

مطالعه نفوذپذیری و مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای و استاندارد بریتانیا

محمود نادری^{*}، علیرضا کبودان^۱، محمدرضا کشتکار^۲

۱- استاد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

بتن یک ماده متخلخل می‌باشد. آب و سیالات دیگر می‌توانند به داخل منافذ آن نفوذ کرده و دوام آن را تحت تأثیر قرار دهند. لذا نفوذپذیری یکی از مهمترین عوامل مؤثر در دوام سازه‌های بتنی می‌باشد. طرح و ساخت بتنی که ضمن تأمین نمودن مقاومت فشاری مطلوب، نفوذپذیری کمتری نیز داشته باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۷ روزه حاوی پوزولان‌های مختلف با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. از درصد‌های وزنی دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد که جایگزین سیمان پرتلند تیپ ۲ شده‌اند و روش موجود در استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009) برای مقایسه نتایج به دست آمده استفاده شده است. همچنین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر مطابق با استاندارد ASTM C642-06 اندازه‌گیری شده و از آن به عنوان معیاری برای سنجش نفوذپذیری استفاده گردیده است. با استفاده از نتایج به دست آمده از روش پیچش نیز مقاومت نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری نشان می‌دهد که پوزولان‌های مورد استفاده در این تحقیق باعث کاهش درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و در نتیجه کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها می‌شوند، در حالی که دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها و زئولیت و خاکستر بادی باعث کاهش در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده‌اند. همچنین تطابق خوبی بین نتایج روش‌های محفظه استوانه‌ای و استاندارد بریتانیا مشاهده شد.

کلمات کلیدی: دوام، نفوذپذیری، دوده سیلیس، زئولیت، خاکستر بادی، محفظه استوانه‌ای، استاندارد بریتانیا، روش پیچش

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/jsce.2018.128891.1545	doi: 10.22065/jsce.2018.128891.1545	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
		۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۴	۱۳۹۷/۰۲/۰۸
محمود نادری					*نویسنده مسئول:	
naderi-m@ikiu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Studying the permeability and strength of concretes containing silica fume, zeolite and fly ash using cylindrical chamber method and British standard

Mahmood Naderi^{1*}, Alireza Kaboudan² and Mohammadreza Keshtkar³

1. Professor, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3. M.S graduated student, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Concrete is a porous material. Water and other fluids can penetrate it and effect its durability. So permeability is one of the most effective parameters of concrete structures durability. Design and construction of concrete, which has a less permeability in addition of providing the desirable compressive strength is of great importance. In this paper, the permeability of 7-day concrete samples containing different pozzolans was investigated using cylindrical chamber method. The mass percentages of silica fume, zeolite and fly ash equal to 5, 10, 15 and 20 percentage that replace type II Portland cement and the existing method of British standard (BS EN 12390-8:2009) were used to compare the obtained results. The percentage of the permeable voids volume was also measured based on ASTM C642-06 standard and used as an index to evaluate permeability. Samples strength was also investigated using the results obtained from the twist-off method. The results of the permeability tests show that all of the pozzolans used in this investigation decrease the percentage of the permeable voids volume and consequently decrease the samples permeability, while silica fume increases the samples compressive strength and zeolite and fly ash decrease samples compressive strength. A very good correlation was also observed between the cylindrical chamber and British standard method results.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 April 2018

Revise Date: 15 August 2018

Accept Date: 02 October 2018

Keywords:

Durability, Permeability, Silica fume, Zeolite, Fly ash, Cylindrical chamber, British standard, Twist-off method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.128891.1545

*Corresponding author: Mahmood Naderi
Email address: naderi-m@ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به ترکیب شیمیایی خاص آب، این مایع قابلیت نفوذ در سوراخ‌های ریز و موئین و ترک‌ها را دارد. از دیگر خصوصیات آب حل شدن بسیاری از ترکیب‌های معدنی و آلی در آن است که قابلیت انتقال از یک بخش به دیگر قسمت‌های یک محیط را سبب می‌شود. آب به دو گونه می‌تواند به بتن آسیب برساند. اولین آسیب مربوط به تأثیر مستقیم آب بر روی آرماتورهای فولادی بتن بوده که با خوردگی آن-ها باعث کاهش سطح مقطع مؤثر فولاد در بتن شده که ممکن است میلگردهای باقیمانده توان انجام وظایف مربوطه با ضرایب اطمینان بالا را نداشته باشند. دومین آسیب مربوط به ماهیت آب در حل کردن مواد مضر بتن مانند انواع کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و سایر مواد شیمیایی است که باعث افزایش سرعت در عمل زنگ زدن آرماتورهای بتن می‌شود. نتیجه این عمل کاهش دوام و طول عمر بتن در سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. بنابراین طراحی و ارزیابی سازه صرفاً براساس مقاومت، نمی‌تواند نیازهای مربوط به دوام سازه را تأمین نماید [۸-۱].

نفوذپذیری آب در بتن عامل مهمی در دوام بتن تحت شرایط سیکل‌های ذوب و یخ متوالی است، هر چه آب بیشتری در بتن نفوذ کند تخریب بیشتری را در پی خواهد داشت. بنابراین بتن باید برای شرایط محیطی که در آن قرار می‌گیرد به طور مناسب طراحی گردد. در این راستا در کشورهای از کشورهای مشخصات و دستورالعمل‌ها و استانداردهایی برای طرح بتن تهیه شده و طراحان و مجریان ملزم به رعایت این دستورالعمل‌ها گشته‌اند.

نفوذپذیری بتن را می‌توان با استفاده از آزمایش‌های متعددی به دست آورد، لیکن نتایج این آزمایش‌ها بیشتر نسبی می‌باشند. در اغلب این آزمایش‌ها اطراف نمونه بتنی پوشانده شده و آب تحت فشار به سطح بالایی آن اعمال می‌شود. وقتی شرایط جریان پایدار پدید آمد، که این امر در بتن‌های کم نفوذ ممکن است چند روز طول بکشد، مقدار آبی را که از ضخامت معین در مدت زمان مشخص عبور می‌کند اندازه‌گیری می‌کنند.

بتن ممکن است از انواع مختلف سیمان، پوزولان‌ها، مواد مضاف، مواد افزودنی، پلیمرها، الیاف و غیره تهیه شود. افزودنی‌های معدنی بتن، مواد سیلیسی یا آلومینی خوب تفکیک شده‌ای می‌باشند که در مقادیر نسبتاً زیاد، عموماً به صورت جایگزین درصدی وزنی از سیمان پرتلند، به بتن افزوده می‌شوند. این مواد به صورت خام یا بعد از فعال سازی حرارتی به عنوان منبع اصلی مواد در افزودنی-های معدنی بتن به کار گرفته می‌شوند. بسیاری از این مواد محصولات زائد صنایع مختلفی هستند که به دلیل خواص خود می‌توانند در ساخت بتن مورد استفاده قرار گیرند.

افزودنی‌ها برای بهبود عملکرد بتن، به عنوان مثال افزایش مقاومت و دوام بتن و کاهش گرما هیدراتاسیون ضروری هستند. مهمترین خاصیت پوزولان به عنوان جایگزین سیمان، توانایی قابل ملاحظه آن در کاهش منافذ بزرگ و نفوذپذیری بتن است. واکنش‌های سیلیسی پوزولان و آهک ناشی از هیدراتاسیون سیمان، خاصیت پرکنندگی داشته و موجب کاهش منافذ بزرگ و کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می‌شود. استفاده از انواع پوزولان به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد [۱۰-۹]. استفاده از پوزولان‌های طبیعی در ساخت بتن می‌تواند عمر سرویس دهی سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده را افزایش دهد [۹]. منافعی که از کاربرد افزودنی‌های معدنی بتن حاصل می‌شود عبارتند از:

- بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی به علت حرارت کمتر هیدراتاسیون
- زیاده‌تر شدن مقاومت نهایی و نفوذپذیری کمتر به علت قطع کردن منافذ و کانال‌های موجود در بتن
- دوام بهتر در مقابل حملات شیمیایی
- صرفه اقتصادی و همچنین کاهش اثرات مخرب زیست محیطی

امروزه استفاده از افزودنی در بتن در سراسر جهان با سرعت در حال گسترش است. از این رو می‌بایست برای شناخت بیشتر و استفاده بهینه‌تر، مطالعات تکمیلی در مورد خصوصیات مختلف بتن با مواد افزودنی صورت گیرد. مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از پوزولان‌های دوده سیلیسی، ژئولیت و خاکستر بادی در طرح اختلاط بتن انجام گرفته است.

دوده سیلیسی یک ماده سیلیسی عمدتاً آمورف کروی شکل است که محصول جانبی فرآیند تولید فلز سیلیسیم یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم به خصوص فروسیلیسیم می‌باشد و به خاطر خواص شیمیایی و فیزیکی آن دارای واکنش‌پذیری پوزولانی بسیار خوبی است [۱۱]. برخی محققان دریافته‌اند که دوده سیلیسی مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می‌بخشد و اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری بتن بین ۳ تا ۲۸ روز (در دمای عمل‌آوری معمول) اتفاق می‌افتد [۱۲-۱۴]. بر اساس تحقیقی که در سال ۱۹۹۳ در مورد نفوذپذیری بتن حاوی دوده سیلیسی صورت گرفت، این نتیجه بیان شد که نفوذپذیری با افزودن دوده سیلیسی کاهش می‌یابد. بر اساس این تحقیق نفوذپذیری مخلوط شاهد $10^{-14} \times 1/8$ متر بر ثانیه بود، در حالی که نفوذپذیری برای مخلوط بتن حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی، کمتر از $10^{-17} \times 1$ متر بر ثانیه به دست آمد [۱۵]. در مقاله‌ای ارائه شده است که دوده سیلیسی به عنوان یک ماده شناخته شده پوزولانی سبب بالا بردن خواص مکانیکی بتن تا حد زیادی می‌شود. ضمن آنکه دوده سیلیسی در بتن تخلخل را کاهش می‌دهد و سبب بهبود دوام بتن می‌گردد و اضافه کردن آن در بتن می‌تواند به طور مؤثر نرخ تخریب بتن در برابر عوامل مخرب را کاهش دهد [۱۶]. در مطالعه دیگری که در مورد تأثیر دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری بتن در سال ۲۰۰۳ انجام شد، محققین به این نتیجه رسیدند که ذرات دوده سیلیسی به علت ریز بودن با پر کردن خلل و فرج‌ها نفوذپذیری را نیز کاهش می‌دهند [۱۷].

ژئولیت یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیوم هیدراته از عناصر قلیایی و قلیایی-خاکی می‌باشد. خواص پوزولانی ژئولیت‌ها به علت وجود اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیوم در ترکیب شیمیایی آنها است. همچنین باید اشاره نمود که ژئولیت دارای ساختار داخلی به صورت شبکه کریستالی سه بعدی است و سطح داخلی آن بسیار زیاد است، به همین دلیل دو ویژگی تبادل یونی و جذب سطحی در این ماده پوزولانی بسیار بالاست [۱۸-۲۱]. ژئولیت با کاهش تخلخل و بهبود ساختار ناحیه انتقال بین ماتریس سیمان و سنگدانه باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود [۲۲-۲۵]. تحقیقات متعددی نشان داده است که ژئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. فعالیت پوزولانی ژئولیت‌ها بستگی به ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی آنها دارد. خواص پوزولانی ژئولیت‌ها به علت وجود SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد. این ترکیبات با $Ca(OH)_2$ ایجاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهند و آن را تبدیل به ژل CSH و آلومینوسیلیکات‌های هیدراته می‌کنند. در نتیجه ریز ساختار بتن سخت شده بهبود می‌یابد و بتن نفوذناپذیرتر می‌شود [۲۶].

خاکستر بادی ماده‌ای است با ذرات بسیار ریز کروی شکل که از پسماند حاصل از احتراق پودر ذغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی بدست می‌آید [۲۷-۲۹]. از خاکستر بادی کم‌کلسیم، به طور وسیع در بتن‌های معمولی و دارای مقاومت زیاد به عنوان جایگزین سیمان استفاده می‌شود. در بتن‌های معمولی، مقدار جایگزینی حتی به ۵۰ درصد هم می‌رسد. در حالی که در بتن با مقاومت زیاد، سطح جایگزینی به ۱۵ تا ۲۵ درصد محدود می‌شود. دلیل استفاده از این ماده در بتن با مقاومت زیاد، کاهش تولید حرارت و کسب مشخصات دوامی بهتر است [۳۰-۳۱]. در صورت وجود شرایط مطلوب عمل‌آوری، بتن‌های حاوی خاکستر بادی دارای مقاومت فشاری درازمدت بیشتری نسبت به بتن با سیمان پرتلند است [۳۲]. استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی موجب بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی بتن می‌گردد که کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن را نتیجه می‌دهد [۳۳].

از آنجا که نفوذپذیری از عوامل مهم تأثیرگذار در دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی می‌باشد، در این تحقیق نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های دوده سیلیسی، ژئولیت و خاکستر بادی با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای [۳۴] و روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009) [۳۵] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از استاندارد ASTM C642-06 [۳۶] برای به دست آوردن درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌ها جهت مقایسه با نتایج روش محفظه استوانه‌ای استفاده شده است.

۲- آزمایش‌های انجام شده

۲-۱- اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای

این روش که توسط نادری در سال ۲۰۱۱ ابداع شد روشی دقیق با کاربرد گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمان چه در محیط آزمایشگاهی و چه در محل پروژه می‌باشد. از مزایای این روش هزینه اندک انجام آزمایش، دقت بالا، خرابی ناچیز سطح بتن و سرعت عمل بالا در حدود چند ساعت می‌باشد. اکثر آزمایش‌های در ارتباط با نفوذپذیری بتن، قابلیت کاربرد کمی در تعیین نفوذپذیری بتن در آزمایش‌های درجا دارند. همچنین نتایجی که ارائه می‌کنند معمولاً به صورت کیفی می‌باشد. این دستگاه، میزان نفوذپذیری آب یا هر مایعی به داخل بتن را به صورت کمی ارائه می‌کند. دستگاه آزمایش محفظه استوانه‌ای در شکل ۱-الف نشان داده شده است.



الف ب ج د

شکل ۱: الف) دستگاه محفظه استوانه‌ای ب) شکستن نمونه به دو قسمت با استفاده از جک فشاری ج) قرائت عمق نفوذ د) پروفیل نفوذ آب.

برای انجام آزمایش ابتدا سطح بتن کاملاً خشک و تمیز می‌گردد. سپس یک صفحه زیرسری که در مرکز آن سوراخی دایره‌ای شکل وجود دارد به کمک چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود. جهت جلوگیری از بروز خطا، چسب اضافی (چسب موجود در سوراخ مرکزی صفحه زیر سری) باید پاک گردد. پس از اینکه چسب به مقاومت خود در طی مدت معین رسید قسمت فوقانی که شامل محفظه فشار به همراه گیج اندازه‌گیری فشار است بر روی صفحه زیرسری به کمک فشار دست و چرخاندن محکم می‌شود. سپس درون محفظه کاملاً با آب پر می‌گردد. همچنین به منظور خروج هوای احتمالی موجود در محفظه یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تعبیه شده است. در زمان پر کردن دستگاه به کمک آب، شیرهای تخلیه باز بوده تا هوای محبوس در سیلندر دستگاه امکان خروج را داشته باشد. پس از اطمینان از پر شدن کامل دستگاه توسط آب شیر تخلیه هوا بسته می‌شود. سپس با چرخاندن دسته فشار، پیستون محفظه به سمت پایین حرکت کرده که سبب ایجاد فشار به مایع می‌شود. هم‌زمان با پیچاندن دسته تنظیم فشار به منظور رسیدن به فشار موردنظر به کمک میکرومتر متصل به دستگاه میزان حرکت به سمت پایین پیستون در زمان‌های مقرر قرائت می‌شود. با گذشت زمان و با افت فشار، از فشار اعمالی کاسته می‌شود. در نتیجه با چرخاندن دسته تنظیم فشار مجدداً فشار به مقدار دلخواه تنظیم می‌گردد. مقدار حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن و دبی نفوذ در هر لحظه از زمان را می‌توان از روابط ۱ و ۲ محاسبه کرد. پس از پایان آزمایش نمونه بتنی مورد آزمایش به دو قسمت تقسیم شده و عمق نفوذ آب به داخل بتن اندازه‌گیری می‌شود.

$$V = h \times A \quad (1)$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

که در آن V حجم آب نفوذ کرده، h قرائت میکرومتر، A سطح مقطع اعمال فشار (سطح مقطع سوراخ مرکزی صفحه زیرسری)، دبی نفوذ و t زمان آزمایش می باشد.

۲-۲ اندازه گیری نفوذپذیری با استفاده از استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009)

در این روش باید بلافاصله پس از قالب برداری، سطحی از نمونه که قرار است تحت فشار آب قرار گیرد، با برس سیمی زبر شود. لازم به ذکر است که فشار آب نباید بر روی سطح ماله کشی شده نمونه اعمال شود. نمونه درون دستگاه نفوذپذیری قرار داده شده و فشار آب برابر با $500 \pm 50 \text{ kPa}$ به مدت 72 ± 2 ساعت به آن اعمال می شود. در این تحقیق جهت مقایسه نتایج روش محفظه استوانه ای با روش موجود در استاندارد بریتانیا، فشار ۵ بار به مدت زمان ۵ ساعت به نمونه ها اعمال گردید. در طول مدت زمان انجام آزمایش به صورت دوره ای، سطوحی از نمونه که در معرض فشار آب قرار ندارند بررسی می گردند تا نشستی مشاهده نشود. دستگاه آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۲: الف) دستگاه آزمایش نفوذپذیری مطابق استاندارد بریتانیا ب) محکم کردن نمونه در دستگاه آزمایش نفوذپذیری.

پس از اتمام آزمایش نفوذپذیری، نمونه از دستگاه خارج می گردد. سطحی از نمونه که در معرض فشار آب بود، خشک شده تا آب اضافی آن پاک گردد. سپس نمونه عمود بر سطحی که در معرض فشار آب بود به دو قسمت تقسیم می گردد. به محض اینکه سطح دو نیم شده نمونه به اندازه ای خشک شد که پیشروی آب بطور واضح قابل مشاهده بود، پیشروی آب در نمونه علامتگذاری می شود. حداکثر عمق نفوذ آب تحت شرایط آزمایش به نزدیکترین میلی متر ثبت و به عنوان عمق نفوذ آب در نظر گرفته می شود.

۲-۳ تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر با استفاده از ASTM C642-06

تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بر اساس این استاندارد شامل ۴ مرحله است.

۱- ابتدا نمونه وزن گردیده و سپس در گرمخانه در دمایی بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد و به مدت حداقل ۲۴ ساعت خشک می‌شود. بعد از خارج کردن نمونه از گرمخانه، اجازه داده می‌شود تا دمای نمونه به ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد برسد. نمونه دوباره وزن می‌گردد. اگر دو وزن اندازه‌گیری شده با هم تطابق داشته باشند نمونه خشک در نظر گرفته می‌شود، در غیر اینصورت نمونه مجدداً به مدت ۲۴ ساعت دیگر در گرمخانه قرار داده می‌شود. در صورتیکه تفاوت بین دو وزن اندازه‌گیری شده متوالی کمتر از ۰/۵ درصد وزن کمتر باشد، وزن اندازه‌گیری شده به عنوان جرم خشک نمونه (A) در نظر گرفته می‌شود.

۲- بعد از خشک کردن نهایی، نمونه در داخل آب با دمای تقریبی ۲۱ درجه سانتیگراد به مدت حداقل ۴۸ ساعت غوطه‌ور می‌شود و این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تفاوت دو وزن اندازه‌گیری شده نمونه که سطح آن توسط حوله خشک شده در فواصل زمانی ۲۴ ساعت، افزایش وزنی کمتر از ۰/۵ درصد وزن بزرگتر را نشان دهد.

۳- سپس نمونه در داخل مخزنی پر از آب قرار داده شده و به مدت ۵ ساعت جوشانده می‌شود. بعد از جوشاندن، به نمونه اجازه داده می‌شود تا به مدت حداقل ۱۴ ساعت با از دست دادن گرما به دمای نهایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد برسد. سپس رطوبت سطحی توسط حوله از سطح نمونه برداشته شده و وزن نمونه جوشانده شده با سطح خشک (B) تعیین می‌شود.

۴- بعد از مغروق سازی و جوشاندن نمونه، آن را با استفاده از یک سیم در آب قرار داده و وزن ظاهری آن در آب (C) تعیین می‌شود. درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد حجمی منافذ نفوذپذیر} = \frac{(B - A)}{(B - C)} \times 100 \quad (3)$$

مراحل انجام آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.



د



ج



ب



الف

شکل ۳: الف) نمونه‌های قرار گرفته در گرمخانه ب) مغروق ساختن نمونه‌ها ج) جوشاندن نمونه‌ها در آب با استفاده از مشعل د) اندازه‌گیری وزن ظاهری نمونه‌ها.

۴-۲ روش پیچش (Twist-Off)

روش پیچش که در سال ۲۰۰۵ توسط نادری ابداع شد یک روش کاربردی در تعیین مقاومت فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در آزمایشگاه و چه در محل می‌باشد [۳۷]. دقت بالا، هزینه اندک با خرابی ناچیز و سرعت عمل بالا، امکان کاربرد آن در حالت‌های افقی، قائم و به طور کلی هر سطح صاف، عدم نیاز به برنامه‌ریزی و تمهیدات قبلی از مزایای این روش می‌باشد که آن را در قالب پر استفاده‌ترین آزمایش‌های نیمه مخرب جای می‌دهد. دستگاه آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است.

روش انجام این آزمایش بر این اساس است که پس از اطمینان از خشک و تمیز بودن سطح نمونه‌ها، یک استوانه فلزی به قطر و ارتفاع مشخص توسط ماده چسباننده (چسب اپوکسی) بر روی محل آزمایش چسبانده می‌شود. چسب اضافی باید از محل چسب زدن پاک گردد. پس از اینکه چسب به مقاومت خود رسید، توسط یک دستگاه پیچش‌سنج گشتاور پیچشی به استوانه فلزی وارد می‌شود و اعمال نیرو به طور پیوسته و یکنواخت تا لحظه گسیختگی بتن از سطح زیرین استوانه مذکور ادامه می‌یابد. پس از جدا شدن باید سطح جداشدگی استوانه فلزی از بتن به صورت چشمی بررسی گردد تا اطمینان حاصل شود که جداشدگی از سطح بتن صورت گرفته باشد و از سطح چسب نباشد. خرابی حاصل بسیار محدود بوده که به سادگی توسط ملات و به کمک دست قابل ترمیم است.



ب

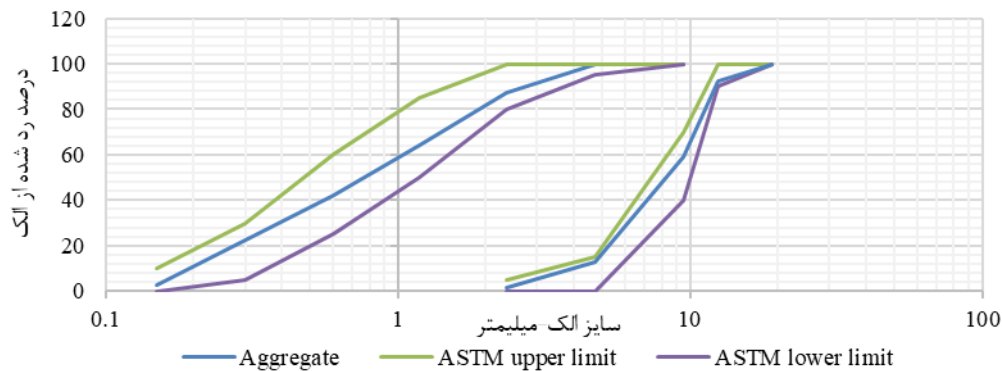


الف

شکل ۴: الف) آزمایش پیچش ب) سطح نمونه پس از جدا شدن استوانه‌های فلزی از سطح آن.

۳- مراحل تحقیق

در این مقاله، اثر پوزولان‌های دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی که جایگزین سیمان پرتلند تیپ ۲ شده‌اند، بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۷ روزه بررسی شده است. درصدهای وزنی پوزولان‌های مورد استفاده در این تحقیق برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد می‌باشد. بدین منظور سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136-06 [۳۸] دانه بندی (شکل ۵) شده‌اند. طرح اختلاط نیز بر اساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی برابر با ۳۰ مگاپاسکال مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد.



شکل ۵: منحنی دانه بندی ریز دانه و درشت دانه.

برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلیمتر که در آب عمل آوری شدند استفاده شده است. مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی اعمال شده برای جدا کردن صفحه زیر سری از سطح نمونه‌های ساخته شده در سن ۷ روز با استفاده از روش فشاری تک محوره و روش پیچش برای حداقل ۳ نمونه بتنی اندازه‌گیری شد. همچنین نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای و بر اساس استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009) تحت فشار ۵ بار به مدت ۵ ساعت بر روی حداقل ۲ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نیز با استفاده از استاندارد ASTM C642-06 برای حداقل ۳ نمونه به دست آمد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل انجام آزمایش‌ها، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) انجام پذیرفته است.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها (Kg/m^3).

نسبت آب به سیمان	ماسه Kg/m^3	شن Kg/m^3	سیمان Kg/m^3	آب Kg/m^3	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۰/۵	۹۹۸	۶۹۲	۳۵۰	۱۷۵	۳۰

در این تحقیق نامگذاری نمونه‌ها براساس نوع پوزولان مصرفی و درصد جایگزینی آنها مطابق جدول ۲ صورت گرفته است. نمونه‌های بتنی ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ نیز C30 نامگذاری شدند.

جدول ۲: نحوه نامگذاری نمونه‌های ساخته شده

نوع پوزولان مصرفی	درصد وزنی جایگزینی			
	۵	۱۰	۱۵	۲۰
دوده سیلیسیسی	SF5	SF10	SF15	SF20
زنولیت	ZE5	ZE10	ZE15	ZE20
خاکستر بادی	FA5	FA10	FA15	FA20

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان تیب ۲ آبیکی می باشد. همچنین دوده سیلیسی مصرفی از شرکت نامیکاران قزوین، زئولیت از شرکت نگین پودر سمنان و خاکستر بادی از شرکت تجهیزات بتن خاورمیانه تهیه گردیدند. برای چسباندن صفحه زیرسری به نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای، از چسب دو مؤلفه‌ای تهیه شده از شرکت مقاوم تدبیر قشم استفاده شده است. آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها نیز آب شرب شهر قزوین می‌باشد. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی و همچنین مشخصات چسب مورد استفاده در جداول ۳-۷ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیب ۲

اجزا تشکیل دهنده	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I
درصد وزنی	۲۰/۷۹	۴/۷۶	۳/۸۶	۶۲/۲۸	۳/۲۲	۰/۳۷	۰/۶۸	۱/۸۹	۱/۸۸

جدول ۴: مشخصات آنالیز شیمیایی دوده سیلیسی

اجزا تشکیل دهنده	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	SiC	C
درصد وزنی	۹۳/۶۰	۱/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۳۱	۱/۰۱	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۳۰

جدول ۵: مشخصات آنالیز شیمیایی زئولیت

اجزا تشکیل دهنده	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I
درصد وزنی	۶۸/۹۵	۱۱/۱۴	۰/۹۷	۴/۸۳	۰/۷۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۰۶۸	۱۰/۶۴

جدول ۶: مشخصات آنالیز شیمیایی خلکستر بادی

اجزا تشکیل دهنده	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
درصد وزنی	۶۱/۳۴	۲۵/۱۱	۴/۴۲	۴/۹۴	۱/۰۹	۰/۵۹	۱/۰۱	۰/۰۸

جدول ۷: مشخصات چسب مصرفی جهت چسباندن صفحات زیرسری

نام تجاری	مقاومت	Pot life	Drying time	رنگ	نسبت اختلاط
Nitomortar FC(B)	۷۰ مگاپاسکال در ۷ روز	۹۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه و ۴۵ دقیقه در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد	۱۰ ساعت در دمای ۲۵ درجه و ۴ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد	طوسی	به صورت حجمی و با نسبت یک به یک

۴- نتایج بدست آمده با استفاده از آزمایش‌ها

۴-۱- نتایج مقاومت نمونه‌های بتنی

مطابق شکل ۶-الف، افزایش دوده سیلیسی تا مقدار جایگزینی ۱۰ درصد وزنی سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه شده و با افزایش بیشتر مقدار دوده سیلیسی مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. افزایش مقاومت فشاری با افزایش دوده سیلیسی تا ۱۰ درصد وزنی سیمان و کاهش آن با افزایش بیشتر دوده سیلیسی در مراجع [۳۹-۴۰] نیز گزارش شده است. نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی در درصدهای وزنی مورد استفاده در این تحقیق نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ افزایش مقاومت داشته‌اند. با کوچکتر کردن بازه‌های درصد وزنی دوده سیلیسی می‌توان به مقدار درصد بهینه‌ای که مقاومت فشاری بیشینه را نتیجه می‌دهد دست یافت. در مورد ژئولیت و خاکستر بادی، با افزایش درصد وزنی این پوزولان‌ها مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته و در تمامی درصدهای وزنی استفاده شده مقاومت فشاری نمونه‌ها کمتر از مقاومت فشاری نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد. نتایج مشابهی در مراجع [۴۱-۴۴] گزارش شده است. مطابق شکل، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی دوده سیلیسی با مقدار جایگزینی برابر با ۱۰ درصد وزنی سیمان به مقدار ۲۴/۶۲ مگاپاسکال و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه ساخته شده با استفاده از خاکستر بادی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد به مقدار ۱۱/۲۶ مگاپاسکال است. روندی مشابه برای نتایج به دست آمده با استفاده از روش پیچش در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود. بیشترین لنگر پیچشی اعمال شده جهت جدا کردن صفحه زیرسری از سطح نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی دوده سیلیسی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰ درصد به مقدار ۹۴ نیوتون-متر و کمترین مقدار لنگر پیچشی مربوط به نمونه حاوی خاکستر بادی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد به مقدار ۴۳ نیوتون-متر می‌باشد.

لنگر

پیچ

شی

-

نیوتون

متر

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

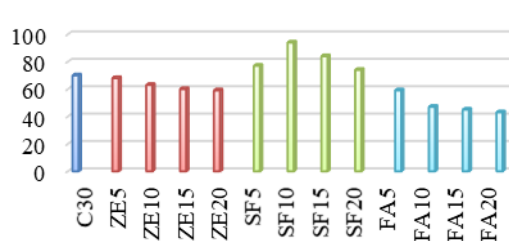
-

-

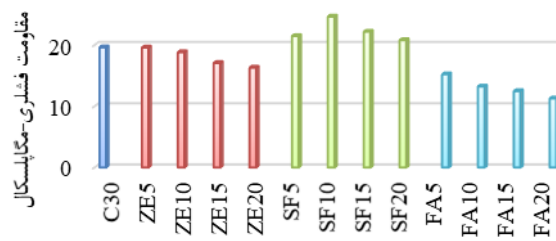
-

-

مقاومت فشاری-مگاپاسکال



ب



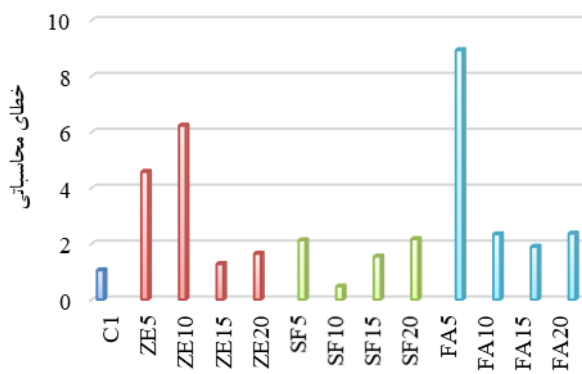
الف

شکل ۶: الف) مقاومت فشاری (ب) لنگر پیچشی به دست آمده برای جدا کردن صفحه زیرسری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های مختلف.

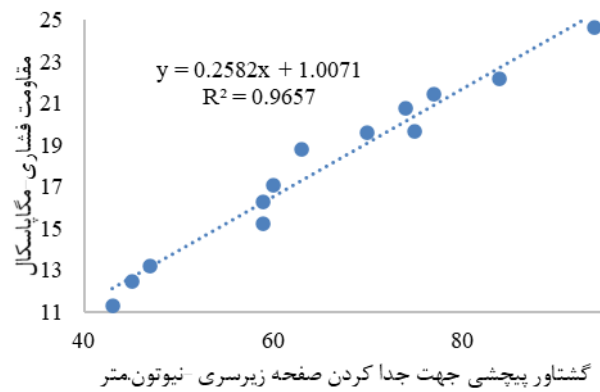
جهت پیدا کردن رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی اعمالی جهت جدا کردن صفحه زیرسری، نتایج به دست آمده با استفاده از توابع مختلف تقریب زده شده و در جدول ۸ گزارش شده‌اند. شکل ۷-الف نیز رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی که توسط تابع خطی تقریب زده شده است را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۸، رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی با دقت بالایی توسط توابع استفاده شده تقریب زده شده است، به طوری که کمترین ضریب همبستگی به دست آمده مربوط به تقریب خطی برابر با ۰/۹۶۵۷ و بیشترین ضریب همبستگی به دست آمده مربوط به تقریب درجه ۳ برابر با ۰/۹۷۵۰ می‌باشد. شکل ۷-ب قدر مطلق خطای محاسبه شده در تخمین مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از تابع درجه ۳ نسبت به مقادیر آزمایشگاهی مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. بیشترین خطا برابر با ۸/۹۲ درصد برای نمونه حاوی خاکستر بادی با جایگزینی برابر با ۵ درصد وزنی سیمان و کمترین خطای به دست آمده برابر با ۰/۴۶ درصد برای نمونه حاوی دوده سیلیسی با جایگزینی برابر با ۱۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد. مشاهده می‌شود که با به دست آوردن مقدار گشتاور پیچشی مورد نیاز جهت جداسازی صفحه زیرسری از سطح نمونه‌ها و با استفاده از تقریب‌های استفاده شده، می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌ها را با دقت بالایی محاسبه کرد. خرابی جزئی سطحی ایجاد شده نیز به سادگی قابل ترمیم است که از مزایای این روش می‌باشد.

جدول ۸: تقریب رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی با استفاده از توابع مختلف

تابع تقریب	فرمول تقریب	ضرایب تقریب				ضریب همبستگی
		a	b	c	d	R ²
خطی	Ax+b	۰/۲۵۸۲	۱/۰۰۷۱	-	-	۰/۹۶۵۷
درجه ۲	ax ² +bx+cx	-۰/۰۰۱۶	۰/۴۶۸۲	-۵/۶۲۹۲	-	۰/۹۷۴۸
درجه ۳	ax ³ +bx ² +cx+d	۰/۰۰۰۰۱۵۷	-۰/۰۰۴۸	۰/۶۷۹۵	-۱۰/۰۸۴	۰/۹۷۵۰
نمایی	ae ^{bx}	۶/۵۳۱۳	۰/۰۱۵	-	-	۰/۹۳۵۷
لگاریتمی	a ln(x)+b	۱۶/۵۱۷۰	-۵۰/۷۱۸۰	-	-	۰/۹۷۴۵
توانی	ax ^b	۰/۳۰۶۱	۰/۹۷۳۲	-	-	۰/۹۶۸۶



ب



الف

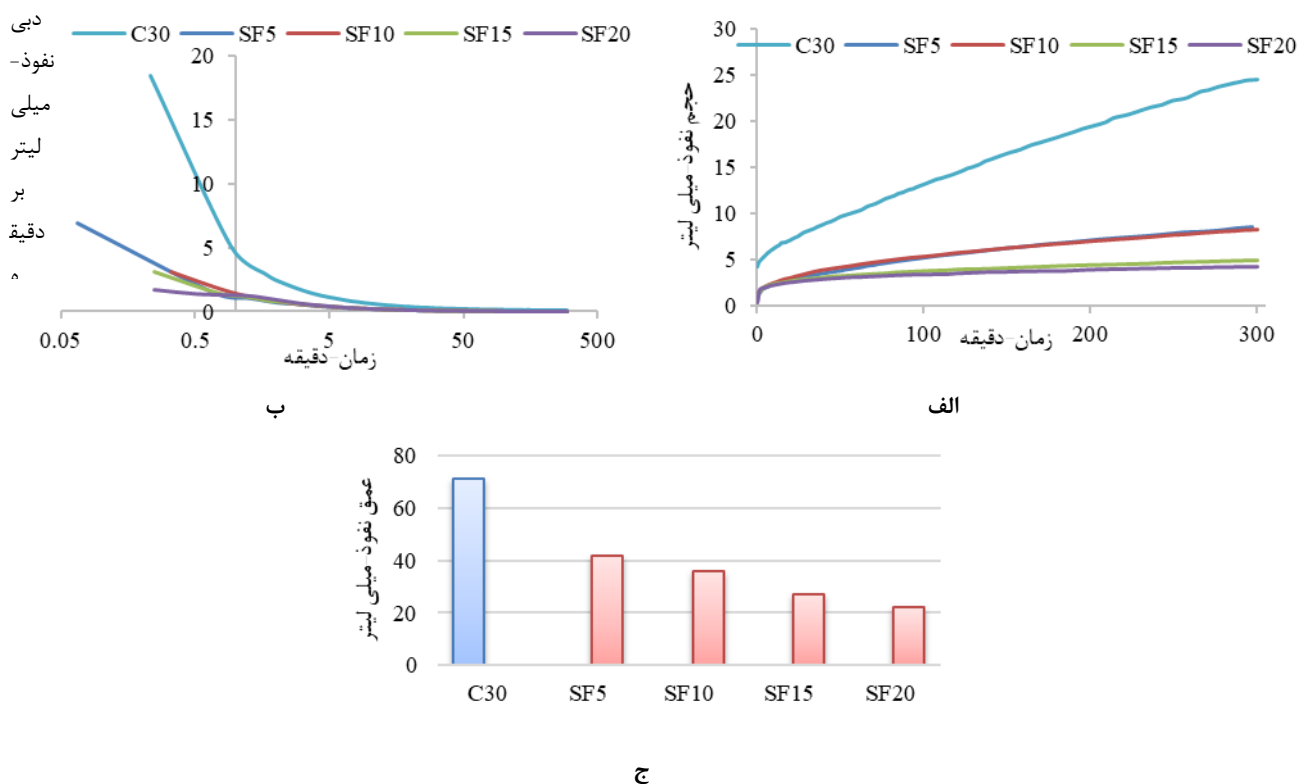
شکل ۷: الف) تقریب رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی با استفاده از تابع خطی (ب) قدر مطلق خطای محاسبه شده در تخمین مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از تابع درجه ۳.

۴-۲- نتایج به دست آمده با استفاده از آزمون‌های نفوذپذیری

کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت در مراجع [۴۵-۵۰] گزارش شده است.

نتایج آزمون محفظه استوانه‌ای نمونه‌های ۷ روزه حاوی دوده سیلیسی در شکل ۸ رسم شده است. مقادیر حجم نفوذ، متوسط دبی نفوذ (از تقسیم سطح زیر نمودار دبی نفوذ-زمان بر زمان انجام آزمایش متوسط دبی نفوذ به دست می‌آید) و همچنین عمق نفوذ برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ به ترتیب برابر با ۲۴/۵۳ میلی‌لیتر، ۰/۱۹۸۹ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۷۱ میلی‌متر می‌باشد. مطابق اشکال ۸-الف و ۸-ب، با گذشت زمان شیب نمودارها کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش نرخ نفوذ آب در نمونه‌ها با افزایش زمان انجام آزمایش است. نرخ نفوذ آب در نمونه‌ها در کمتر از یک ساعت از شروع آزمایش به حالت پایدار می‌رسد و با گذشت

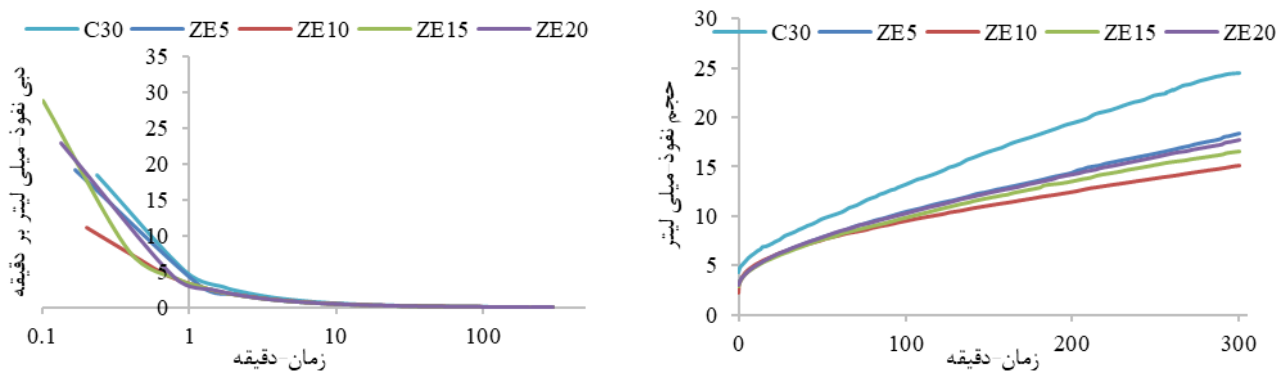
بیشتر زمان انجام آزمایش به سمت صفر میل می‌کند. در نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی، افزایش درصد وزنی پوزولان موجب کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها شده است. حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌ها برای درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۸/۶۳، ۸/۲۵، ۵/۰۰ و ۴/۲۹ میلی‌لیتر می‌باشد، در حالی که مقاومت فشاری با افزایش دوده سیلیسی تا درصد وزنی جایگزینی سیمان حدود ۱۰ درصد افزایش یافته و با افزایش بیشتر مقدار دوده سیلیسی کاهش می‌یابد. متوسط دبی نفوذ نیز برای درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۷۳۴، ۰/۰۷۱۸، ۰/۰۵۷۹ و ۰/۰۵۴۳ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد که نشان دهنده کاهش دبی نفوذ آب با افزایش درصد وزنی دوده سیلیسی است. مقادیر عمق نفوذ نمونه‌ها پس از شکستن نمونه‌ها در شکل ۸-ج نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش مقدار دوده سیلیسی عمق نفوذ نمونه‌ها کاسته شده است. مقادیر عمق نفوذ برای درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب با ۴۲، ۳۶، ۲۷ و ۲۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸: دبی نفوذ (محور زمان برای مقایسه بهتر نتایج لگاریتمی شده است) (ج) عمق نفوذ برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده دوده سیلیسی و درصدهای وزنی مختلف جایگزینی سیمان.

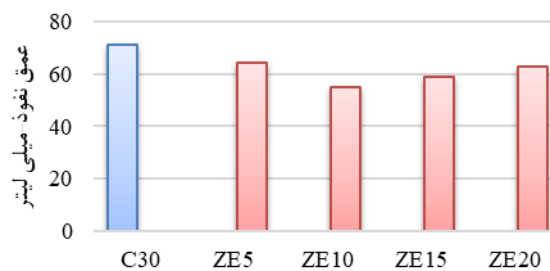
شکل ۹ نتایج به دست آمده برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه حاوی ژئولیت را نشان می‌دهد. همانند نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی، با گذشت زمان نرخ نفوذ آب در نمونه‌ها کاهش یافته است. در نمونه‌های ساخته شده حاوی ژئولیت، با افزایش درصد وزنی جایگزینی سیمان تا ۱۰ درصد نفوذپذیری کاهش یافته و با افزایش بیشتر مقدار ژئولیت نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد، ولی همچنان نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به نفوذپذیری نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ کمتر می‌باشد. حجم نفوذ برای درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۸/۴۰، ۱۵/۱۶، ۱۶/۵۷ و ۱۷/۶۶ میلی‌لیتر می‌باشد. متوسط دبی نفوذ نیز برای درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۱۶۳۷، ۰/۱۴۲۹، ۰/۱۵۳۹ و ۰/۱۶۰۹ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد. همانند حجم نفوذ و دبی نفوذ، عمق نفوذ نمونه‌های حاوی ژئولیت نیز با افزایش مقدار پوزولان تا درصد وزنی

جایگزینی سیمان حدود ۱۰ درصد کاهش یافته و با افزایش بیشتر مقدار آن عمق نفوذ نیز افزایش پیدا می‌کند. برای تمامی مقادیر وزنی ژئولیت استفاده شده، عمق نفوذ نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ کمتر است. این مقادیر برای درصد‌های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۶۴، ۵۵، ۵۹ و ۶۳ میلی‌متر می‌باشد.



ب

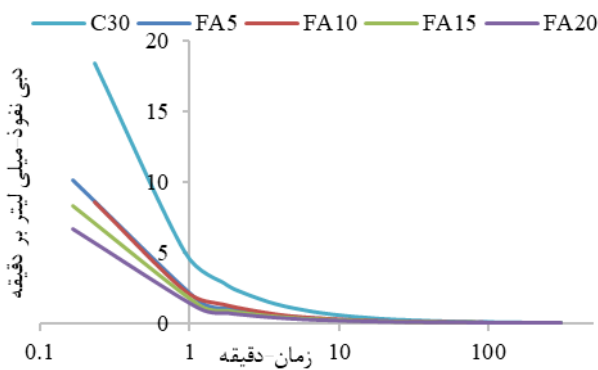
الف



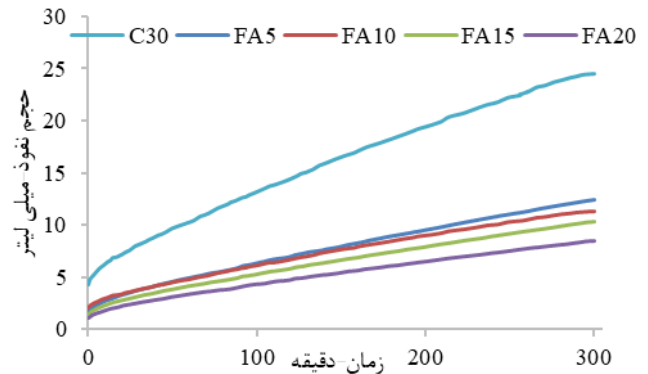
ج

شکل ۹: نتایج الف) حجم نفوذ ب) دبی نفوذ (محور زمان برای مقایسه بهتر نتایج لگاریتمی شده است) ج) عمق نفوذ برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده از ژئولیت و درصد‌های وزنی مختلف جایگزینی سیمان.

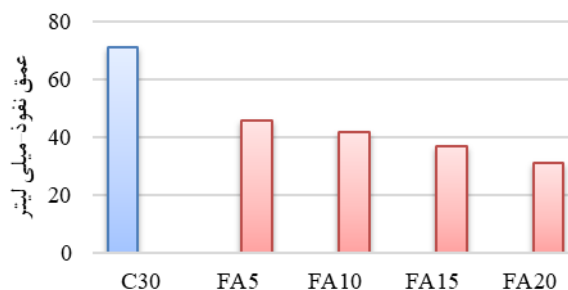
مقادیر حجم نفوذ، دبی نفوذ و عمق نفوذ نمونه‌های ۷ روزه حاوی مقادیر مختلف وزنی خاکستر بادی در شکل ۱۰ رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی خاکستر بادی نفوذپذیری نیز همانند مقاومت فشاری کاهش یافته است. حجم نفوذ برای درصد‌های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۲/۴۳، ۱۱/۶۶، ۱۰/۳۱ و ۸/۴۲ میلی‌لیتر می‌باشد. متوسط دبی نفوذ در طول انجام آزمایش برای درصد‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۹۳۲، ۰/۰۸۹۹، ۰/۰۷۲۰ و ۰/۰۵۸۳ میلی‌لیتر بر دقیقه محاسبه شدند. عمق نفوذ نیز همانند متوسط دبی نفوذ و حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌ها با افزایش مقدار درصد وزنی خاکستری بادی کاهش پیدا کرده است. بیشترین عمق نفوذ مربوط به خاکستر بادی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵ درصد ۴۶ میلی‌متر و کمترین مقدار عمق نفوذ برای درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد ۳۱ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده نمونه‌های حاوی خاکستر بادی نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ از نفوذپذیری کمتری برخوردار می‌باشند.



ب



الف

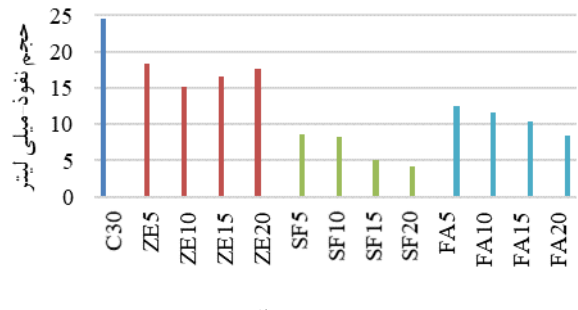
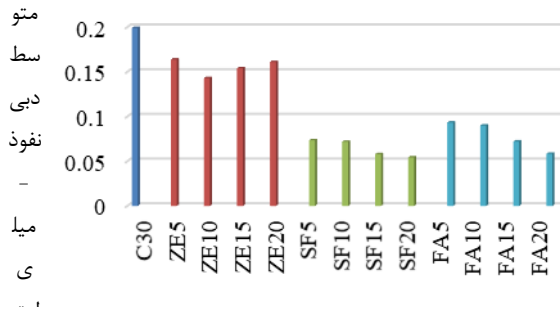


ج

شکل ۱۰: نتایج الف) حجم نفوذ ب) دبی نفوذ (محور زمان برای مقایسه بهتر نتایج لگاریتمی شده است) ج) عمق نفوذ برای نمونه های ساخته شده با استفاده خاکستر بادی و درصد های وزنی مختلف جایگزینی سیمان.

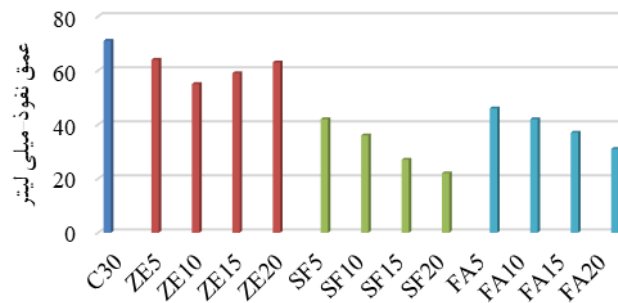
جهت انجام مقایسه کلی، نمودارهای میله ای مربوط به حجم نفوذ، متوسط دبی نفوذ و عمق نفوذ نمونه های ساخته شده با استفاده از یوزولان ها در شکل ۱۱ رسم شده است. مطابق شکل، بیشترین مقادیر مربوط به حجم نفوذ، متوسط دبی و عمق نفوذ مربوط به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تپ ۲ و کمترین مقادیر ذکر شده مربوط به نمونه های حاوی دوده سیلیسی می باشد. مطابق این اشکال، جایگزینی سیمان پرتلند با دوده سیلیسی، ژئولیت و خاکستر بادی در جهت کاهش نفوذ پذیری نمونه ها عمل کرده است.

آزمایش نفوذ پذیری بر اساس استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009) نیز بر روی نمونه های ساخته شده تحت فشار ثابت ۵ بار و به مدت ۵ ساعت جهت انجام مقایسه و صحت نتایج آزمون محفظه استوانه ای تکرار گردید. پس از اتمام آزمایش نفوذ پذیری، نمونه ها توسط جک فشاری به دو قسمت تقسیم گردیدند و عمق نفوذ نمونه ها مطابق استاندارد ذکر شده قرائت شد. مقادیر عمق نفوذ قرائت شده در شکل ۱۲-الف نشان داده شده است. مشاهده می شود که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر عمق نفوذ به دست آمده با استفاده از دو روش وجود دارد. برای مقایسه دقیقتر بین دو روش نسبت عمق نفوذ به دست آمده با استفاده از روش محفظه استوانه ای به مقدار عمق نفوذ به دست آمده با استفاده از استاندارد بریتانیا محاسبه شده و در شکل ۱۲-ب رسم شده است. کمترین مقدار برای این نسبت مربوط به نمونه های حاوی دوده سیلیسی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد به مقدار ۰/۸۶ و بیشترین مقدار برای نمونه های حاوی خاکستر بادی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰ درصد به مقدار ۱/۱۴ به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده تطابق بسیار خوب دو روش مورد استفاده می باشد.



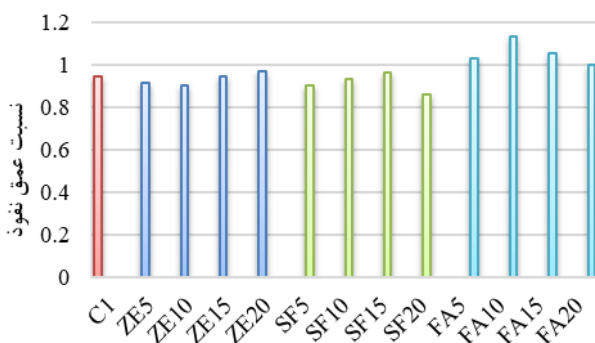
ب

الف

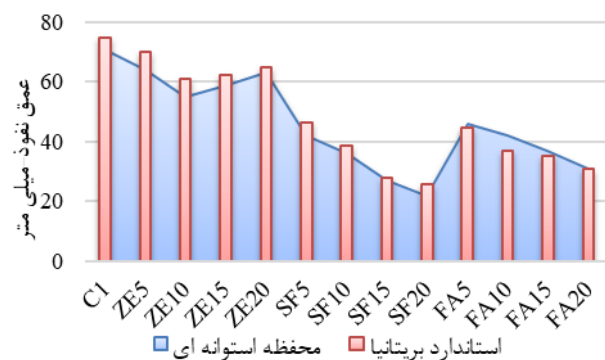


ج

شکل ۱: نمودار میله‌ای الف) حجم نفوذ ب) متوسط دبی نفوذ ج) عمق نفوذ برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده پوزولان‌های مختلف با درصد‌های وزنی مختلف جایگزینی سیمان.



ب

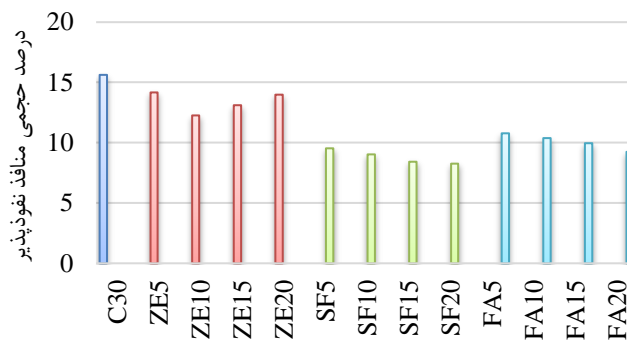


الف

شکل ۱۲: نتایج به دست آمده برای الف) عمق نفوذ با استفاده از روش محافظه استوانه‌ای و استاندارد بریتانیا ب) نسبت عمق نفوذ به دست آمده با استفاده از روش محافظه استوانه‌ای به مقدار متناظر به دست آمده با استفاده از استاندارد بریتانیا.

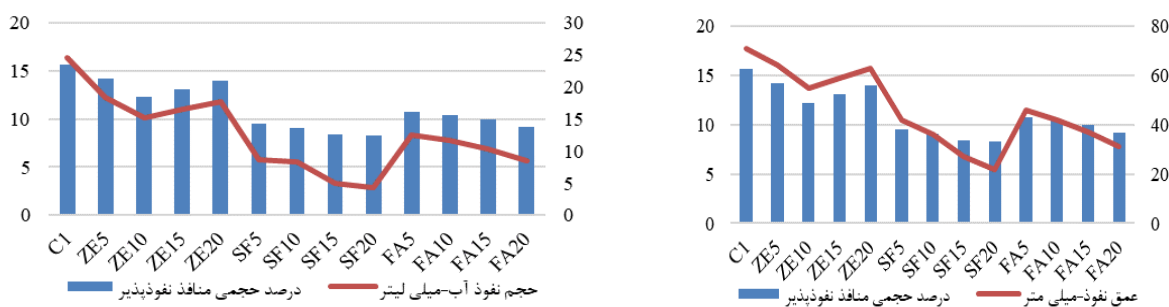
۳-۴- درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM C642-06

با استفاده از استاندارد ASTM C642-06 درصد حجمی منافذ نفوذپذیر برای نمونه‌های ساخته شده محاسبه گردید. از آنجا که آزمایش‌های نفوذپذیری بر اساس روش محافظه استوانه‌ای و استاندارد بریتانیا در این تحقیق به مدت ۵ ساعت بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت، می‌توان بیان کرد که در طی مدت انجام آزمایش تمامی منافذ نفوذپذیر در نفوذپذیری نمونه‌ها دخیل نیستند و با افزایش زمان انجام آزمایش آب تحت فشار وارد منافذ بیشتری می‌شود. با این وجود، می‌توان از مقادیر درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌ها به عنوان معیاری برای سنجش میزان نفوذپذیری آنها استفاده کرد. مقادیر درصد حجمی منافذ نفوذپذیر به دست آمده برای نمونه‌های بتنی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی درصد‌های وزنی پوزولان‌ها مقادیر منافذ نفوذپذیر نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ کاهش یافته است. مطابق شکل، بیشترین مقدار درصد حجمی منافذ نفوذپذیر مربوط به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ برابر با ۱۵/۶۲ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه بتنی ساخته شده حاوی دوده سیلیسی با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد به مقدار ۸/۲۶ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳: درصد حجمی منافذ نفوذپذیر به دست آمده برای نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C642-06.

در شکل ۱۴-الف و ب نیز رابطه بین عمق و حجم نفوذ نمونه‌ها با درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در نمونه‌هایی که درصد حجمی منافذ نفوذپذیر آنها بیشتر است، عمق و حجم نفوذ به دست آمده با استفاده از روش محافظه استوانه‌ای نیز بیشتر می‌باشد و بالعکس.



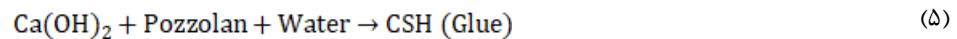
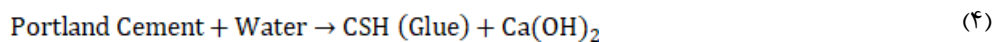
ب

الف

شکل ۱۴: رابطه بین الف) درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و عمق نفوذ ب) درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و حجم نفوذ به دست آمده با استفاده از روش های مختلف. محفظه استوانه‌ای برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان

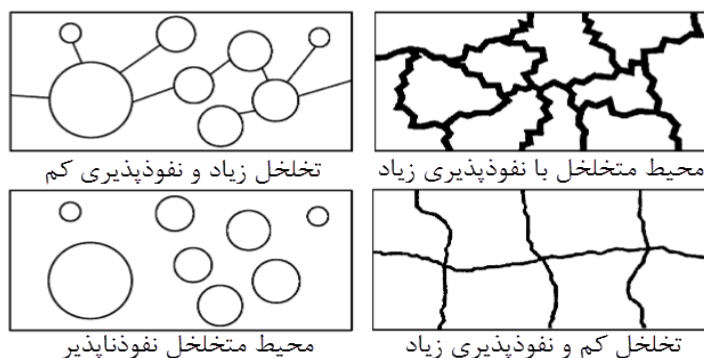
۵- تحلیل نتایج

تأثیر پوزولان‌های مورد استفاده بسته به ترکیب شیمیایی و سرعت واکنش‌پذیری آنها بر نفوذپذیری و مقاومت را می‌توان از دو جنبه شیمیایی و فیزیکی بررسی کرد. تأثیر فیزیکی شامل اثر پراکندگی ذرات افزودنی، اثر جایگزینی سیمان (اثر رقیق‌کنندگی) و تغییر توزیع اندازه ذرات می‌شود. تأثیر شیمیایی نیز مربوط به واکنش پوزولانی مواد پوزولانی است و بستگی به ترکیب شیمیایی، مقدار فاز شیشه‌ای، ریزی، مقدار پوزولان و مشخصات سیمانی که با آنها استفاده می‌شوند دارد. این واکنش به صورت روابط ۴ و ۵ می‌باشد.



کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم هیدروکسید از محصولات واکنش هیدراسیون سیمان می‌باشند. در حضور پوزولان، کلسیم هیدروکسید تولید شده از واکنش هیدراسیون سیمان مطابق رابطه ۵ با قسمت فعال یا شیشه‌ای پوزولان (به طور عمده SiO_2) واکنش می‌دهد که در نتیجه آن ژل ثانویه CSH تولید می‌شود. حفرات و منافذ موجود در بتن توسط این ژل پر شده و ارتباط بین منافذ و کانال‌های پیوسته درون بتن قطع می‌شود و از نفوذپذیری آن کاسته می‌شود.

تخلخل کل و تخلخل مؤثر معیارهایی برای سنجش مقاومت و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان می‌باشند. تخلخل کل شامل تمامی منافذ موجود در بتن (منافذ بسته و باز) و تخلخل مؤثر شامل منافذ نفوذپذیر (منافذ باز) است. نمونه‌های دارای مقاومت و نفوذپذیری بیشتر، به ترتیب دارای تخلخل کل کمتر و تخلخل مؤثر بیشتر می‌باشند. نمونه‌ای با تخلخل کل کمتر و مقاومت بیشتر ممکن است نفوذپذیری بیشتری نسبت به نمونه دارای تخلخل کل بیشتر و مقاومت کمتر (به دلیل مقدار تخلخل مؤثر بیشتر) داشته باشد. این موضوع در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه دارای تخلخل کل بیشتر، به دلیل ساختار داخلی و نحوه پیوستگی منافذ آن دارای تخلخل مؤثر کمتر و در نتیجه نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه دارای تخلخل کمتر است. می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت بیشتر الزاماً به معنای نفوذپذیری کمتر نیست.



شکل ۱۵: تفاوت بین تخلخل کل و نفوذپذیری [۵۱]

مطابق آزمایش‌های انجام شده، افزودن دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه می‌شود. نتیجه گرفته می‌شود که تأثیر فیزیکی و واکنش پوزولانی دوده سیلیسی با پر کردن منافذ موجود توسط ژل ثانویه CSH، باعث کاهش تخلخل کل و مؤثر نمونه‌های بتنی شده است. افزودن خاکستر بادی و ژئولیت نیز باعث کاهش مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه می‌گردند. افزودن این پوزولان‌ها با پر کردن منافذ موجود در نمونه‌ها، سبب کاهش تخلخل مؤثر (از طریق مسدود کردن کانال‌های پیوسته و باز موجود در بتن) و در نتیجه کاهش نفوذپذیری شده، اما تخلخل کل نمونه‌ها به دلیل سرعت کم واکنش پوزولانی آنها نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ افزایش یافته و موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. این مورد که با افزودن ژئولیت در ابتدا نفوذپذیری کاهش یافته و با افزودن بیشتر آن از مقدار مشخصی مقدار نفوذپذیری افزایش می‌یابد را می‌توان به کلوخه شدن و تجمع ذرات ژئولیت و شکل‌گیری منافذ بزرگ در این کلوخه‌ها به دلیل مقدر زیاد ذرات ژئولیت در مخلوط و در نتیجه افزایش تخلخل مؤثر نمونه‌ها و همچنین اثر رقیق‌کنندگی پوزولان توجیه نمود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله اثر پوزولان‌های دوده سیلیسی، ژئولیت و خاکستر بادی با درصد‌های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بر روی نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌های بتنی ۷ روزه مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی لازم جهت جدا کردن صفحات فلزی چسبانده شده رو سطح نمونه‌ها به ترتیب از جک فشاری و روش ابداعی پیچش استفاده شد. با استفاده از روش پیچش و رسم منحنی کالیبراسیون (منحنی گشتاور پیچشی-مقاومت فشاری) می‌توان مقاومت فشاری را با استفاده از گشتاور پیچشی اندازه‌گیری شده به دست آورد. جهت بررسی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی از دستگاه و روش ابداعی محفظه استوانه‌ای و روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8:2009) استفاده شد. از مزایای روش محفظه استوانه‌ای می‌توان به کمی بیان کردن نفوذپذیری با استفاده از این روش اشاره کرد. در روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا نیاز به تعیبه تجهیزات اضافی برای رسیدن به این هدف می‌باشد. همچنین از استاندارد ASTM C642-06 برای تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر به عنوان معیاری برای سنجش نفوذپذیری نمونه‌ها استفاده گردید. مطابق نتایج به دست آمده برای نمونه‌های ۷ روزه می‌توان بیان کرد:

۱- همبستگی بالایی در تقریب رابطه بین مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی اعمالی جهت جدا کردن صفحات فلزی از سطح نمونه‌ها با استفاده از توابع مختلف مشاهده شد. در نتیجه با استفاده از مقادیر گشتاور پیچشی، می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌ها را نیز با دقت بالایی به دست آورد.

۲- مطابق نتایج روش محفظه استوانه‌ای، دبی نفوذ آب در نمونه‌ها در ابتدای آزمایش بیشترین مقدار را داراست و با گذشت زمان و پر شدن منافذ بیشتر توسط آب از مقدار آن کاسته می‌شود. شیب نمودار حجم نفوذ-زمان که با گذشت زمان کاهش می‌یابد مبین این موضوع می‌باشد.

۳- افزودن دوده سیلیسی تا درصد وزنی حدود ۱۰ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده و با افزایش بیشتر دوده سیلیسی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. ولی در تمامی درصد‌های وزنی مورد استفاده در این تحقیق مقدار آن بیشتر از مقاومت فشاری نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد. همچنین افزودن دوده سیلیسی در تمامی درصد‌های وزنی استفاده شده در این تحقیق باعث کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها گردید. در نتیجه دوده سیلیسی موجب افزایش مقاومت فشاری و دوام نمونه‌های ۷ روزه می‌شود.

۴- افزودن ژئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. با افزودن ژئولیت تا درصد وزنی حدود ۱۰ درصد نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و افزودن بیشتر آن موجب افزایش نفوذپذیری به دلیل تجمع ذرات ژئولیت و تشکیل کلوخه و همچنین اثر

رقیق کنندگی می‌شود. تمامی درصدهای وزنی ژئولیت مورد استفاده در این تحقیق موجب کاهش نفوذپذیری نسبت به نمونه ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ شدند. در نتیجه ژئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه می‌شود.

۵- افزودن خاکستر بادی سبب کاهش مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌ها می‌شود. در نتیجه می‌توان بیان داشت که خاکستر بادی موجب کاهش عملکرد مقاومتی و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه می‌گردد.

۶- نتایج نشان می‌دهند که افزودن دوده سیلیسی بهترین عملکرد را در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به ژئولیت و خاکستر بادی داشته است. همچنین خاکستر بادی نسبت به ژئولیت در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها مؤثرتر عمل کرده است.

۷- نتایج عمق نفوذ به دست آمده برای نمونه‌ها با استفاده از دو روش محفظه استوانه‌ای و استاندارد بریتانیا تطابق بسیار خوبی با هم دارند.

۸- رابطه مستقیمی بین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و نفوذپذیری وجود دارد. نمونه‌های دارای درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بیشتر دارای نفوذپذیری بیشتری می‌باشند و بالعکس.

۹- اثر فیزیکی و شیمیایی پوزولان‌های استفاده شده در این تحقیق باعث کاهش تخلخل مؤثر و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه شده است. تأثیر شیمیایی شامل واکنش هیدراسیون و تولید ژل CSH می‌باشد که در نتیجه آن منافذ موجود در بتن پر می‌شود. همچنین پوزولان‌ها با استفاده از اثر پراکنده سازی و اصلاح اندازه توزیع ذرات موجب کاهش نفوذپذیری می‌شوند.

مراجع

- [1] Shariati, M., Ramli-Sulong, N.H., Abernejad, M.M., Shafigh, P. and Sinaei, H. (2011). Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests. *Scientific Research and Essays*, 6(1), pp 213–220.
- [2] Sinaei, H., Shariati, M., Abna, A.H., Aghaei, M. and Shariati, A. (2012). Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS. *Scientific Research and Essays*, 7(21), pp 2002–2009.
- [3] Hamidian, M., Shariati, M., Arabnejad, M.M.K. and Sinaei, H., 2011. Assessment of high strength and light weight aggregate concrete properties using ultrasonic pulse velocity technique. *International Journal of Physical Sciences*, 6(22), pp 5261–5266.
- [4] Mohammadhassani, M., Nezamabadi-Pour, H., Suhatri, M. and Shariati, M. (2014). An evolutionary fuzzy modelling approach and comparison of different methods for shear strength prediction of high-strength concrete beams without stirrups. *Smart Structures and Systems*, 14(5), pp 785–809.
- [5] Mohammadhassani, M., Suhatri, M., Shariati, M. and Ghanbari, F. (2013). Ductility and strength assessment of HSC beams with varying of tensile reinforcement ratios. *Structural Engineering and Mechanics*, 48(6), pp 833–848.
- [6] Fanaie, N., Aghajani, S. and Dizaj, E.A. (2016). Theoretical assessment of the behavior of cable bracing system with central steel cylinder. *Advances in Structural Engineering*, 19(3), pp 463–472.
- [7] Moghaddam, H., Fanaie, N. and Hamzehloo, H. (2009). Uniform hazard response spectra and ground motions for Tabriz. *Journal of Scientia Iranica*, 16(3), pp 238–248.
- [8] Jahanbakhti, E., Fanaie, N. and Rezaeian, A. (2017). Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp 180–191.
- [9] Hossain, K. M. A. (2004). Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete. *Cement and Concrete Composites*, 39 (2), pp 201–210
- [10] Hossain, K. M. A., and Lachemi, M. (2003). Corrosion resistance and Chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 34 (4), pp. 695–702.
- [11] Mehta, P.K., (1986). *Concrete. Structure, properties and materials*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

- [12] Shah, S.P. and Ahmad, S.H. (1994). *High performance concrete. Properties and applications*. New York: McGraw-Hill
- [13] Detwiler, R. J., Bhatti, J. I. and Bhattacharja, S. (1996). *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements*. Skokie: Portland Cement Association
- [14] Kjellsen, K. O., Wallevik, O. H. and Hallgren, M. (1999). On the compressive strength development of high performance concrete and paste - effect of silica fume. *Materials and Structures*, 32 (1), pp. 63-69.
- [15] Hooton, R.D. (1993). Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Mater. J.* 90 (2), pp 143-152.
- [16] Diab, A.M., Awad, A.E.M., Elyamany, H.E. and Elmoaty, A.E.M.A. (2012). Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 36. pp 311-318.
- [17] Yajun, J. and Cahyadi, J.H. (2003). Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33 (10), pp 1543-1548.
- [18] Nai-qian, F., Hsia-ming, Y. and Li-Hong, Z. (1988). The strength effect of mineral admixture on cement concrete. *Cement and concrete research*, 18 (3): pp 464-472.
- [19] Feng, N.Q., Li, G.Z. and Zang, X.W. (1990). High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture. *Cement, concrete and aggregates*, 12 (2), pp 61-69.
- [20] Liguori, B., Caputo, D., Marroccoli, M. and Colella, C. (2004). Evaluation of zeolite-bearing tuffs as pozzolanic addition for blended cements. *ACI Special Publication*, 221, pp 319-334.
- [21] Perraki, T., Kakali, G. and Kontoleon, F. (2003). The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. *Microporous and mesoporous materials*, 61(1), pp 205-212.
- [22] Massazza, F. (1998). Pozzolana and pozzolanic cements. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed, pp 471-631.
- [23] Shi, H.S., Xu, B.W. and Zhou, X.C. (2009). Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Constr Build Mater.* 23 (5), pp 1980-1985.
- [24] Najimi, M. (2010). *Investigating the properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious materials*, Building and Housing Research Center, Tehran
- [25] Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. and Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*, 34 (5), pp 731-735.
- [26] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural Zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13 (8), pp 427-432.
- [27] Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K.E. and Malhotra, V.M. (1994). Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in US, *ACI Mater. J.*, 91 (1), 3-12.
- [28] Joshi, R.C. and Lohita, R.P. (1997). *Fly ash in concrete: production, properties and uses*. Amsterdam: Gordon and Breach.
- [29] Han, S.H., Kim, J.K. and Park. Y. D. (2003). Prediction of compressive strength of fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 33 (7), pp 965-971.
- [30] Oner, A., Akyuz, S. and Yildiz, R. (2005). An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (6), pp 1165-1171.
- [31] Poon, C.S., Lam, L. and Wong, Y.L. (2000). A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), pp 447-455.
- [32] Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. London: Longman.
- [33] Chahal, N. and Siddique, R. (2013). Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria. *Construction and Building Materials*, 49, pp 161-174.
- [34] Naderi, M. (2010). Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method. *Registration of Patent in Companies and industrial property Office*. Reg. N. 67726. Iran.

- [35] BS EN 12390-8. (2009). Testing Hardened Concrete – Part 8: Depth of Penetration of Water under Pressure. *British Standard Institution*, London.
- [36] ASTM C642-06. (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [37] Naderi, M. (2002). Twist-off method. *Registration of Patent in Companies and industrial property Office*, Iran.
- [38] ASTM C136-06. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [39] Hanumesh, B. M., Varun, B. K. and Harish, B. A. (2015). The mechanical properties of concrete incorporating silica fume as partial replacement of cement. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(9), p 270.
- [40] Ajileye, F. V. (2012). Investigations on microsilica (Silica Fume) as partial cement replacement in concrete. *Global Journal of Research In Engineering*, 12(1-E).
- [41] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, pp 1023–1033.
- [42] Juengsuwattananon, K. and Seraphin, S. (2010). Effects of Zeolite A on the microstructure and strength development of blended cement. *Journal of the Microscopy Society of Thailand*, 24(2), pp 94–98.
- [43] Islam, M.M. and Islam, M.S. (2013). Strength and durability characteristics of concrete made with fly-ash blended cement. *Australian Journal of Structural Engineering*, 14(3), pp 303–319.
- [44] Bendapudi, S.C.K. and Saha, P. (2011). Contribution of fly ash to the properties of mortar and concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6), pp 1017–1023.
- [45] Elawady, E., El Hefnawy, A.A. and Ibrahim, R.A. (2008). Comparative Study on Strength, Permeability and Sorptivity of Concrete and their relation with Concrete Durability. *Certified International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 4(4), pp 132–139.
- [46] Gjrov, O.E. (1983). Durability of concrete containing condensed silica fume. *ACI Special Publications*, 79, pp 695–708.
- [47] Yu, Z., Ni, C., Tang, M. and Shen, X. (2018). Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*, 175, pp 458–466.
- [48] Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D. (1992). The permeability of fly ash concrete. *Materials and Structures*, 25(7), pp 388–396.
- [49] Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), pp 134–141.
- [50] de la Cruz Barroso, J.C., del Campo, J.M. and Aranguren, D.C. (2015). Comparative study on porosity and permeability of conventional concrete and concrete with variable proportions of natural zeolite additions. *Revista de la Construcción*, 14(3), pp 72–78.
- [51] Chia, K.S. and Zhang, M.H. (2002). Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 32(4), pp 639–645.