

## تأثیر افزودن پوزولان‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی و جذب آب روسازی بتنی متخلخل

علمی - پژوهشی

قاسم پاچیده\*، پسادکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

مجید قلهکی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

امین مشتاق، مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Pachideh@sharif.edu

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

صفحه ۶۶-۵۱

### چکیده

در این مقاله به بررسی عملکرد بتن متخلخل روسازی حاوی انواع پوزولان‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه پرداخته شد. بدین منظور تعدادی نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر و مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر جهت انجام آزمایشات مقاومت فشاری و کششی و آزمایش جذب آب (دوام) ساخته شد. پوزولان‌های بکار رفته شامل میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و سربراره کوره آهن‌گدازی بوده که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد استفاده شدند. لازم به ذکر است شن ریزدانه‌ی بکار رفته در این مقاله از معدن هامش‌بر استان سمنان به عنوان مصالح بومی بکار گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از میکروسیلیس و سربراره کوره آهن‌گدازی در بتن متخلخل بیشترین تأثیر را در بهبود مقاومت فشاری و کششی داشته بطوری که بطور میانگین مقاومت فشاری ۶۰ درصد و مقاومت کششی تا حدود ۳ برابر نسبت به نمونه شاهد بهبود بخشیده شد. همچنین در آزمایش جذب آب، در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، با افزودن پوزولان‌های مختلف درصد جذب آب کاهش یافته، بطوری که طبق آیین‌نامه CEB-FIP در رده متوسط و خوب قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: خاکستر بادی، روسازی بتنی متخلخل، زئولیت، سربراره کوره آهن‌گدازی، میکروسیلیس

### ۱- مقدمه

می‌شود. حجم عمده‌ی این مخلوط را سنگدانه‌ها تشکیل داده و بیشتر سنگدانه‌ها آغشته به خمیر سیمان حالتی چسبناک داشته و وزن مخصوص حاصل در محدوده‌ی ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. از این نوع بتن به عنوان رویه برای اولین بار در سال ۱۸۶۵ در کشور اسکاتلند و در یک معبر شهری با استفاده از عمل تراکم برای کنترل فضای خالی استفاده شد [Croney et al., 1998]. مزایای بتن متخلخل [Bruce and Ferguson, 2005]

در روسازی، شامل موارد زیر است:

- روسازی مورد علاقه‌ی طرفداران محیط زیست

- کاهش آلودگی صوتی

بتن متخلخل را مخلوطی از سیمان و آب و با دانه‌بندی بدون ریزدانه یا با ریزدانه‌ی کم و در مواردی افزودنی‌های شیمیایی تشکیل می‌دهد، بگونه‌ای که تخلخل آن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد متغیر خواهد بود. نبود ریزدانه یا ریزدانه‌ی کم کاهش کارایی مخلوط تازه این نوع بتن را به دنبال دارد. بنابراین، برای دستیابی به مشخصاتی مانند مقاومت و نفوذپذیری، ضروری است که عملیات تراکم در حین ساخت آن استفاده شود. در بتن متخلخل سخت شده، فضای خالی موثر نقش اصلی و تأمین‌کننده‌ی 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 کرده و از بخش زیرین آن خارج

Jiang و Yang به این نتیجه دست یافتند که استفاده از موادی همانند میکروسیلیس و فوق روان کننده، می تواند مقاومت بتن متخلخل را افزایش دهد [Yang and Jiang, 2003].

Kevern به این نتیجه دست یافت که استفاده از مواد پلیمری لاستیکی باعث بهبود کارایی، مقاومت، نفوذپذیری و مقاومت ذوب و انجماد بتن متخلخل را می شود [Kevern, 2008]. همچنین Shu و همکاران به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات درصد تخلخل، نفوذپذیری، مقاومت فشاری و کششی و... بتن متخلخل پرداختند [Shu et al., 2011].

شیرگیر و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع دانه بندی بر ویژگی های مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل سخت شده پرداختند. بر این اساس ۵ نوع دانه بندی بر طبق استاندارد پیشنهاد شد. بر طبق نتایج بدست آمده، با تغییر در دانه بندی مصالح مقادیر مقاومت بطور قابل توجهی متغیر خواهند بود. بطوری که اختلاف بین کمترین و بیشترین مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب برابر ۳۳ و ۲۰ درصد حاصل شد [شیرگیر و همکاران، ۱۳۹۰].

در مطالعات آزمایشگاهی اخیر مقاومت فشاری بتن متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت [Lian and Zhuge, 2010]. خصوصیات مقاومتی بتن متخلخل به عوامل گوناگونی از جمله میزان تخلخل، حجم حفرات و غیره بستگی دارد [Corapcioglu, 1994]. مطالعات دیگری در زمینه تأثیر تخلخل بر مقاومت مواد سیمانی انجام شد [Roy and Gouda, 1973; Beaudoin and Ramachandran, 1992; Neville, 1995]. در این مطالعات سیمان هیدراته بعنوان ماده اصلی جهت پوشش منافذ استفاده شد اما با این حال تخلخل در بتن وجود داشته و ارتباط مستقیمی بین میزان تخلخل و مقاومت فشاری بتن وجود دارد.

ماده چسبنده ای به نام "Geopolymer" برای اولین بار توسط Davidovits شناخته شد. واکنش پلیمری ارتباط خوبی بین مواد پوزولانی (متاکائولین، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، سرباره کوره آهن گدازی و میکروسیلیس) [Pachideh and Gholhaki, 2020; Pachideh et al., 2019; Davidovits, 1994; Okoye et al., 2016] با محلول قلیایی (هیدروکسید، سیلیکات) ایجاد کرده و سطح مقاومت سیمان های معمولی را ارتقاء می بخشد [Okoye et al., 2016; Tho-in, 2012].

- بهبود شرایط ایمنی و ممانعت از پدیده ی آب سطحی

- کاهش شیب حرارتی

- کاهش خطر تورم در اثر یخبندان

- جلوگیری از رواناب سطحی

چهار دلیل اصلی برای توجیه مقاومت پایین بتن متخلخل وجود داشته که عبارتند از:

- کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگدانه ها بخاطر نبود ریزدانه

- ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگدانه ها

- سطح چسبندگی پایین بخاطر نبود ریزدانه یا ریزدانه ی کم - وجود حفرات زیاد

از طرفی سه روش مرسوم و در دسترس برای بهسازی ویژگی های مقاومتی بتن متخلخل در مطالعات گزارش شده است که عبارتند از: روش اول: افزایش سطح چسبندگی خمیر سیمان با سنگدانه ها، روش دوم: بهبود مقاومت خمیر سیمان و روش سوم: تقویت مقاومت ناحیه انتقال.

بتن متخلخل روسازی در حدود ۳۰ سال قبل در انگلستان و آمریکا استفاده شد [Schaefer et al., 2006].

همچنین بدلیل علاقه و تحقیقات در زمینه ی بتن متخلخل، در سراسر دنیا بخصوص آمریکا و ژاپن گسترش بیشتری یافت [Yang and Jiang, 2003]. اگرچه در زمینه ی اطلاعات اساسی شامل تأثیر نسبت تخلخل، نسبت آب به سیمان، خصوصیات سیمان مورد استفاده، نسبت حجمی سنگدانه، زبری سنگدانه و مقاومت بتن متخلخل مطالعاتی صورت گرفت [Schaefer et al., 2006; Yang and Jiang, 2003; Malhotra, 1976; Meininger, 1988; Ghafoori, 1995; Yanagibashi and Yonezawa, 1998; Fujiwara et al., 2013].

بر اساس تحقیقات انجام شده، عوامل مهم موثر در مقاومت بتن متخلخل شامل درصد تخلخل، نسبت آب به سیمان، خصوصیات سیمان مصرفی، اندازه و حجم مصالح سنگی می باشند [Pachideh and Gholhaki, 2021; Schaefer et al., 2006; Pachideh et al., 2020; Deo and Neithalath, 2010; Crouch, 2007]. همچنین خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل به کمک استفاده صحیح از مواد و نحوه اختلاط آن ها می تواند بهبود یابد [Sumanasooriya and Neithalath, 2011; Huang et al., 2010].

[et al., 2016] با توجه به مطالعات اخیر در زمینه بتن‌های معمولی، خودتراکم و ... و همچنین تحقیقات بر روی ملات‌ها و کاربرد انواع پوزولان‌ها در بتن و ملات، مشاهده شده است که افزودن آن‌ها بعنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در بتن یا ملات می‌تواند در مقاومت فشاری، کششی و خمشی و جذب آب موثر باشند. لذا، از آنجایی که چنین تحقیقات منسجمی که بتواند تاثیر چهار نوع از پر کاربردترین پوزولان‌ها را در بتن متخلخل بررسی کند وجود نداشته، بنابراین، در این مقاله با جایگزینی خاکستر بادی، زئولیت، میکروسیلیس و پودر سرباره کوره آهن‌گدازی به سیمان موجود در بتن متخلخل در نسبت‌های وزنی مختلف، خواص مقاومتی و جذب آب آن‌ها بررسی شد.

## ۲- روسازی متخلخل

در اواخر دهه ۱۹۶۰، تحقیقات در مورد نوع جدیدی از ساختار روسازی در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی موسسه فرانکلین در ایالات متحده آغاز شد. با حمایت آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA)، روسازی متخلخل توسعه داده شد. این ساختار جدید روسازی، ابتدا در پارکینگ‌ها مورد استفاده قرار گرفت. روسازی متخلخل نوع متمایزی از روسازی است که اجازه عبور آزادانه مایعات ناشی از بارش یا هر جای دیگر را از طریق ساختار خود می‌دهد که باعث کاهش یا کنترل مقدار رواناب مناطق اطراف می‌شود. با اجازه نفوذ به بارش و رواناب از طریق ساختار، این نوع روسازی را می‌توان به‌عنوان یک عمل مدیریت فاضلاب‌های سطحی بکار بست. این نوع خاص از روسازی نیز ممکن است همراه با کاهش مقدار ورودی آلاینده‌ها، به آب‌های زیرزمینی از طریق فیلتر کردن رواناب باشد. آن‌ها به طور کلی برای مناطق پارکینگ و یا جاده‌ها با ترافیک سبک تر طراحی شده‌اند. ساختار پیشنهادی اصلی روسازی متخلخل شامل یک سطح درشت دانه، روی یک سطح فیلتر و اساس با دانه‌های گسسته (یا مخزن) می‌باشد که همه آن‌ها روی بستر نفوذپذیر ساخته شده است. با این حال، این نوع روسازی برخی معایب هم دارد. به طور کلی عدم تخصص فنی در این نوع از روسازی‌ها به خصوص در آب و هوای سرد وجود دارد. نگرانی ناشی از ساختار گسسته روسازی، پتانسیل گرفتگی را

بنابراین، برای کاهش مصرف انرژی در تولید فرآیند متاکاؤلین، از پودر خاکستر بادی که از مواد زائد احتراق ذغال‌سنگ بوجود می‌آید، استفاده می‌شود [Wongsa et al., 2016; Sata et al., 2012; ACI 522R-10, 2010].

زئولیت طبیعی ماده‌ای معدنی است که بطور وسیعی در مناطق مختلف دنیا استفاده شده است [Feng and Peng, 2005]. این ماده معدنی نوعی سیلیکات آلومینیوم کریستاله با ساختار سه بعدی است. کریستال زئولیت طبیعی شامل تعداد زیادی کانال‌ها و حفرات با اندازه  $3 \times 10^{-4}$  تا  $10^{-4} \times 4$  می‌باشد.

منافذ و کانال‌های کوچک باعث ایجاد سطح ویژه بزرگ در حدود  $35-45 \text{ m}^2/\text{gr}$  [Mumpton, 1993] شده که باعث می‌شود زئولیت طبیعی تا ۳۰٪ وزن خود آب کمتری جذب کند. زئولیت طبیعی به رغم ساختار کریستالی، خواص پوزولانی نیز دارد [Mindess et al., 2002].

استفاده از خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند باعث پایداری خواص بتن معمولی و جنبه‌های دیگر آن شود. گزارش‌ها حاکی از آنست که بدلیل پایین بودن سرعت هیدراتاسیون خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به سیمان پرتلند معمولی، مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی بتن را افزایش می‌دهند [Mehta, 1986]. از سوی دیگر، سرعت هیدراتاسیون پایین باعث آهسته‌تر شدن افزایش مقاومت بتن شده، بنابراین، حضور خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی تأثیر منفی بر روی سرعت رشد مقاومت داشته اما می‌تواند در درازمدت باعث افزایش مقاومت شوند [Li and Zhao, 2003]. بطور کلی بدلیل بافت شیشه‌ای خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی بعنوان جایگزین سیمان، باعث کاهش مصرف آب برای رسیدن به کارایی موردنظر بتن می‌شوند [Mindess et al., 2002; Deb et al., 2014; Song and Yin, 2016]. همچنین بدلیل اندازه کوچک آن‌ها و افزایش دوام بتن، در برابر یون‌های کلراید مقاومت مناسبی دارند [Leng et al., 2000; Glinicki et al., 2016]. در تحقیق دیگری، با افزایش خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی به بتن متخلخل، باعث کاهش مقاومت فشاری و مدول دینامیکی آن شده هرچند که این مقدار کاهشی بسیار ناچیز بوده است [Lee

۵۰/۲۲	۱۷۷۰	۲۸	-۳	۲۰۵	۸۶	۱۴۳۵	۴
			۵				
۶۵/۸۸	۱۸۰۰	۲۶	-۳	۲۱۵	۹۰	۱۵۰۵	۵
			۵				
۸۴/۲۴	۱۸۴۰	۲۱	-۳	۲۳۰	۹۷	۱۶۱۰	۶
			۵				
۷۳/۹۸	۱۸۲۰	۲۵	-۳	۲۵۰	۹۵	۱۵۰۰	۷
			۵				
۹۷/۷۴	۱۸۷۰	۲۰	-۳	۲۶۵	۱۰۰	۱۵۹۰	۸
			۵				
۱۲۳/۱۲	۱۹۱۰	۱۶	-۳	۲۸۰	۱۰۶	۱۶۸۰	۹
			۵				
۹۰/۱۸	۱۹۶۰	۲۲	-۳	۳۰۰	۱۰۵	۱۵۰۰	۱۰
			۵				
۱۱۵/۰۲	۱۹۸۵	۱۸	-۳	۳۱۵	۱۱۰	۱۵۷۵	۱۱
			۵				
۱۳۱/۲۲	۱۹۹۵	۱۶	-۳	۳۲۵	۱۱۴	۱۶۲۵	۱۲
			۵				

جدول ۲. خلاصه طرح‌ها

نام طرح	شرح
A	بتن متخلخل بدون استفاده از پوزولان (نمونه‌ی شاهد)
M10	بتن متخلخل حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس
M20	بتن متخلخل حاوی ۲۰ درصد میکروسیلیس
Z10	بتن متخلخل حاوی ۱۰ درصد زئولیت
Z20	بتن متخلخل حاوی ۲۰ درصد زئولیت
K10	بتن متخلخل حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی
K20	بتن متخلخل حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی
S10	بتن متخلخل حاوی ۱۰ درصد سرباره کوره آهن گدازی
S20	بتن متخلخل حاوی ۲۰ درصد سرباره کوره آهن گدازی

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌ها (درصد)

شماره	خاکستر بادی	زئولیت	میکروسیلیس	سیمان
۷-۱	-	-	۰/۸	-
-	-	-	۰/۵	-
-	-	-	۰/۳	-
۴-۳۴	۵۶/۹۵	۶۷/۷۹	۹۶/۴	۲۲/۴۵
۳-۱/۳	۶/۵	۱/۴۴	۰/۸۷	۳/۹۵
۷-۱۱	۲۵/۷۶	۱۳/۶۶	۱/۳۲	۴/۸۵

افزایش می‌دهد. خطر بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی نیز همانند نشت مواد شیمیایی سمی به سیستم وجود دارد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۱۶۲ عدد نمونه استوانه‌ای بتن حاوی پوزولان‌های مختلف از جمله میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی با مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد به‌عنوان جایگزین سیمان ساخته شد. نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰X۱۰ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش مقاومت کششی و قالب‌های مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب ساخته شدند. بمنظور دستیابی به یک طرح اختلاط مناسب و بتنی با مقاومت نسبتاً بالا، تعداد ۱۲ طرح (جدول ۱) با مقادیر وزنی و تخلخل متفاوت در نظر گرفته شده و برای هر طرح تعداد سه عدد نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۲۰X۱۰ سانتی‌متر ساخته و آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر روی کلیه نمونه‌ها انجام شد. در نهایت طرح شماره ۱۲ با کمترین تخلخل (۱۶ درصد) و بیشترین مقاومت فشاری (۱۳۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) به‌عنوان طرح هدف در این مقاله بمنظور انجام آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و جذب آب به همراه افزودن پوزولان‌های مختلف انتخاب گردید. همچنین، در جدول ۲ خلاصه‌ای از نامگذاری نمونه‌ها طبق طرح اختلاط هدف (طرح شماره ۱۲) آورده شده است. طبق جدول ۱، حروف A, M, Z, K و S به ترتیب بیانگر نمونه شاهد، میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی بوده و همچنین اعداد ۱۰ و ۲۰ نشان دهنده درصد جایگزینی پوزولان با سیمان در بتن می‌باشد.

جدول ۱. طرح‌های اختلاط اولیه

شماره طرح	شن (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	درصد	
				آبر روان کننده (%)	درصد تخلخل (%)
۱	۱۴۸۰	۸۳	۱۸۵	-۳	۲۹
				۵	
۲	۱۴۷۰	۹۵	۲۱۰	-۳	۲۷
				۵	
۳	۱۴۷۰	۱۱۰	۲۴۵	-۳	۲۵
				۵	



ب) خاکستر بادی

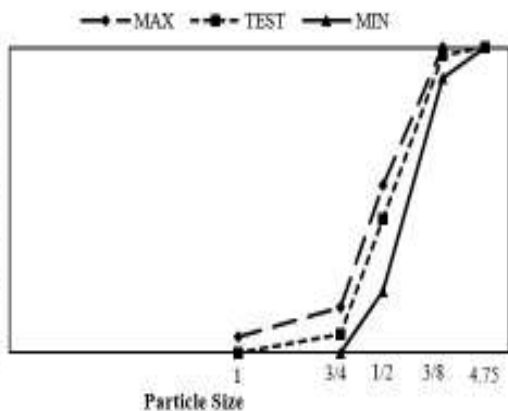


ت) سرپاره کوره آهن‌گدازی

شکل ۱. تصاویر پوزولان‌های استفاده شده

با توجه به محدودیت حداکثر قطر سنگدانه‌ها در نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی متر، حداکثر اندازه‌ی شن بکار رفته در این مقاله برابر با ۱۹ میلی متر بوده، همچنین بعلت اینکه حضور ماسه‌ی طبیعی باعث کاهش تخلخل در بتن شده، لذا، در ساخت بتن فقط از شن ریزدانه (نخودی) با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی متر استفاده شد.

منحنی دانه‌بندی شن بکار رفته در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، توزیع سنگدانه‌ها از پیوستگی مناسبی برخوردار می‌باشند.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی شن مصرفی

CaO	۶۴/۸۶	/۴۹	۱/۶۸	۱۰-۴	۴۰-۳۴
MgO	۰/۸	۰/۹۷	۱/۲	۲/۵	۹-۶
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۵	۰/۳۱	-	۰/۱۴	۰/۷۵-۰/۲۵
K <sub>2</sub> O	۰/۵۱	۱/۰۱	-	۰/۱۴	۱/۳-۰/۳
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	۰/۱۶	-	-	-
SO <sub>3</sub>	۰/۸۵	۰/۱۰	۰/۵	۰/۳۵<	-
CL	-	۰/۰۴	-	-	-
S	-	-	-	-	۱/۵-۰/۹

### ۳-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

سیمان استفاده شده در این مقاله، سیمان تیپ دو از کارخانه تولید سیمان شاهرود، آب مصرفی آب شرب شهر گرمسار و شن مصرفی نیز از معدن هامش‌بر تهیه شد. همچنین به جهت افزایش روانی و کارایی مناسب بتن از ابر روان ساز کربوکسیلاتی استفاده شد. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های بکار رفته در ساخت بتن در جدول ۳ آورده شده است.

شکل ۱ تصاویر پوزولان‌های بکار رفته در بتن متخلخل را نشان می‌دهد. همانطور، که ملاحظه می‌شود میکروسیلیس و زئولیت رنگ روشنی داشته اما خاکستر بادی و سرپاره کوره آهن‌گدازی تقریباً به حالت خاکستری رنگ می‌باشند.



الف) میکروسیلیس



ب) زئولیت

### ۳-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

در این مقاله، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. همچنین به مقدار حدود ۳ الی ۵ درصد از ابر روانساز بر پایه پرکربوکسیلاتی به عنوان کاهنده آب و با هدف افزایش کارپذیری بتن استفاده و نحوه اختلاط پوزولانها بصورت درصد وزنی سیمان صورت گرفت. کلیه مراحل اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه‌های استوانه‌ای، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه گرمسار انجام شد. لازم به ذکر است که نحوه اختلاط مصالح برای ساخت بتن، طبق استاندارد ASTM C192 انجام شد.

ابتدا تمامی شن (نخودی) به میکسر اضافه شده، سپس حدود یک سوم آب به آن افزوده و میکسر روشن شد و شروع به چرخیدن نمود. در نهایت به تدریج پوزولان، سیمان و آب باقیمانده به میکسر اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه نیز میکسر در این حالت چرخید. جدول ۴ جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

جدول ۴. جزئیات طرح های اختلاط مورد استفاده

(کیلوگرم بر مترمربع)

نوع بتن	سیمان	پوزولان	آب	سنگدانه	روان‌ساز
A	۱۱۴	۳۲۵	-		
M10	۱۱۴	۲۹۲/۵	۳۲/۵		
M20	۱۱۴	۲۶۰	۶۵		
Z10	۱۱۴	۲۹۲/۵	۳۲/۵		۳-۵ درصد
Z20	۱۱۴	۲۶۰	۶۵		وزنی سیمان
K10	۱۱۴	۲۹۲/۵	۳۲/۵		
K20	۱۱۴	۲۶۰	۶۵		
S10	۱۱۴	۲۹۲/۵	۳۲/۵		
S20	۲/۲۸۰	۲۶۰	۶۵		

### ۳-۳- روش آزمایش

عمل آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISIRI581 [INSO581, 2015] و بر روی بتن‌های ۷ و ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان مورد نظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه پوزولان و ابر روان کننده ساخته، سپس فرآیند نمونه‌گیری بتن به تعداد مجموعاً ۱۶۲ عدد (برای هر تست، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار ویریه گردید. پس از مدت ۲۴

ساعت قالب‌ها باز و داخل حوضچه آب (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار داده و نمونه‌ها پس از مدت ۷ و ۲۸ روز از داخل حوضچه آب خارج شدند.

### ۴- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از اتمام فرآیند عمل آوری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه، آن‌ها را از داخل حوضچه‌ی آب خارج نموده و به مدت حدود یک ساعت صبر کرده تا آب سطحی بتن خشک شود، سپس آزمایشات مقاومت فشاری و کششی و جذب آب نمونه‌ها انجام شد.

### ۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

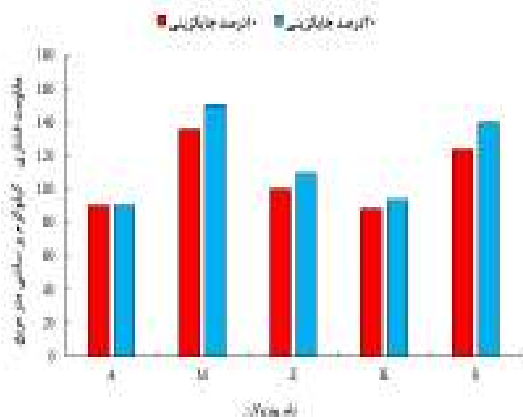
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C39 انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. بدین منظور برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک که به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند، قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار گرفتند. شکل ۳ تصویر نمونه‌ی مکعبی ساخته شده را نشان می‌دهد.



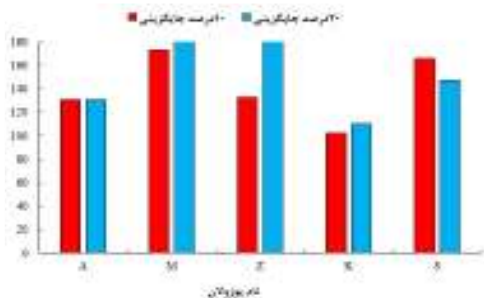
شکل ۳. نمونه مکعبی جهت انجام تست مقاومت فشاری

اشکال ۴ و ۵ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها با توجه به انواع پوزولان‌ها را در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهند. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود در سن ۷ روزه، با افزودن درصد‌های مختلفی از پوزولان‌ها به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن متخلخل مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بنابراین، تقریباً در همه‌ی نمونه‌ها در سن ۷ روزه با افزایش پوزولان از ۱۰ به ۲۰ درصد مقاومت فشاری از ۳٪ تا ۶۷٪ درصد بهبود می‌یابد. در این بین، افزودن خاکستر بادی سبب

مقاومت فشاری شده بطوری که استفاده از ژئولیت در سنین بالا نتایج مطلوب تری را خواهد داشت. بنابراین، با توجه به فشار زیادی که از جانب وسایل نقلیه بر بتن متخلخل روسازی وارد می‌شود، می‌توان با شناخت دقیق عملکرد پوزولان‌ها نسبت به بهبود ظرفیت فشاری آن اقدام نمود.



شکل ۴. مقاومت فشاری بر حسب نوع پوزولان در سن ۷ روزه



شکل ۵. مقاومت فشاری بر حسب نوع پوزولان در سن ۲۸ روزه

روزه

در جدول ۵ درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در درصدهای مختلف در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سن بتن متخلخل روسازی، نمونه‌ی شاهد (A) (که این روند بدیهی است) و نمونه‌ی حاوی ژئولیت (Z) رشد مقاومت بیشتری دارد.

جدول ۵. درصد افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نسبت

به سن ۷ روزه (%)

نام نمونه	درصد جایگزینی ۱۰ درصد جایگزینی	درصد جایگزینی ۲۰ درصد جایگزینی
A	٪۴۵	
M	٪۲۷	٪۳۰
Z	٪۳۲	٪۶۶
K	٪۱۶	٪۱۸
S	٪۳۴	٪۵

کمترین میزان افزایش در مقاومت فشاری شده بطوری که در مقدار ۱۰ درصد به میزان اندکی نسبت به نمونه‌ی شاهد مقاومت کمتری نیز دارد. همچنین استفاده از میکروسیلیس نسبت به سایر پوزولان‌ها افزایش مقاومت بیشتری را ایجاد کرده به نحوی که در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۶۷٪ و ۵۱٪ باعث افزایش مقاومت شده است. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج بدست آمده، سرباره کوره آهن گدازی در بتن متخلخل تقریباً رفتاری مشابه میکروسیلیس داشته و همچنین ژئولیت نیز مشابه خاکستر بادی با اندکی اختلاف، کمترین میزان بهبود مقاومت را دارد. بنابراین، به عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان کرد که با توجه به رفتار و تخلخل متفاوت این نوع از بتن (بتن متخلخل روسازی) نسبت به بتن‌های معمولی، استفاده از میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی باعث افزایش خاصیت خمیری و ایجاد ارتباط بهتر بین سنگدانه‌ها توصیه شده که این مسأله می‌تواند ضعف عمده‌ی بتن متخلخل (مقاومت فشاری پایین) را پوشش داده و تا حدود ۵۰ الی ۶۰ درصد باعث ارتقاء مقاومت فشاری شود. مطابق نتایج به دست آمده از شکل ۵ که مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه می‌باشد، تقریباً روندی مشابه نتایج در سن ۷ روزه را داشته با این تفاوت که بتن متخلخل حاوی ژئولیت در سن ۲۸ افزایش مقاومت با شیب بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. استفاده از میکروسیلیس به عنوان بهترین نوع پوزولان بکار رفته به لحاظ مقدار افزایش مقاومتی که داشته تا حدود ۴۹٪ مقاومت فشاری را افزایش داد. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی خاکستر بادی افزایش مقاومت چندانی نداشته و در مقدار ۱۰٪ به میزان اندکی نیز کاهش یافته است. همچنین در سن ۲۸ روزه در مقادیر ۱۰٪ و ۲۰٪ نه تنها باعث بهبود مقدار مقاومت فشاری بتن نشده بلکه مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۳۱٪ و ۱۶٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. لذا با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از خاکستر بادی در بتن متخلخل به سبب رفتار متفاوت آن نسبت به بتن معمولی (بتن حاوی درصدهای مختلفی از انواع سنگدانه‌ها) توصیه نمی‌شود.

در نتیجه به عنوان جمع‌بندی نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه می‌توان به این نکته اشاره نمود که جایگزینی میکروسیلیس، ژئولیت و خاکستر بادی به بتن متخلخل بعنوان جایگزین بخشی از سیمان، سبب بهبود

#### ۴-۲- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه ها، از روش کشش غیر مستقیم یا روش برزلی استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته بطوری که هیچ گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیروی قائم، منجر به شکست نمونه می شود. جک هیدرولیک دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می کند. مقاومت کششی بتن بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع طبق رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن:

$P$  = مقدار بار وارده (نیوتن)

$D$  = قطر نمونه ی استوانه ای (۱۰۰ میلی متر)

$L$  = طول نمونه ی استوانه ای (۲۰۰ میلی متر)

شکل ۶ نمونه ی استوانه ای به ابعاد  $20 \times 10$  سانتی متر که جهت انجام تست مقاومت کششی ساخته شده را نشان می دهد.

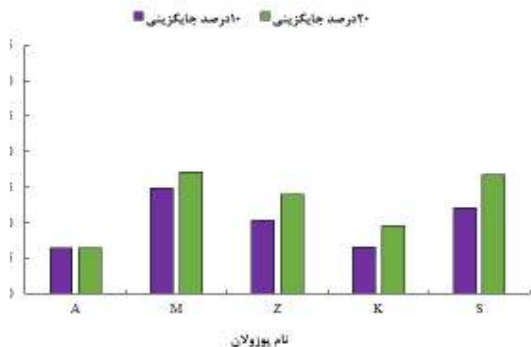


شکل ۶. نمونه استوانه ای جهت انجام تست مقاومت کششی

اشکال ۷ و ۸ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها با توجه به انواع پوزولان ها را در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می دهند. همانطور، که از شکل ۷ مشاهده می شود در سن ۷ روزه، افزودن میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده در بتن متخلخل روسازی، سبب بهبود

مقاومت کششی تا حدود ۲/۷ برابر (۲۷۰٪) نسبت به نمونه شاهد می شود. البته می توان تاحدودی با توجه به اینکه استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به سایر پوزولان ها شده، لذا، همین روند را در مقاومت کششی نیز مشاهده نمود. همچنین استفاده از زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی نیز افزایش مقاومت چشمگیری را از خود نشان داده است. با توجه به نتایج مقاومت کششی ۷ روزه نمونه های حاوی خاکستر بادی، با جایگزینی آن به میزان ۱۰٪ تقریباً تغییری در مقاومت کششی ایجاد نشده، اما در مقدار ۲۰٪ تقریباً ۵۰٪ باعث افزایش مقاومت کششی شده است. بنابراین، به عنوان جمع بندی نتایج نمونه ها در سن ۷ روزه می توان گفت که استفاده از پوزولان های بکار رفته در این تحقیق بجز خاکستر بادی در جهت افزایش مقاومت کششی این نوع از بتن (بتن متخلخل روسازی) در مواجهه با شرایط خاص بارگذاری های روسازی توصیه می شود.

مطابق شکل ۸، بر اساس نتایج بدست آمده از نمونه ها در سن ۲۸ روزه، با وجود اینکه استفاده از خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت کششی شده، اما حاشیه امنی در جهت افزایش چشمگیر مقاومت کششی ایجاد نکرده است. روند افزایش مقاومت در مابقی پوزولان ها مشابه سن ۷ روزه بوده با این نکته که افزایش مقاومت ها بیشتر از سن ۷ روزه می باشد. بطوری که نمونه های حاوی میکروسیلیس تا ۳/۳ برابر (۳۳۰٪) مقاومت کششی را نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. بطور کلی جایگزینی ۲۰٪ پوزولان بعنوان ماده ی چسباننده در بتن متخلخل در جهت ارتقاء مقاومت کششی پیشنهاد می شود. در جدول ۶ درصد افزایش مقاومت کششی نمونه ها در درصدهای مختلف در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش سن بتن متخلخل روسازی، نمونه ی حاوی میکروسیلیس (M) رشد مقاومت بیشتری داشته است. همچنین، در نمونه های Z و S با افزایش مقدار استفاده از آن در بتن، مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه کاهش یافته است.



شکل ۷. مقاومت کششی بر حسب نوع پوزولان در سن ۷ روزه



درصد وزن خشک شود. آخرین توزین به عنوان وزن خشک نمونه یادداشت گردید. پس از خنک شدن تدریجی نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، برای بدست آوردن وزن نمونه اشباع با سطح خشک، نمونه‌ها به داخل حوضچه آب با دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بازگردانده شدند. نمونه‌ها پس از گذشت حداقل ۴۸ ساعت از حوضچه مذکور خارج و پس از خشک کردن رطوبت سطحی توسط حوله خشک، توزین شدند. نمونه‌های مذکور دوباره به مدت ۲۴ ساعت در همان حوضچه نگهداری شده و سپس از حوضچه خارج گردیده و دوباره به همان شیوه قبلی توزین شدند. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵ درصد وزن سنگین‌تر باشد. در پایان، آخرین توزین به عنوان وزن اشباع با سطح خشک یادداشت گردیده و درصد جذب آب با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است.

$$(۲) \text{ درصد جذب آب} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

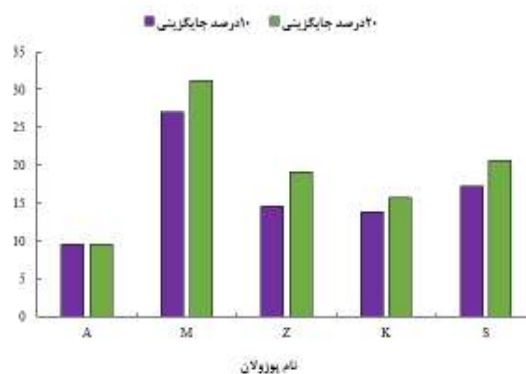
A = جرم خشک شده در کوره

B = جرم اشباع با سطح خشک می‌باشد.

CEB-FIP [CEB-FIP, 1989] کیفیت بتن را بر اساس درصد جذب آب به سه گروه خوب (کمتر از ۳ درصد)، متوسط (۳-۵ درصد) و ضعیف (بیشتر از ۵ درصد) تقسیم بندی می‌کند. همانگونه که از شکل ۹ مشاهده می‌گردد نمونه‌های حاوی زئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی که تقریباً جذب آب کمتر از ۰/۵٪ دارند به لحاظ کیفیت در گروه‌های خوب و متوسط قرار می‌گیرند. اما نمونه‌ی حاوی میکروسیلیس و همچنین نمونه‌ی شاهد درصد جذب آب بالاتر از ۰/۵٪ دارند که در دسته‌ی ضعیف محسوب می‌شوند. بنابراین، در سن ۷ روزه استفاده از میکروسیلیس در جهت بهبود جذب آب بتن متخلخل مناسب با روسازی توصیه نمی‌شود که نه تنها درصد جذب آب را کاهش نداده بلکه افزایش هم می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۰ که مربوط به درصد جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه می‌باشد، مشابه سن ۷ روزه نمونه‌های حاوی زئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی، درصد جذب آب کمتر از ۰/۵ داشته که در رده‌ی خوب و متوسط قرار می‌گیرند. اما نمونه‌ی شاهد و نمونه‌ی حاوی میکروسیلیس از وضعیت مناسبی برخوردار نیستند.

بنابراین، با جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نمونه‌ها می‌توان گفت که با افزایش سن نمونه‌ها، از مقدار



شکل ۸. مقاومت کششی بر حسب نوع پوزولان در سن ۲۸ روزه

جدول ۶. درصد افزایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه نسبت

به سن ۷ روزه (%)

نام نمونه	۱۰ درصد جایگزینی	۲۰ درصد جایگزینی
A	۵۰٪	
M	۸۳٪	۸۱٪
Z	۴۱٪	۳۶٪
K	۱۲٪	۶۵٪
S	۴۲٪	۲۴٪

#### ۴-۳- آزمایش جذب آب (دوام)

آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر و در سنین ۷ و ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM C642 انجام شد [ASTM C642, 2006]. از هر طرح سه نمونه مکعبی ساخته شده که جذب آب نهایی بر اساس میانگین‌گیری از مقادیر جذب آب بدست آمده برای هر نمونه محاسبه شد. نمونه‌ها را پس از عمل‌آوری در حوضچه‌های آب با دمای ثابت  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد، از آب خارج گردیده و پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، جهت تعیین وزن خشک در داخل کوره با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرارداده شدند. سپس نمونه‌ها از کوره خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین شدند. پس از آن برای ۲۴ ساعت دیگر نمونه‌ها در کوره قرارداده شده و سپس توزین گردیدند. این فرآیند تا آنجا ادامه پیدا کرده که تفاضل دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵

در جدول ۷ درصد کاهش جذب آب نمونه‌ها در مقادیر مختلف (۱۰ و ۲۰ درصد) در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه‌ی حاوی ژئولیت بیش از سایر نمونه‌ها کاهش جذب آب داشته اما در مابقی نمونه‌ها درصد کاهش جذب آب در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه کمتر از ۲۰٪ می‌باشد. این بدان معناست که افزایش سن تأثیر زیادی در کاهش جذب آب آن‌ها نداشته است، اما در هر صورت تقریباً باعث بهبود عملکرد آن نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است.

جدول ۷. درصد کاهش جذب آب در سن ۲۸ روزه

نسبت به سن ۷ روزه (%)

نام نمونه	درصد جایگزینی ۱۰	درصد جایگزینی ۲۰
A	۱۶٪	
M	۱۵٪	۱۹٪
Z	۷۷٪	۶۶٪
K	۱۳٪	۲٪
S	۱۲٪	۳۲٪

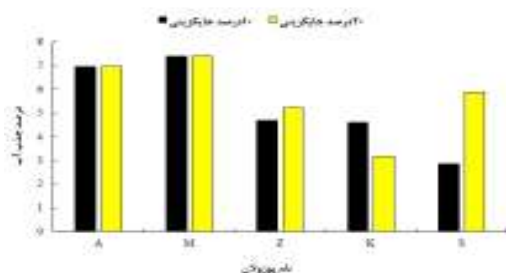
## ۵- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری

### و کششی و جذب آب

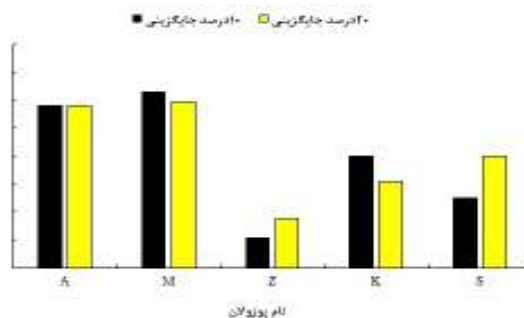
با توجه به اینکه مقادیر به دست آمده از این پژوهش، از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی‌های درجه اول برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی و جذب آب بتن‌های حاوی انواع پوزولان‌ها در سن ۲۸ روزه در جدول ۸ پیشنهاد شده است. علت اینکه صرفاً به ارائه روابط نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه اکتفا شده است، این است که در واقع ملاک اصلی سنجش مقاومت در بتن، در سن ۲۸ روزه بوده و سنین دیگر بیشتر جنبه مقایسه و بررسی عملکرد بتن دارند.

همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب رگرسیون تمامی روابط نزدیک به ۱ بوده، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط  $F_c$ ،  $F_T$  و  $F_A$  مقاومت فشاری و کششی و جذب آب نمونه‌ها و  $X$  پارامتر مربوط به درصد استفاده پوزولان در بتن می‌باشند. روابط فوق برای طرح

جذب آب بتن متخلخل روسازی کاسته شده که دلیل این امر را می‌توان به تمایل خمیر سیمان به جذب آب و طی کردن مراحل عمل آوری در سنین اولیه مرتبط دانست. در این بین، نمونه‌های حاوی ژئولیت نسبت به سایر نمونه‌ها، در سن ۲۸ روزه کاهش جذب آب زیادی داشته که می‌توان گفت در سنین بالا استفاده از این ماده نسبت به سایر پوزولان‌ها توجه‌پذیرتر می‌باشد. یکی از نتایج مهمی که می‌توان از آزمایش جذب آب بتن کسب نمود، میزان دوام بتن در برابر شرایط محیطی مختلف است. هرچه میزان جذب آب بتن کمتر باشد، نفوذ مواد مضر به درون بتن نیز کمتر خواهد شد. بنابراین، با توجه به شکل ۹، در سن ۷ روزه افزودن ژئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی باعث افزایش دوام بتن متخلخل شده و تنها نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به علت آزاد نشدن ژل C-S-H در مقادیر بکار رفته باعث بهبود دوام بتن نشدند. تقریباً همین روال در سن ۲۸ روزه برای نمونه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه‌های حاوی ژئولیت در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه تا ۵ برابر از میزان جذب آب آن کمتر شده و در نتیجه میزان دوام آن افزایش داده شد. همچنین در نمونه‌های دیگر (بجز نمونه‌های حاوی میکروسیلیس) با افزودن پوزولان به بتن، میزان دوام بهبود یافته است.



شکل ۹. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع پوزولان در سن ۷ روزه



شکل ۱۰. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع پوزولان در سن ۲۸ روزه

همچنین طبق استاندارد ACI 522R-10 درصد تخلخل بتن متخلخل بایستی در محدوده ۱۵ تا ۳۵ درصد باشد که در این مقاله در ۱۲ طرح اختلاط اولیه‌ای که استفاده شد، میزان تخلخل در محدوده ۱۶ تا ۲۹ درصد می‌باشد که همگی محدوده استاندارد را رعایت کردند.

در جدول ۸ مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از تحقیق Prakash و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۱۸ با نتایج این مقاله آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزودن میکروسیلیس به بتن متخلخل مقاومت فشاری تا ۶۷ درصد و مقاومت کششی تا ۲۲۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته که این مقادیر در تحقیق Prakash و همکاران به ترتیب برابر ۱۳ و ۶۳ درصد می‌باشد. بنابراین، در این مقاله با استفاده از طرح اختلاطی بهینه و مناسب، افزایش مقاومت چشمگیری حاصل شده است.

جدول ۸. روابط پیشنهادی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

ضریب رگرسیون	تابع رگرسیون	نوع آزمایش	ضریب رگرسیون
0.97	$F'_c = 3.2X + 134.33$	M	مقاومت فشاری
0.77	$F'_c = 2.5X + 123.17$	Z	
0.49	$F'_c = -1.05X + 124.83$	K	
0.63	$F'_c = 0.85X + 139.92$	S	
0.89	$F_T = 1.08X + 11.77$	M	مقاومت کششی
0.99	$F_T = 0.47X + 9.65$	Z	
0.95	$F_T = 0.31X + 9.94$	K	
0.96	$F_T = 0.56X + 10.23$	S	
0.47	$F_A = 0.075X + 5.95$	M	جذب آب
0.63	$F_A = -0.2X + 4.92$	Z	
0.96	$F_A = -0.136X + 5.67$	K	
0.3	$F_A = -0.091X + 5.02$	S	

اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا، جهت ارایه‌ی روابط بیشتر در آینده قابل ارایه است.

## ۶- مقایسه نتایج با تحقیقات گذشتگان

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات جدی بر عملکرد بتن متخلخل حاوی انواع پوزولان‌ها شامل میکروسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی، زئولیت و خاکستر بادی انجام نشده، لذا نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌تواند مقایسه‌ای کلی را با نتایج تحقیقات دیگر در بر گرفته و قابل ارزیابی باشد. لازم به ذکر است، از آنجایی که طبیعتاً طرح اختلاط بتن متخلخل در مقالات مختلف ممکن است با یکدیگر متفاوت باشد، لذا بایستی عملکرد پوزولان‌ها در بتن متخلخل را تا حد امکان بنا به اطلاعات هر مقاله نسبت به نمونه مرجع سنجید.

Sutikulsombat و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۸ با بررسی مقاومت فشاری بتن متخلخل ژئوپلیمری حاوی خاکستر بادی ( $W=100\%$ ) در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب به مقادیر ۲ و  $3/8$  مگاپاسکال دست یافتند که در این مقاله در سن ۷ روزه برای استفاده ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر بادی مقادیر  $8/8$  و  $9/3$  در سن ۲۸ روزه مقادیر  $10/2$  و  $11$  حاصل شد. همانطور که ملاحظه می‌شود با وجود اینکه مقدار استفاده شده از خاکستر بادی در تحقیقات Sutikulsombat و همکاران بیش از این مقاله بوده اما مقادیر مقاومت فشاری در این مقاله تا ۵ برابر بیش‌تر می‌باشد که علت این امر را می‌توان به طرح اختلاط بهینه و درصد‌های استفاده شده از خاکستر بادی در این مقاله مرتبط دانست.

طبق استاندارد ACI 522R-10 [۴۸] مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن متخلخل باید در محدوده  $2/8$  تا  $28$  مگاپاسکال باشد. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌توان گفت که مقادیر به دست آمده در محدود  $10/2$  تا  $19/1$  مگاپاسکال بوده که همه نتایج در محدوده استاندارد می‌باشند.

جدول ۹. مقایسه نتایج این مقاله با نتایج به دست آمده از تحقیق

**Prakash و همکاران [۴۹]**

درصد تغییرات مقاومت کششی ۲۸ روزه	درصد تغییرات مقاومت کششی ۷ روزه	درصد تغییرات مقاومت کششی ۲۸ روزه	درصد تغییرات مقاومت کششی ۷ روزه	این مقاله Prakash و همکاران [۴۹]	این مقاله Prakash و همکاران [۴۹]
+۵۱	+۳۲	+۱۳۲	+۱۸۳	۱۰ درصد	۲۰ درصد
-۱۰	-۴۳	+۴۳	-۱۳	میکروسیلیس	میکروسیلیس
+۶۷	+۴۹	+۱۷۰	+۲۲۶	این مقاله Prakash و همکاران [۴۹]	این مقاله Prakash و همکاران [۴۹]
+۱۰	+۱۳	+۶۳	+۲۱		

**۷- نتیجه گیری**

در این مقاله با انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی بتن متخلخل روسازی، با افزودن مقادیر مختلفی از انواع پوزولان‌ها (میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، سعی در بهبود مقاومت فشاری و کششی و همچنین درصد جذب آب شده است که نتایج زیر حاصل شد:

- با انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روزه این نتیجه بدست آمده که استفاده از خاکستر بادی در سن ۷ روزه تأثیر مثبتی بر روی بهبود مقاومت فشاری بتن متخلخل نداشته بلکه در مقدار استفاده‌ی ۱۰ درصد تقریباً ۲٪ مقاومت را نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش داد. همچنین در سن ۲۸ روزه با وجود اینکه افزایش مقاومت را نشان داد اما این مقدار چندان زیاد نبود (نمونه‌ی حاوی زئولیت نیز تقریباً به همین روال است). اما در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی افزایش مقاومت به مقدار محسوسی رخ داده بطوری که استفاده از میکروسیلیس در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی به ترتیب ۶۷٪ و ۵۱٪ مقاومت فشاری را نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داد.

- با مقایسه‌ی درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه، از میان نمونه‌هایی که حاوی پوزولان هستند، نمونه‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس افزایش مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند. بطوری که نمونه‌ی حاوی زئولیت با ۲۰٪ جایگزینی در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه تقریباً ۶۶٪ افزایش مقاومت از خود نشان داد.

- با انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روزه این نتیجه بدست آمده که با توجه به اینکه بطور کلی ضعف اصلی بتن در کشش بوده، لذا، با افزودن هرگونه ماده‌ای (بالاخص پوزولان‌ها) که سبب چسبندگی و یکپارچگی بیشتر بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها شود، می‌تواند مقاومت کششی را تا چندین برابر افزایش دهد. طبق نتایج، افزودن میکروسیلیس به بتن در سن ۷ و ۲۸ روزه مقاومت کششی را به ترتیب ۲/۷ و ۳/۳ برابر افزایش می‌دهد. در سایر پوزولان‌ها نیز افزایش مقاومت زیادی رخ داده که سرباره کوره آهن گدازی نتایج مطلوبی دارد.

- با مقایسه‌ی درصد افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه، از میان نمونه‌هایی که حاوی پوزولان هستند، نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدود ۸۳٪ افزایش مقاومت از خود نشان دادند. همچنین استفاده از خاکستر بادی در مقدار استفاده‌ی ۱۰٪ افزایش مقاومت کششی محسوسی نداشته، اما در مقدار ۲۰٪ باعث افزایش مقاومت کششی نسبت به سن ۷ روزه تا میزان ۶۵٪ را نشان داد.

- با انجام آزمایش درصد جذب آب بر روی نمونه‌ها می‌توان به این نتیجه دست یافت که در سنین ۷ و ۲۸ روزه بعلت جذب آب زیاد میکروسیلیس استفاده از آن در جهت بهبود جذب آب بتن متخلخل توصیه نشده چراکه مقدار آن از نمونه‌ی شاهد نیز بیشتر می‌شود. اما سایر پوزولان‌ها جذب آب کمتر از ۵ درصد داشته که در رده‌ی خوب و متوسط قرار می‌گیرند. همچنین نمونه‌ی حاوی زئولیت تا میزان ۷۷٪ از مقدار جذب آب نسبت به سن ۷ روزه‌ی خود می‌کاهد که در سایر نمونه‌ها این مقدار به حداکثر ۲۰٪ محدود می‌شود.

- به عنوان جمع‌بندی کلی، در آزمایش مقاومت فشاری و کششی و جذب آب (دوام) نمونه‌ها، نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و زئولیت به عنوان مطلوب‌ترین نمونه‌ها می‌باشند. اما در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و خاکستر بادی با وجود اینکه برخی از خصوصیات را بهبود بخشیدند، اما به عنوان برآیندی از نتایج تست فشار، کشش و جذب آب عملکرد مطلوبی نداشته‌اند.

- با توجه به روابط و ضریب رگرسیون بدست آمده از تمامی طرح‌ها، نتایج از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده بگونه‌ای که ضریب رگرسیون آن‌ها نزدیک به ۱ بوده است.

## ۸- مراجع

- در روسازی"، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱. ص. ۴۹-۱۲۰.
- concrete", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04, No. 02.
- Beaudoin JJ, Ramachandran VS., (1992), "A new perspective on the hydration characteristics of cement phases", *Cem Concr Res*; 22(4), pp.689-94.
- CEB-FIP, (1989), "Diagnosis and assessment of concrete structures", "state of the art report", *CEB Bull*, 192, pp.83-85.
- INSO581, (2015), "Concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory-code of practice, 2<sup>nd</sup>.revision".
- Lee, J.W. Jang, Y.I. Park, W.S. Kim, S.W., (2016), "A study on mechanical properties of porous concrete using cementless binder", *International journal of concrete structures and materials*, Vol.10, No.4, 2016. pp. 527-537, <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0166-3>.
- Leng, F. Feng, N. Lu, X., (2000), "An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.6, 2000, pp. 989-992. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00250-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00250-7).
- Li, G. Zhao, X., (2003), "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 3, pp. 293-299. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00058-6).
- Lian C, Zhuge Y., (2010), "Optimum mix design of enhanced permeable concrete – an experimental investigation. *Constr Build Mater*, 24(12), pp.2664-2671.
- Malhotra VM., (1976), "No-fines concrete: Its properties and applications", *J ACI*, 73(11), pp.628-44.
- Mehta, P.K., (1986), *Concrete: Structure, Properties and Materials*; Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Mindess, S. Young, JF. Darwin, D., (2002), *Concrete*, USA: Prentice Hall.
- Mumpton, FA., (1993), editor, "Mineralogy and geology of natural zeolites", New York:
- American Concrete Institute. ACI 522R-10. (2010), "Report on Pervious Concrete", Michigan, Farmington Hill.
- American Concrete Institute, (2010), "ACI 522R-10. Report on Pervious Concrete", Michigan, Farmington Hill.
- ASTM C642, (2006), "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened
- Crouch, LK. Pitt, J. Hewitt, R., "Aggregate effects on previous Portland cement concrete static modulus of elasticity", *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7, 2007, pp. 561-568.
- Davidovits, J., (1994), "Properties of geopolymer cements", In 1st international conference on alkaline cements and concretes, Scientific Research Institute on Binder and Materials, Kiev State Technical University Kiev, Ukraine, pp. 131-149.
- Deb, P.S. Nath, P. Sarker, P.K., (2014), "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature", *Materials and Design (1980-2015)*, Vol. 62, pp. 32-39, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>.
- Feng NQ, Peng GF., (2005), "Application of natural zeolite to construction and building materials in China", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 8, 2005, pp. 579-584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.013>.
- Fujiwara H, Tomita R, Okamoto T, Dozono A, Okabe A., (2013), "Properties of high-strength porous concrete", *ACI SP179*.
- Glinicki, M.A. Józ'wiak-Niedz'wiedzka, D. Gibas, K. Dałbrowski, M., (2016), "Influence of blended cements with Calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures", *Materials*, Vol. 9, No.18, pp. 1-15. doi:10.3390/ma9010018 .

- Song, W. Yin, J., (2016), "Hybrid effect evaluation of steel fiber and carbon fiber on the performance of the fiber reinforced concrete", *Materials*, Vol. 9, No. 8, pp. 704.  
doi: 10.3390/ma9080704.
- Sumanasooriya, MS. Neithalath, N., (1988), "Pore structure features of previous concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 8, pp. 778-787.
- Sutikulsoombat, S. Srichumpong, T. Boonanunwong, P. Tippayasam, C. Leonelli, C. Chindaprasirt, P. Chaysuwan, D., (2018), "Development of Thai Lignite Fly Ash and Metakaolin for Pervious Geopolymer Concrete", *Key Engineering Materials*, Vol. 766, pp. 294-299.  
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.766.294.
- Wongsa, A. Zaetang, Y. Sata, V. Chindaprasirt, P., (2016), "Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 637-643.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.135>.
- Yavuz Corapcioglu M, editor., (1994), "Advances in porous media. Amsterdam (Netherlands): Elsevier.
- Bruce K. Ferguson, (2005), "Porous Pavement, Taylor and Francis Group".
- Croney, David, and Paul Croney, (1998), "Design and Performance of Road Pavements", New York McGraw Hill.
- Deo, O. Neithalath, N., (2010), "Compressive behavior of previous concretes and a quantification of the influence of random pore structure features", *Material Science and Engineering*, Vol. 528, No. 1, pp. 402-412.
- Ghafoori N., (1995), "Development of No-fines concrete pavement applications", *J. Transport Eng.*, 121(3), pp.283-288.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>.
- Reprint of mineralogical society of America's reviews in mineralogy.
- Neville AM., (1995), "Properties of concrete", England: Longman Group Ltd.
- Okoye, F.N. Durgaprasad, J. Singh, N.B., (2016), "Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete", *Ceramics International*, Vol. 42, No. 2, Part B, pp. 3000-3006.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084>.
- Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A., (2020), "Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, Vol. 173, No. 1, pp.3-16.
- Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A., (2019), "Performance of porous pavement containing different types of pozzolans", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 9, pp.1277-1283.
- Pachideh G., Gholhaki M., (2020), "Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag", *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp.221-246.
- Pachideh G, Gholhaki M., (2021), "An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring", *Structural Concrete*, Vol. 22, No. 1, pp.550-565.
- Prakash, V. Chandrasekar, K. Vinoth, P., (2018), "Partial Replacement of Silica Fume and Fly Ash in Pervious Concrete", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 05, No. 05, pp. 1823-1825.
- Roy DM, Gouda GR., (1973), "Porosity-strength relation in cementitious materials with very high strengths", *J Am Ceram Soc*; 53(10), pp.549-50.
- Sata, V. Sathonsaowaphak, A. Chindaprasirt, P., (2012), "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 5, pp. 700-708.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010>.

- Shu, X. Huang, B. Wu, H. Dong, Q. Burdette, EG., (2011), "Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 8, pp. 3187–3192.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002>.
- Tho-in, T. Sata, V. Chindapasirt, P. Jaturapitakkul, C., (2012), "Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 30, 2012, pp. 366-371.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028>.
- Yanagibashi K, Yonezawa T., (1998), "Properties and performance of green concrete", ACI SP179.
- Yang J., Jiang G., (2003), "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials", *Cem Concr Res*; 33, pp.381–386.
- Yang, J. Jiang, G., (2003), "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 381–386.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:7\(561\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(561)).
- Huang, B. Wu, H. Shu, X. Dong, Q. Burdette, EG., (2010), "Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 818–823.
- Kevern, JT., (2008), "Advancement of pervious concrete durability", Ph.D. dissertation, Iowa State University, Ames, IA.
- Meininger R., (1988), "No-fines pervious concrete for paving, *ACI Concr Int*; 10-8, pp.20–22.
- Schaefer VR, Wang K, Sulieman MT, Kevern JT., (2006), "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates, Final Report, Iowa Department of Transportation, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa Concrete Paving Association, 85.
- Schaefer, VR. Wang, K. Sulieman, MT. Kevern, JT., (2006), "Mix design development for pervious concrete in cold weather climates", Final report, Iowa Department of Transportation, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa Concrete Paving Association.

# The Effect of Adding Different Pozzolans on Mechanical Properties and Water Absorption of Pervious Concrete Pavement

*Ghasem Pachideh, Postdoctoral Research Assistant, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.*

*Majid Gholhaki, Professor, Department of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran.*

*Amin Moshtagh, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran.*

*E-mail: Pachideh@sharif.edu*

Received: October 2021- Accepted: June 2022

## ABSTRACT

Pervious concrete is a special type of concrete comprised of cement, water, coarse aggregate, little or no sand which is sometimes mixed with the additives. The uniformly graded coarse aggregates in combination with low water content (i.e., water-to-cement ratios ranging from 0.25 to 0.35) were used to produce a concrete mixture whose pore content ranges from 11% to 35%. In this paper, performance of pervious concrete containing silica fume, zeolite, fly ash and granulated blast furnace slag (10% and 20% of cement weight) was investigated at the ages of 7 and 28 days. To this end, the compressive and tensile as well as water absorption tests were conducted on cubic and cylindrical specimens whose dimensions are 10 and 10×20 cm, respectively. In order to provide the required materials, the fine-grained gravel extracted from the Hamesh Bar mine Located in Semnan Province, was used. The results imply that compared to the other materials, application of silica fume and granulated blast furnace slag leave the greatest effects on the concrete performance in a way that averagely, the compressive and tensile strength were improved nearly 1.6 and 3 times in comparison with the control specimen (i.e. reference specimen). Moreover, the water absorption was reduced following addition of various pozzolanic materials except silica fume such that according to CEB-FIP Standard, they are classified as average and good concretes.

**Keywords:** Fly Ash, Pervious Concrete Pavement, Zeolite, Granulated Blast Furnace Slag, Silica Fume