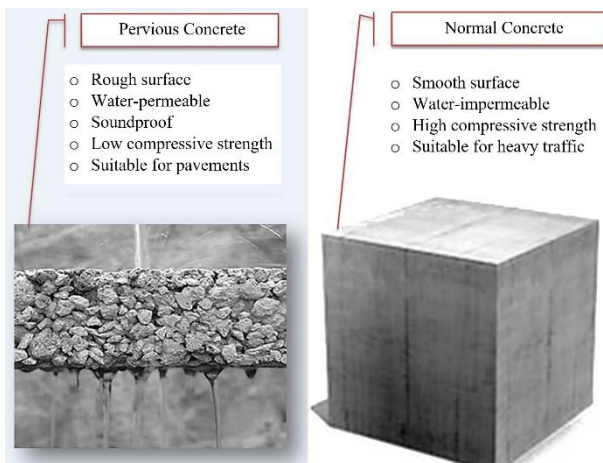


Fig. 1. Characteristics of pervious and normal concrete

بتن متخلخل دارای مزایای اقتصادی و زیست محیطی فراوانی است و مزایای زیست محیطی آن بیشتر مدنظر است. از مزایای اقتصادی آن می‌توان به پایین آمدن هزینه‌های فراوان به منظور هدایت آب باران و کاهش پدیده رواناب سطحی اشاره کرد. از مزایای زیست محیطی آن نیز می‌توان به جلوگیری از بروز آب گرفتگی در معابر به هنگام بارندگی، جلوگیری از آلوده شدن آب بارندگی‌ها، پر شدن ذخایر آب زیر زمینی و ممانعت از یخ‌زدگی سطوح معابر اشاره نمود. در واقع می‌توان گفت با وجود بتن متخلخل نیازی به ساختن جوی‌های آب فراوان در سطح شهر، کنار خیابان و کوچه‌ها و همچنین کانال‌های بزرگ آب نیست. زیرا این بتن بارندگی را مستقیماً به زمین و سفره‌های آب زیرزمینی منتقل کرده و یک مزیت زیست محیطی محسوب می‌شود [6].

Liu و همکاران [7] پژوهشی را روی مقاومت و نفوذپذیری با استفاده از فوق روان کننده پلی کربوکسیلیک اتر، نسبت‌های آب به سیمان (۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۳۵) و اندازه‌های مختلف سنگدانه درشت انجام دادند. طبق نتایج با تغییر تخلخل از ۱۳/۷ درصد به ۲۳/۸ درصد، نفوذپذیری از ۳/۷ (mm/s) به ۸/۸۲ (mm/s) افزایش یافت. بیش‌ترین مقاومت فشاری با تخلخل ۱۶/۴ درصد برابر ۲۴/۴ Mpa و کمترین مقاومت فشاری با تخلخل ۲۷/۱ درصد برابر ۱۵/۴ Mpa حاصل شد.

Murthy و Rajeswari [8] با استفاده از ماسه و اندازه‌های

و کاهش دوره تعمیرات می‌شود [1].

در بتن متخلخل، میزان مشخصی از آب و مصالح سیمانی برای تهیه خمیر سیمانی که پوشش ضخیمی در اطراف سنگدانه‌ها تشکیل دهد، استفاده می‌شود. طرح اختلاط این بتن، بدون ریزدانه یا حاوی مقدار کمی ماسه است تا فضای خالی قابل توجهی ایجاد شود. میزان کافی خمیر سیمان برای پوشش و چسباندن سنگدانه‌ها، سیستم نفوذ پذیری ایجاد می‌کند که فضاهای خالی بهم پیوسته باعث زهکشی سریع می‌شوند. مقدار کم ملات و تخلخل بالا باعث کاهش مقاومت فشاری این بتن در مقایسه با بتن معمولی می‌شود [2].

طبق تعریف NRMCA^۱، بتن متخلخل^۲ نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست و یکی از انواع روسازی‌های صلب است و باعث کاهش رواناب شده و ایمنی رانندگان را به سبب افزایش مقاومت لغزشی تامین می‌کند و منجر به افزایش آب‌های زیر زمینی می‌شود [1]. همچنین بتن متخلخل به عنوان بتن بدون ریزدانه، اسفنجی، نفوذپذیر شناخته شده است [3]. بتن متخلخل شامل سیمان پرتلند، درشت‌دانه، مقدار کم یا بدون ریزدانه، مواد افزودنی و آب است و با داشتن مقدار کم ریزدانه، دارای ساختاری متشکل از حفره‌های به هم پیوسته است [4].

نبود ریزدانه یا ریزدانه کم، باعث کاهش کارایی مخلوط تازه بتن متخلخل می‌شود. بنابراین برای دستیابی به مشخصاتی مانند مقاومت و نفوذپذیری، ضروری است که عملیات تراکم در حین ساخت آن انجام شود [5].

در بتن متخلخل سخت‌شده، فضای خالی موثر، نقش اصلی و تامین کننده خاصیت نفوذپذیری را دارد. فضای خالی موثر، آن بخش از فضای سازه متخلخل است که از طریق آن، آب از سطح به داخل سازه نفوذ می‌کند و از بخش زیرین آن خارج می‌شود. حجم عمده این مخلوط را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهد که با خمیر سیمان بهم چسبیده‌اند و وزن مخصوص حاصل در محدوده ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر است. از این بتن به‌عنوان رویه برای اولین بار در سال ۱۸۶۵ در کشور اسکاتلند در یک معبر شهری استفاده شد [5].

2 Pervious Concrete

1 National Ready Mixed Concrete Association

متخلخل پژوهشی را انجام دادند. برابر نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری با استفاده از ۱۴ درصد خاکستر بادی، ۱۰ درصد میکروسیلیس و میزان ۵ کیلوگرم بر متر مکعب PPF به ترتیب ۱۴/۵۷، ۱۵/۷۳ و ۲۷/۶۸ مگاپاسکال بدست آمد.

Kumaar و همکاران [14] با استفاده از ماده افزودنی دی اکسید تیتانیوم به مقدار ۲ درصد وزن سیمان و تغییر نسبت سنگدانه درشت به سنگدانه ریز بر روی بتن متخلخل آزمایشی انجام دادند و مقاومت فشاری به مقدار ۲۱ درصد افزایش و نفوذپذیری به میزان ۱۵ درصد کاهش یافت.

Ravindrarajah و Kassis [15] با استفاده از مواد پوزولانی میکروسیلیس و خاکستر بادی روی بتن متخلخل آزمایشی انجام دادند. طبق نتایج، مقاومت فشاری در بتن بدون مواد پوزولانی ۱۲/۸ Mpa بدست آمد و در بتن حاوی ۷/۴ درصد میکروسیلیس، بیشترین مقاومت فشاری برابر ۲۲/۵ Mpa حاصل شد.

Schaefer و همکاران [16] روی چگونگی تراکم بتن متخلخل پژوهش کردند. نمونه‌های بتن متخلخل که تراکم آن‌ها منظم و از انرژی بیشتری برخوردار بودند، در آزمایش ذوب و یخبندان بیشتر از ۱۵۰ چرخه را طی کرده و شکست بیشتر آن‌ها در چرخه‌های بیشتر از ۲۰۰ اتفاق افتاد و نمونه‌هایی که از تراکم پایینی برخوردار بودند قبل از رسیدن به ۱۵۰ چرخه دچار شکست شدند.

Yang و Jiang [17] با استفاده از مواد افزودنی شامل میکروسیلیس، فوق روان کننده، وینیل استات-اتیلن و پلی وینیل الکل روی بتن متخلخل آزمایشی انجام دادند. طبق نتایج، مقاومت فشاری ۶۱/۲ Mpa و ضریب نفوذپذیری (mm/s) ۰/۳ در نمونه حاوی وینیل استات-اتیلن (۱۵ درصد وزن مواد سیمانی) حاصل شد ولی استفاده از میکروسیلیس (۶ درصد وزن مواد سیمانی)، منجر به مقاومت فشاری برابر ۵۷/۲ Mpa و ضریب نفوذپذیری برابر (mm/s) ۱/۷ شد.

Adebayo Ibrahim و همکاران [18] پژوهش را روی مقاومت و نفوذپذیری بتن متخلخل با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و رودخانه‌ای و نسبت‌های آب به سیمان (۰/۳، ۰/۳۵ و

مختلف درشت‌دانه روی بتن متخلخل پژوهشی را انجام دادند. براساس نتایج به دست آمده، بتن ساخته شده بدون ماسه با مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۱۰/۵۲ Mpa و ضریب نفوذپذیری برابر (mm/s) ۰/۴۱ حاصل شد و با اضافه کردن ۵ درصد ماسه و استفاده از رنج‌های مختلف سنگدانه، مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری به ترتیب مقادیر ۲۲/۴۲ Mpa و (mm/s) ۰/۲ بدست آمد.

بهرامی و همکاران [9] در پژوهشی برای ساخت بتن متخلخل از میکروسیلیس برای جایگزین کردن بخشی از سیمان و فوق روان کننده استفاده کردند. برابر نتایج، نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با ۷ درصد میکروسیلیس بیشترین مقاومت فشاری (kg/cm²) ۲۹۸ و ۳ درصد میکروسیلیس کمترین مقاومت فشاری (kg/cm²) ۲۴۱ را نشان داد.

پاچیده و همکاران [10] با استفاده از میکروسیلیس به مقدارهای ۱۰ و ۲۰ درصد وزن سیمان آزمایشی انجام دادند و مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن متخلخل حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس برابر (kg/cm²) ۲۸۰ و برای نمونه بتنی با ۲۰ درصد میکروسیلیس برابر (kg/cm²) ۱۶۰ بدست آمد.

Arifi و همکاران [11] با استفاده از خاکستر بادی نوع C به مقدارهای (۰، ۱۵ و ۲۵) درصد و سنگدانه‌های بازیافتی به مقدارهای (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) درصد در بتن نفوذپذیر پژوهشی انجام دادند. مطابق نتایج، کاربرد ۷۵ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی و استفاده همزمان از خاکستر بادی به میزان ۲۵ درصد جایگزین سیمان، نتیجه رضایت بخشی بر روی مقاومت فشاری و کششی نشان داد.

Poovitha و Sarath [12] در پژوهشی از خاکستر بادی نوع F به مقدارهای (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵) درصد برای جایگزین سیمان استفاده کردند. نتایج نشان داد که با جایگزین کردن خاکستر بادی به میزان ۱۵ درصد، مقاومت فشاری (۴/۶ درصد)، مقاومت خمشی (۳/۸ درصد) و مقاومت کششی غیرمستقیم (۰/۸ درصد) افزایش یافت.

Liang و همکاران [13] با استفاده از مواد افزودنی میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف پلی پروپیلن (PPF^۱) در بتن

جدول ۱. مشخصات سنگدانه درشت (شن نخودی)

Saturated-surface-dry based specific gravity (Gs) (gr/cm ³)	2.721
Absorption (wt. (%))	0.86
Loose bulk density (gr/cm ³)	1.527
Bulk density by rodding (gr/cm ³)	1.715

Table 1. Properties of coarse aggregates (fine gravel)

جدول ۲. مشخصات سنگدانه درشت (شن بادامی)

Saturated-surface-dry based specific gravity (Gs) (gr/cm ³)	2.788
Absorption (wt. (%))	0.71
Loose bulk density (gr/cm ³)	1.489
Bulk density by rodding (gr/cm ³)	1.650

Table 2. Properties of coarse aggregates (medium gravel)

جدول ۳. مشخصات سنگدانه ریز (ماسه)

Saturated-surface-dry based specific gravity (Gs) (gr/cm ³)	2.689
Absorption (wt. (%))	1.56
Loose bulk density (gr/cm ³)	1.865
Bulk density by rodding (gr/cm ³)	1.982
Fineness modulus	2.7

Table 3. Properties of fine aggregates

جدول ۴. دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

Sand		Medium gravel		Fine gravel	
Percent passing sieve	Sieve No.	Percent passing sieve	Sieve size	Percent passing sieve	Sieve size
100	8	110	1½ in.	100	¾ in.
66.06	16	91.72	1 in.	69.99	½ in.
42.8	30	39.93	¾ in.	13.71	3/8 in.
16.49	50	0.71	½ in.	0.14	No. 4
4.76	100	0.17	3/8 in.	0.11	No. 8
1.5	200	0.11	No. 4	0.07	No. 16
0.03	Pan	0.09	No. 8	0.01	Pan
-	-	0.06	No. 16	-	-
-	-	0.01	Pan	-	-

Table 4. Grading of aggregates

جدول ۵. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس

Structure	Amorphous
Particles	Spherical
Diameter (micron)	0.1
Specific surface area (m ² /g)	20
Density (kg/m ³)	250
Color	Light gray

Table 5. The physical properties of micro silica powder

۳.۲. طرح اختلاط

۱۵ طرح اختلاط حاوی اندازه‌ها و مقادیر مختلف سنگدانه و نسبت‌های متفاوت آب به مواد سیمانی حاوی میکرو سیلیس

(۰/۴) انجام دادند. طبق نتایج به دست آمده، بیش‌ترین مقاومت فشاری با استفاده از ۱۰ درصد سنگدانه ریز رودخانه‌ای و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، برابر ۱۵ Mpa بود و بیش‌ترین ضریب نفوذپذیری با ۲۵/۳۱ (mm/s) بدون استفاده از سنگدانه ریز و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ حاصل شد.

Wang و همکاران [19] با استفاده از خاکستر بادی به مقدارهای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) درصد وزن سیمان، نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ و نسبت‌های مختلف سیمان به سنگدانه (۰/۱۸، ۰/۲، ۰/۲۲، ۰/۲۴ و ۰/۲۶) روی بتن متخلخل پژوهش انجام دادند. طبق نتایج، بیش‌ترین مقاومت فشاری با استفاده از خاکستر بادی ۲۰ درصد، نسبت سیمان به سنگدانه ۰/۲۲، برابر ۲۴/۵ Mpa و نفوذپذیری مناسب برابر ۶/۷ (mm/s) به دست آمد. در این پژوهش سعی شد با انجام آزمایش و ساخت نمونه‌های بتن متخلخل با مصالح سنگی و ماده افزودنی میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، نمونه‌های بتنی با مقاومت و نفوذپذیری مناسب تهیه شود که این نمونه‌ها بتوانند مقدار آب موردنظر را در مدت زمان کوتاه از خود عبور داده و همچنین در برابر ذوب و یخبندان دوام کافی داشته باشند.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲.۱. کلیات

در این پژوهش تعداد ۱۵ طرح اختلاط بررسی شد. از هر طرح اختلاط، نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰ cm به تعداد ۲ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری بتن ۷ روزه و تعداد ۴ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه ساخته شد. برای تعدادی از طرح‌های منتخب، نمونه مکعب مستطیل به ابعاد ۱۸×۱۸×۵ cm برای آزمایش نفوذپذیری و نمونه مکعب مستطیل به ابعاد ۲۰×۲۰×۵ cm برای آزمایش ذوب و یخبندان تهیه شد.

۲.۲. مصالح

مشخصات سنگدانه‌های استفاده شده در جدول‌های (۱ تا ۳) و دانه‌بندی سنگدانه‌ها در جدول (۴) ارائه شده‌اند. سیمان نوع دو و میکروسیلیس از نوع آمورف با واکنش‌پذیری بالا با مشخصات فیزیکی مطابق جدول (۵) استفاده شده است.

مطابق جدول (۶) برای بتن متخلخل تهیه و آزمایش شد.

مورد نظر که قبلاً دیواره آن‌ها روغنکاری شده بود، ریخته شد. در همه آزمایش‌ها، نمونه‌های بتنی در دو لایه داخل قالب ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه میله استاندارد متراکم شد. شکل (۲) مراحل ساخت نمونه بتن متخلخل به شیوه شرح داده شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲. ساخت نمونه بتن متخلخل



Fig. 2. Production of pervious concrete

۴.۲. ساخت نمونه‌ها

مصلح سنگی استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، رودخانه‌ای بوده و یک روز قبل از تهیه نمونه‌ها، مصلح سنگی شسته شد تا ذرات گرد و غباری که باعث کاهش چسبندگی می‌شوند از بین بروند.

برای درست کردن خمیر ابتدا تمام میکروسیلیس و نصف آب در ظرف ریخته شد و با مخلوط‌کن دستی به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس، نصف سیمان به ظرف اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد. در ادامه، بقیه آب و سیمان به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شد. بعد از آن، نصف ماسه به مدت ۵ دقیقه با ترکیب ایجاد شده مخلوط شد و در پایان بقیه ماسه به ترکیب اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شد.

سنگدانه‌های درشت را در ظرف جداگانه ریخته و خمیر از قبل آماده شده به سنگدانه‌ها اضافه شد و به صورت دستی مخلوط شد. این کار تا جایی ادامه یافت که سنگدانه‌ها و خمیر بطور کامل با هم ترکیب شده و خمیر روی سنگدانه‌ها پوشش ایجاد نماید. پس از مخلوط شدن، بتن تولید شده در قالب‌های

جدول ۶. طرح اختلاط نمونه‌های بتن متخلخل

Mix Design	Cement (C) (kg/m ³)	Water (W) (kg/m ³)	Micro silica (SF) (kg/m ³)	$\frac{W}{C + SF}$	$\frac{SF}{C + SF}$ (%)	SSD Sand (S) (kg/m ³)	SSD Fine gravel (G) (kg/m ³)	SSD Medium gravel (G) (kg/m ³)
PC 1	352	168	27	0.44	7	409	1543	-
PC 2	459	191	36	0.38	7	229	1412	-
PC 3	313	122	25	0.36	7	156	1409	-
PC 4	271	110	31	0.36	10	141	1445	-
PC 5	321	133	25	0.38	7	160	1443	-
PC 6	370	143	28	0.36	7	183	1378	-
PC 7	364	140	27	0.36	7	180	1422	-
PC 8	378	146	29	0.36	7	188	-	1411
PC 9	356	138	27	0.36	7	176	1455	-
PC 10	382	148	29	0.36	7	189	-	1563
PC 11	415	153	32	0.34	7	206	1497	-
PC 12	388	141	30	0.33	7	192	1518	-
PC 13	366	143	28	0.36	7	181	1497	-
PC 14	373	144	29	0.36	7	185	1526	-
PC 15	364	141	28	0.36	7	180	1487	-

Table 6. Pervious concrete mix designs

۵.۲. عمل آوری

شدن از فریزر به مدت ۸ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند و هر سیکل ۲۴ ساعت طول کشید. مقاومت در برابر ذوب و یخبندان نمونه‌های بتن متخلخل به همراه نمونه بتن معمولی، در خلال ۲۳ سیکل مورد مقایسه قرار گرفتند.

نمونه‌های ساخته شده در دمای حدود ۲۳ درجه سانتیگراد محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت در قالب و زیر حفاظ پلاستیکی نگهداری شدند و تا سن مورد نظر (۷ و ۲۸ روزه) برای آزمایش داخل آب قرار گرفتند.

شکل ۳. آزمایش نفوذپذیری برای نمونه بتن متخلخل



Fig. 3. Permeability test on pervious concrete

۶.۲. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 12390-3 روی نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ cm که تا سنین ۷ و ۲۸ روزه در آب عمل‌آوری شدند، توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و بارگذاری تحت کنترل بار، انجام شد.

۷.۲. آزمایش نفوذپذیری

از طرح‌های اختلاط شماره ۹ تا ۱۵ نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۱۸×۱۸×۵ cm برای آزمایش نفوذپذیری و اندازه‌گیری سرعت عبور آب از نمونه تهیه شد. ابتدا وجوه جانبی نمونه بتنی برای جلوگیری از نشت آب از کناره‌ها، به وسیله ملات و پلاستیک آب‌بندی شد تا اطمینان حاصل شود که آب تنها حرکت قائم از داخل بتن خواهد داشت. روش سنجش دبی آب عبوری بدین صورت بود که ابتدا نمونه بتنی زیر شیر آب قرار داده شد و شیر آب تا جایی باز و بسته شد که آب روی بتن باقی نماند و از داخل بتن حرکت مستمر داشته باشد. وقتی اطمینان حاصل شد که آبی روی بتن باقی نمی‌ماند، نمونه بتنی کنار گذاشته شد و با همان مقدار سرعت جریان آب، زمان پر کردن استوانه مدرج (۱۰۰۰ CC) با کرنومتر ثبت و مقدار دبی آب و سرعت نفوذ محاسبه شد. شکل (۳) یکی از نمونه‌ها و روند انجام آزمایش سرعت نفوذ آب را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. آزمایش مقاومت فشاری

جدول (۷) مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و دبی و سرعت نفوذ نمونه‌های عمل‌آوری شده بتن متخلخل را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، محدوده مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده برای بتن متخلخل در بازه ۸۹ الی ۳۸۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده و محدوده مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها در بازه ۱۰۱ الی ۴۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. همچنین محدوده دبی از صفر تا ۱۱۱/۱ سی‌سی بر ثانیه و محدوده سرعت نفوذ از صفر تا ۳/۴۳ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد.

شکل‌های (۴ و ۵) مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن متخلخل عمل‌آوری شده در آب را نشان می‌دهد. طبق نتایج طرح اختلاط‌های شماره ۲ و ۱۱ نسبت به بقیه طرح‌های اختلاط مقاومت فشاری بیش‌تری از خود نشان دادند که دلیل آن می‌تواند عیار بالای سیمان و میکروسیلیس و نسبت پایین آب به مواد سیمانی در این طرح‌ها باشد. طرح اختلاط شماره ۱ کمترین مقاومت را از خود نشان داد و علت آن نسبت بالای آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۴ است. همچنین در طرح شماره ۴ به دلیل عیار

۸.۲. آزمایش مقاومت بتن در برابر ذوب و یخبندان

از طرح‌های اختلاط شماره ۱۰ تا ۱۳ نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۲۰×۲۰×۵ cm برای آزمایش مقاومت بتن در برابر ذوب و یخبندان تهیه شد. در این آزمایش، نمونه‌ها از یک وجه به ارتفاع ۱ سانتی‌متر داخل آب قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه در داخل فریزر به مدت ۱۶ ساعت تحت دمای منفی ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از خارج

به مقاومت فشاری (kg/cm^2) ۱۰۴ دست یافتند، در حالی که با استفاده از میکروسیلیس به مقدار ۵ درصد وزن سیمان، مقاومت فشاری با ۹۷ درصد افزایش به (kg/cm^2) ۲۰۵ رسید.

در پژوهش شیرگیر و همکاران [22] مقاومت فشاری بتن بدون استفاده از نانوسیلیس مقدار (kg/cm^2) ۱۳۰/۳ بدست آمد ولی با استفاده از نانوسیلیس به میزان ۵ درصد وزنی مواد سیمانی، مقاومت بتن به (kg/cm^2) ۱۹۳/۵ افزایش یافت که ۴۸/۵ درصد افزایش در مقاومت فشاری مشاهده شد.

سیمان پایین تر نسبت به سایر طرح ها، مقاومت فشاری کمتری دیده شد.

در پژوهش حسنی و همکاران [20] مقاومت فشاری در بتن متخلخل بدون استفاده از الیاف برابر (kg/cm^2) ۱۵۲/۸ بود که با استفاده از الیاف پلی پروپیلن ۷/۵ درصد، مقاومت بتن به (kg/cm^2) ۲۰۴/۳ افزایش یافت و باعث بهبود ۳۴ درصدی مقاومت فشاری شد. خوش نواز و همکاران [21] در نمونه های بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزن سیمان

جدول ۷. نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و نفوذپذیری

Mix Design	fresh concrete density (kg/m^3)	7-day mean compressive strength (kg/cm^2)	28-day mean compressive strength (kg/cm^2)	Flow rate (cc/sec)	Permeate velocity (mm/sec)
PC 1	2005	89	101	-	-
PC 2	2330	311	403	-	-
PC 3	2028	153	172	-	-
PC 4	2010	94	117	-	-
PC 5	2085	143	157	-	-
PC 6	2105	181	213	-	-
PC 7	2135	193	219	-	-
PC 8	2155	190	219	-	-
PC 9	2155	235	283	111.1	3.43
PC 10	2315	250	298	37.03	1.14
PC 11	2305	383	392	0	0
PC 12	2273	301	318	8.77	0.27
PC 13	2218	254	256	33.34	1.03
PC 14	2260	264	274	9.1	0.28
PC 15	2203	176	260	45.45	1.4

Table 7. Results of the compressive strength and permeability tests

شکل ۴. مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های بتن متخلخل

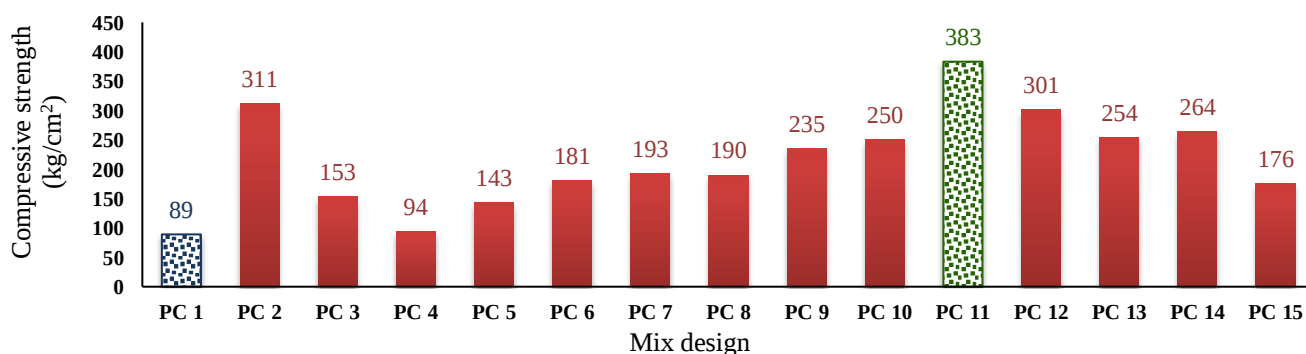


Fig. 4. 7-day mean compressive strength test results (kg/cm^2)

شکل ۵. مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتن متخلخل

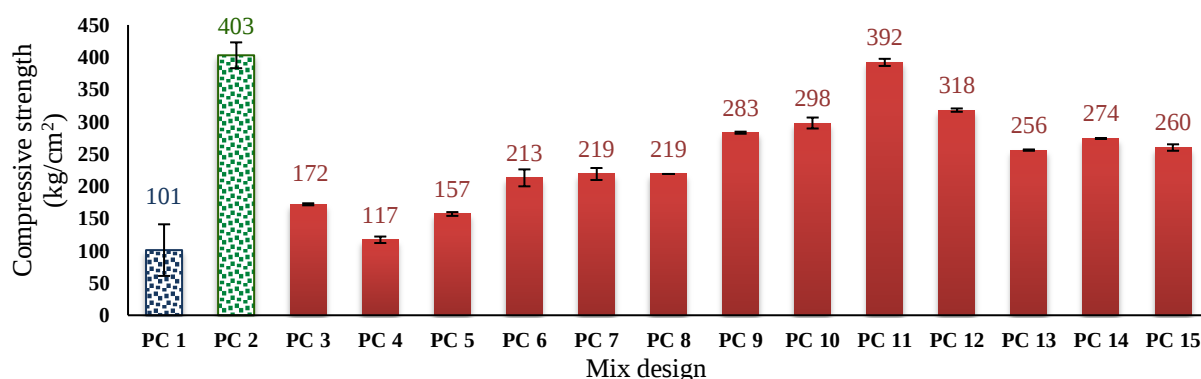


Fig. 5. 28-day mean compressive strength test results (kg/cm²)

ترکیب‌ها (از ۹ تا ۱۵) مقدار دبی بیش‌تری از خود نشان داد و مقدار آب مورد نظر در مدت زمان کوتاهی عبور کرد. همچنین در طرح اختلاط ۱۱، با بالاترین عیار سیمان و میکروسیلیس، منافذ بتن با خمیر سیمان پر شده و به طور کامل بسته شد در نتیجه تخلخل که ویژگی اصلی این نوع بتن است از بین رفته و آبی عبور نکرد. در این نمونه در هنگام تراکم، خمیر سیمان به سمت پایین نمونه حرکت کرده و منافذ خالی را در لایه‌های پایین آن اشغال کرده است.

بهبود ویژگی‌های مکانیکی و کاهش نفوذپذیری در بتن های حاوی میکروسیلیس به علت کاهش ضخامت ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان، ریزبودن میکروسیلیس و واکنش پذیری بالای آن مشاهده می‌شود.

در پژوهش کرانمای و همکاران [23] نفوذپذیری بتن بدون استفاده از ماسه برابر $6/3$ (mm/s) بدست آمد که با استفاده از ۲۰ درصد ماسه میزان نفوذپذیری به $3/9$ (mm/s) کاهش یافت. در آزمایش دیگر، حسنی و همکاران [20] نفوذپذیری بتن متخلخل بدون استفاده از الیاف را برابر $3/16$ (mm/s) بدست آوردند که با استفاده از الیاف به مقدار $7/5$ درصد، ضریب نفوذپذیری به $2/87$ (mm/s) رسید و ۹ درصد کاهش در این آزمایش مشاهده شد. در این پژوهش در طرح اختلاط شماره ۹ حاوی ماده پوزولانی میکروسیلیس و ماسه، ضریب نفوذپذیری برابر $3/43$ (mm/s) به دست آمد که مناسب روسازی است.

۳.۳. آزمایش مقاومت در برابر ذوب و یخبندان

نمونه‌های بتن متخلخل و معمولی در شرایط یکسان تحت

همچنین، در پژوهش بهرامی و همکاران [9] برای ساخت بتن متخلخل از میکروسیلیس به مقدار ۷ درصد وزن سیمان استفاده شد که بیشترین مقاومت فشاری برابر 298 (kg/cm²) به دست آمد. در این پژوهش با استفاده از میکروسیلیس ۷ درصد وزن سیمان، مقاومت فشاری با حفظ نفوذپذیری مناسب، در حدود 300 (kg/cm²) به دست آمد.

۲.۳. آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد $18 \times 18 \times 5$ cm استفاده شد. نمونه‌های ۹ تا ۱۵ با مقاومت فشاری ۷ روزه بالای ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای آزمایش نفوذپذیری انتخاب شدند. شکل (۶) دبی نمونه‌های مکعب مستطیل را نشان می‌دهد و محدوده دبی از صفر تا $111/1$ سی‌سی بر ثانیه است.

شکل ۶. مقایسه نتایج دبی نمونه مکعب مستطیل

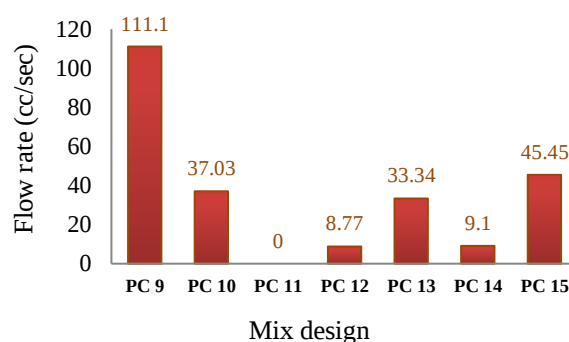


Fig. 6. Flow rates of the specimens

نتایج نمونه‌های مکعب مستطیل نشان داد که طرح اختلاط ۹ با داشتن عیار سیمان و میکروسیلیس کمتر نسبت به سایر

(۸) نشان داده شده است.

جدول ۸ کاهش وزن نمونه‌های بتن متخلخل پس از گذشت ۲۳ سیکل آزمایش ذوب و یخبندان

Mix design	Weight before test (gr)	Weight after test (gr)	Weight loss (%)
PC 10	4565	4560	0.11
PC 11	4450	4400	1.12
PC 12	4900	4880	0.41
PC 13	5700	5670	0.53

Table 7. Weight loss of specimens after 23 cycles of freeze and thaw test

شکل ۸ مقایسه نتایج آزمایش‌ها

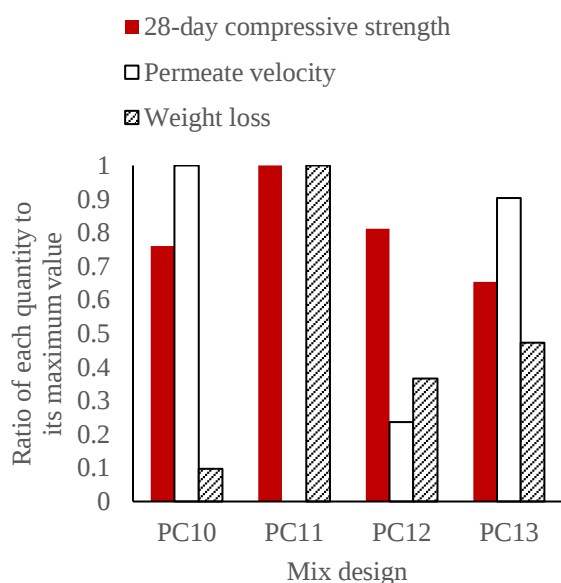


Fig. 8. Comparison of tests results

در شکل (۸) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذپذیری و کاهش وزن در آزمایش ذوب و یخبندان برای طرح اختلاط‌های ۱۰ تا ۱۳ مقایسه شده‌اند. در این شکل، مقادیر این پارامترها به صورت نرمالیزه شده و نسبت به مقدار بیشینه هرکدام نشان داده شده است. مطابق نتایج، طرح شماره ۱۰ حاوی سنگدانه شن بادامی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه (298 kg/cm^2) به دلیل داشتن فضاهای خالی زیاد، مقاومت بهتری در برابر ذوب و یخبندان در مقایسه با طرح‌های اختلاط ۱۱ تا ۱۳ که حاوی سنگدانه شن نخودی بودند، از خود نشان داد. طرح شماره ۱۱ حاوی سنگدانه شن نخودی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه (392 kg/cm^2)، به دلیل مقدار زیاد سیمان و میکروسیلیس و

آزمایش ذوب و یخبندان بررسی شدند. نتایج آزمایش نشان داد که پس از گذشت ۱۰ سیکل، ترک‌های ریزی در سطح نمونه بتن معمولی ظاهر شد. همچنین پس از گذشت ۱۶ سیکل، بتن معمولی بطور کامل دچار خرابی شد و شکست اتفاق افتاده، از نوع شکست خمیر سیمان است. ولی در نمونه‌های بتن متخلخل پس از گذشت ۲۳ سیکل هیچ ترک مشاهده نشد و نمونه‌های بتن متخلخل دوام بهتری در برابر ذوب و یخبندان از خود نشان دادند. شکل (۷) نمونه بتن متخلخل تحت آزمایش ذوب و یخبندان پس از گذشت ۲۳ سیکل (بدون ترک خوردگی) و نمونه بتن معمولی پس از گذشت ۱۶ سیکل (حالت متلاشی شده) را نشان می‌دهد.

در بتن‌های معمولی، خمیر سیمان به طور کامل ذرات سنگدانه را احاطه می‌کند و همه فضاهای بین سنگدانه‌ها اشغال شده و نفوذپذیری توسط خمیر سیمان کنترل می‌شود. در حالی که در بتن‌های متخلخل، به طور ایده آل، خمیر سیمان بدون آنکه حجم زیادی از فضای بین سنگدانه‌ها را اشغال کند، ذرات سنگدانه را احاطه می‌کند و به آب اجازه حرکت سریع را می‌دهد [24].

در مطالعه یانگ و همکاران، با وجود شرایط یکسان، نمونه بتن معمولی پس از گذراندن ۱۳ چرخه به طور کامل دچار شکست شده، در حالی که نمونه بتن متخلخل تا ۳۰۰ چرخه بدون شکست باقی ماند. پیشرفت آهسته آسیب دیدگی در بتن متخلخل را می‌توان به دلیل فشار کمتر در لایه نازک خمیر در خلال چرخه‌های یخ زدن و آب شدن دانست [25].

شکل ۷. نمونه‌های بتن متخلخل و معمولی



Fig. 7. Normal and pervious concrete specimens

با توجه به عدم ترک خوردگی و پوسته شدن نمونه‌های بتن متخلخل، میزان کاهش وزن نمونه‌ها بررسی شد که در جدول

که حاوی سنگدانه شن نخودی بودند، از خود نشان داد.

References

۵. منابع

- [1] NRMCA. 2010 CIP 38 – Pervious Concrete. *Brochure of National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA).
- [2] Tennis, P.D., M.L. Leming, & D.J. Akers, 2004 Pervious concrete pavements. *Portland Cement Association Skokie, IL*.
- [3] ACI Committee 522. 2010 Report of Pervious Concrete, *ACI 522R-10 Report*.
- [4] Hosseinzadeh S. & Abtahi S. 2011 Experimental assessment of duration of pervious concrete pavements, *Master thesis*, Isfahan university of technology (In Persian)
- [5] Croney, D. & P. Croney, 1998 Design and Performance of Road Pavements. *McGraw Hill*, New York.
- [6] Ghafoori, N. & S. Dutta, 1995 Development of no-fines concrete pavement applications. *Journal of Transportation Engineering*. 121(3), 283-288.
- [7] Liu, H., et al., 2018 Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios. *Applied Sciences*. 8(8), 1217.
- [8] B.V.R.Murthy & G.Rajeswari, 2018 Study on Strength Improvement of Pervious Concrete.
- [9] Bahrami A., Mahboub R. & Raftari M., 2017 Micro silica incorporation in pervious concrete pavements, *1st National conference on new approaches in civil engineering, architecture and urban development* (In Persian)
- [10] Pachideh G., Golhaki M., Asgari M. & Ghayebi A., 2017 Performance assessment of pervious concrete pavements containing micro silica, *2nd national conference on applied research in structural engineering and construction management*, Sharif university of technology (In Persian)
- [11] Arifi, E. & E.N. Cahya. 2017 Effect of fly ash on the strength of porous concrete using recycled coarse aggregate to replace low-quality natural coarse aggregate. in *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC.
- [12] R.Poovitha & G.Sarath, 2017 An Experimental Study on Properties of Pervious Concrete with Partial Replacement of Cement by Flyash.
- [13] Liang, J., et al., 2017 The Effect of Different Admixtures on the Basic Properties of Recycled Pervious Concrete. *Chemical Engineering Transactions*. 59, 355-360.
- [14] Kumaar, C.M., U.M.V. Raj, & D. Mahadevan, 2015 Effect of Titanium di-oxide in Pervious Concrete. *International Journal of ChemTech Research*. 8(8), 183-187.
- [15] Sri Ravindrarajah, R. & S. Kassis, 2014 Effect of supplementary cementitious materials on the properties of pervious concrete with fixed porosity.
- [16] Schaefer, V.R. & K. Wang, 2006 Mix design development for pervious concrete in cold weather climates, *Iowa. Dept. of Transportation. Highway Division*.

پیر شدن منافذ با خمیر سیمان، فضاهای خالی کمتری داشته و با وجود مقاومت فشاری بالا در نمونه مورد نظر، انبساط ناشی از یخ زدگی بیشترین خرابی را در این طرح باعث شد. با توجه به شکل (۷) نمونه شماره ۱۰ با مقدار مقاومت فشاری و سرعت نفوذ بالاتر و کاهش وزن کمتر پس از ۲۳ سیکل ذوب و یخبندان نتیجه مناسب‌تری نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

به منظور دستیابی به بتنی با مقاومت و نفوذپذیری مناسب، مشخصات مکانیکی بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری و مقاومت در برابر ذوب و یخبندان مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

(۱) در تمامی طرح‌های اختلاط به ویژه طرح شماره ۱۱ افزایش عیار سیمان و میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری شد. اما میزان ماسه بیشتر و ته‌نشینی ملات هنگام تراکم در نمونه ۱۱ منجر به بسته شدن منافذ و از بین رفتن نفوذپذیری مورد انتظار این نوع بتن شد.

(۲) طرح اختلاط شماره ۹ با مقدار میکروسیلیس ۷ درصد وزن مواد سیمانی و مقاومت فشاری مکعبی ۲۸۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع با دبی ۱۱۱/۱ سی‌سی بر ثانیه بیشترین سرعت نفوذ را بین نمونه‌های آزمایش شده از خود نشان داد. این طرح اختلاط دارای کمترین میزان ریزدانه در بین نمونه‌های ۹ تا ۱۵ است.

(۳) در آزمایش ذوب و یخبندان نمونه‌های بتن متخلخل با نمونه بتن معمولی با مقاومت فشاری مشابه مقایسه شد و مطابق نتایج حاصل، نمونه‌های بتن متخلخل به علت داشتن سطوح نفوذپذیر، دوام بهتری نسبت به بتن معمولی از خود نشان دادند. در آزمایش ذوب و یخبندان، نمونه بتن معمولی پس از ۱۶ چرخه به طور کامل دچار شکست شد در حالی که نمونه‌های بتن متخلخل تا ۲۳ چرخه هیچ ترک و شکستی از خود نشان ندادند.

(۴) در بین نمونه‌های بتن متخلخل تحت آزمایش ذوب و یخبندان، طرح شماره ۱۰ حاوی سنگدانه شن بادامی نسبت به سایر نمونه‌ها با داشتن فضاهای خالی زیاد، مقاومت بهتری در برابر ذوب و یخبندان در مقایسه با طرح‌های اختلاط ۱۱ تا ۱۳

- [21] Khoshnavaz A., Foroughi asl A. & Lotfollahi yagin M., 2016 Permeability assessment of pervious concrete, *Master thesis*, University of Tabriz (In Persian)
- [22] Shirgir B., Alizadeh H. & Shirgir V., 2016 Experimental investigation of the effect of nano silica addition on abrasion resistance of pervious concrete pavements, *Quarterly journal of transportation engineering*, 8(2), 1-12. (In Persian)
- [23] Kiranmaye, B.R., D. Tarangini, & K.R. Reddy, 2018. Effect of Glass Fiber on Properties of Pervious Concrete. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(4).
- [24] Kevern, J.T., Wang, K. and Schaefer, V.R. 2010 Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(5), 469 – 475.
- [25] Yang, Z., Brown, H. and Cheney, A. 2009 Influence of moisture conditions on freeze and thaw durability of portland cement pervious concrete. *Department of engineering technology and industrial studies*.
- [17] Yang, J. & Jiang, G. 2003 Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and concrete research*, 33(3), 381-386.
- [18] Adebayo Ibrahim, H., et al. 2020 Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. *Construction and building materials*. (253), 1-12.
- [19] Wang, H., et al. 2019 Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. *Construction and building materials*. (202), 387-395.
- [20] Hassani A., Shirgir B. & Kadkhodazadeh Sh., 2016 Effect of polypropylene fibers on abrasion of pervious concrete pavements, 4th national conference on applied research in civil engineering, architecture and urban management, *K. N. Toosi university of technology* (In Persian)

Investigating some mechanical properties of pervious concrete containing micro silica

Vahid Bagheri¹, Alireza Mohammadjafari Sadeghi^{2*}, Hasan Afshin³

1. MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

*mohammadjafari@sut.ac.ir

Abstract

Pervious concrete is a particular type of concrete with high porosity and often without fine aggregates or with little sand. The sufficient amount of cement paste covers and glues aggregates in a porous matrix together, resulting in a fast drainage system. On the other hand, high porosity and low amount of cement paste lessen the compressive strength of this type of concrete in comparison with normal concretes. Its main application is in the construction of pavements and management of stormwater. Pervious concrete has many economic and environmental benefits. Reducing the costs of surface water drainage, protecting roads from floods during major storms, preventing contamination of rainwater, recharging groundwater resources, and preventing road surface damage from freezing are some of its advantages.

In this study, compressive strength, permeability, and freeze-thaw resistance of pervious concrete specimens containing micro silica have been investigated. Fifteen mix designs containing different amounts and sizes of aggregates, and water to cement ratios, and incorporating highly reactive, amorphous micro silica were prepared. The specimens were demolded after 24 hours and were cured in water with a temperature of 23°C until the test day. The compressive strength of the specimens was evaluated. Then, permeability and freeze-thaw resistance tests were conducted on selected mixes.

According to the results, the compressive strength of the specimens after 28 days of curing was in the range of 101 to 404 kgf/cm². Mix designs containing higher cement and micro silica content, and with lower water to cement ratio exhibited high compressive strength. The flow rate of specimens evaluated in the range of 0 to 111 cc/s, and the corresponding permeate velocity was between 0 and 3.43 mm/s. In mix number 11 with the highest cement and micro silica content, the flow rate was equal to zero due to the filling of concrete pores with cement paste, which happened in bottom layers during vibration. It is worth mentioning that the higher content of sand in the mix number 11 was also effective in the sedimentation of cement paste during vibration. Pervious concrete specimens, due to the permeability, are more durable in freezing and thawing cycles than normal concrete. After 10 cycles of freeze-thaw tests, micro cracks appeared on the surface of normal concrete specimens, and they were utterly destroyed after 16 cycles through fracture of cement paste. However, there were no visible cracks in pervious concrete specimens even after 23 cycles. Weight loss of pervious concrete specimens in freezing and thawing cycles was evaluated and compared in different mix designs. Mix number 10 containing medium gravel aggregates displayed better freeze-thaw resistance than mixes numbers 11 to 13, which contain fine gravel aggregates. This can be attributed to the more porous structure of the former specimen in comparison with the latter mentioned ones. In the case of mix number 11, as mentioned earlier, because of low permeability despite high compressive strength, maximum fracture occurred due to expansion in freezing cycles.

Some of the studied mixes are appropriate in pavement construction, such as parking lots or sidewalks, including mix number 9, which contains micro silica at an amount of 7 percent of cement weight with compressive strength of 283 kg/cm² and a flow rate of 111 cc/s.

Keywords: Pervious concrete, Micro silica, Compressive strength, Permeability, Freeze-thaw resistance