

مطالعه‌ی مقاومت و ضرایب انتشار و نفوذپذیری بتنی‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک

محمود نادری (استاد)

علیرضا کبودان* (کارشناس ارشد)

مجید امین افشار (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۲۵-۱۳

از آن‌جا که نفوذپذیری سازه‌های بتنی، یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در دوام و عمر سرویس‌دهی آنهاست، در پژوهش حاضر اثر افزودنی‌های دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک با درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان در نفوذپذیری و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۷ روزه با استفاده از روش "محفظه‌ی استوانه‌یی" بررسی شده است. همچنین رابطه‌ی بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار با متغیرهای: عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ، درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و مقاومت فشاری نمونه‌ها ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که علی‌رغم مشاهده‌ی رابطه‌ی با دقت بالا بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار با متغیرهای ذکر شده، رابطه‌ی مستقیم و قابل توجه بین مقاومت فشاری بتن و ضرایب مذکور مشاهده نمی‌شود.

واژگان کلیدی: دوام، نفوذپذیری، افزودنی، روش محفظه‌ی استوانه‌یی، ضرایب نفوذپذیری، انتشار.

profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir
alireza.kaboudan@yahoo.com
mafshar@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

به دو صورت اندازه‌گیری مقدار جریان و اندازه‌گیری عمق نفوذ انجام می‌شود. برای تعیین مقدار جریان، آب تحت فشار از یک سطح نمونه به درون بتن وارد و از سطح دیگر نمونه خارج می‌شود. این عمل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که جریانی با مقدار ثابت در نمونه به وجود آید. سپس دبی خروجی اندازه‌گیری و ضریب نفوذپذیری محاسبه می‌شود. زمان لازم برای رسیدن به جریانی با مقدار ثابت، بستگی به: فشار اعمالی، مشخصات مواد تشکیل‌دهنده‌ی بتن، اندازه‌ی نمونه و ... دارد. ممکن است مدت زمانی برابر با ۲ روز تا ۲ هفته لازم باشد تا جریان آب به حالت پایدار برسد. مشکلاتی برای انجام آزمایش نفوذپذیری بر اساس روش جریان ثابت گزارش شده است.^[۱-۱۳] برای بتن‌های با نفوذپذیری بسیار کم، زمان لازم برای رسیدن به جریان پایدار بسیار طولانی است. در نتیجه آزمایش نفوذپذیری با اندازه‌گیری عمق نفوذ تحت فشار ثابت به دلیل زمان کمتر انجام آزمایش ترجیح داده می‌شود. در روش مذکور نیازی به تداوم آزمایش برای رسیدن به جریان با مقدار ثابت نیست و در بعضی از منابع استفاده از روش اخیر برای اندازه‌گیری نفوذپذیری در جای بتن گزارش شده است.^[۱۴]

به دلیل اهمیت بحث دوام بتن، در پژوهش حاضر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی حاوی دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک با استفاده از روش "محفظه‌ی استوانه‌یی"،^[۱۵] بررسی شده‌اند. از برتری‌های روش محفظه‌ی استوانه‌یی نسبت به بیشتر روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، می‌توان به قابل

نفوذ مایعات به بتن معمولاً باعث شسته شدن و خارج شدن هیدروکسیدکلسیم و نفوذ عوامل مخرب به داخل آن می‌شود. حجم آب در دمای بین صفر تا ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، که سبب فشار به بتن مجاور و تخریب آن می‌شود. نفوذ آب به بتن، موجب خوردگی آرمه‌ی موجود می‌شود و در نتیجه عمر مفید سازه‌ی بتنی کاهش می‌یابد. همچنین در مخازن مایعات، که فشارهای هیدرواستاتیکی بسیار زیادی دارند، نفوذپذیری اهمیت ویژه‌ی دارد. این موضوع در سدهای بتنی بزرگ بسیار حائز اهمیت است. میزان نفوذپذیری بتن در برابر سیال به ساختار داخلی بتن، مانند: پیوستگی، اندازه‌ی منافذ و ویسکوزیته‌ی سیال نفوذکننده به داخل آن بستگی دارد. باید توجه داشت که نفوذپذیری بتن، رابطه‌ی ساده‌ی با تخلخل آن ندارد. با وجود تخلخل ۲۸ درصدی ژل سیمان، نفوذپذیری آن $10^{-6} \times 7$ متر بر ثانیه است. منافذ بین ذرات جامد خمیر سخت شده‌ی سیمان بسیار کوچک و زیاد هستند.^[۱] رایج‌ترین شیوه برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده از روش Permeability Cell است. در مطالعات بسیاری، از سلول‌های نفوذپذیری با مشخصات و ابعاد مختلف برای اعمال فشار به یک سمت نمونه و اندازه‌گیری جریان در مقطع ورودی یا خروجی جریان استفاده شده است.^[۲-۶] آزمایش نفوذ آب به بتن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۷/۸، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۲/۴، پذیرش ۱۳۹۷/۱۲/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2019.51622.2420

و مدت زمان عمل‌آوری آن، مدت زمان سخت شدن متفاوت است. پس از سخت شدن چسب، دستگاه آزمایش بر روی صفحه‌ی زیرسری سوار می‌شود. آب از طریق لوله‌ی تعبیه شده وارد دستگاه می‌شود و با چرخاندن دسته‌ی تنظیم فشار و پایین آمدن پیستون دستگاه، فشار اعمالی به مقدار دلخواه مورد نظر تنظیم می‌شود. مقدار فشار اعمالی از طریق گیج فشار قابل قرائت است. با گذشت زمان به دلیل وجود اصطکاک داخلی و خاصیت گرانبوی مایع از مقدار فشار اعمالی کاسته می‌شود، که با چرخاندن مجدد دسته‌ی تنظیم فشار می‌توان مقدار فشار اعمالی را در طول آزمایش در یک مقدار ثابت تنظیم کرد. مقدار نفوذ مایع به بتن را می‌توان از طریق میکرومتر تعبیه شده بر روی دستگاه در زمان‌های مختلف قرائت کرد. مقدار حجم آب نفوذ کرده در نمونه در هر لحظه از زمان از طریق حاصل ضرب مقدار قرائت شده از میکرومتر در سطح مقطعی که فشار به آن وارد می‌شود، محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ کرده در نمونه و مدت زمان سپری شده از شروع آزمایش، نرخ نفوذ آب در نمونه قابل محاسبه است. با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مانند روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا و بدون تعبیه‌ی تجهیزات جانبی اضافی، نمی‌توان پارامترهای مذکور را محاسبه کرد که از مزیت‌های روش "محفظه‌ی استوانه‌یی" است. همچنین روش محفظه‌ی استوانه‌یی قابلیت انجام در جای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌ها را دارد.

پس از انجام آزمایش، نمونه‌ی بتنی با استفاده از جک فشاری مطابق شکل ۱ به دو قسمت تقسیم و مقدار ارتفاع نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود. مقدار نفوذ آب در نمونه می‌تواند به عنوان شاخصی برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌ها استفاده شود.

۲.۲. تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر با استفاده از

ASTM C642-06

آزمایش ذکر شده شامل ۴ مرحله‌ی: خشک کردن نمونه‌ها، اشباع کردن نمونه‌ها در آب، جوشاندن آنها در آب و اندازه‌گیری وزن ظاهری نمونه‌هاست و به این صورت انجام می‌شود:

- ۱- قرار دادن نمونه‌ها در داخل گرم‌خانه در دمای 100° تا 110° درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت کمیته‌ی ۲۴ ساعت و خارج کردن آنها از گرم‌خانه پس از گذشت مدت اخیر به منظور رساندن دمای نمونه‌ها به 20° تا 25° درجه‌ی سانتی‌گراد و اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها و تکرار روند اخیر تا زمانی که تفاوت دو وزن متوالی اندازه‌گیری شده کمتر از 0.5% وزن کمتر باشد (وزن A).

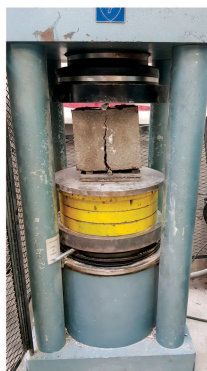
حمل بودن تجهیزات آزمایش اشاره کرد، که در نتیجه‌ی آن اندازه‌گیری نفوذپذیری در محل امکان‌پذیر است. در صورتی که بیشتر روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن به دلیل حجم و وزن زیاد تجهیزات، قابلیت انجام آزمایش در محل را ندارند. از دیگر مزایای روش محفظه‌ی استوانه‌یی می‌توان به این موارد اشاره کرد: سرعت زیاد انجام آزمایش، عدم نیاز به دانش قبلی برای انجام آزمایش، تجهیزات ارزان قیمت، امکان انجام آزمایش در محل‌هایی که نمونه‌گیری مشکل است، امکان انجام آزمایش بر روی مصالح دیگر، مانند: آجر و ملات، امکان تکرار آزمایش و هزینه‌ی اقتصادی انجام آن. از روش موجود در دستورالعمل ASTM C642-06^[۱۶] نیز برای اندازه‌گیری درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌های بتنی استفاده شده است. از آن‌جا که از ضریب نفوذپذیری به عنوان معیاری برای سنجش نفوذپذیری سیال در جسم متخلخل استفاده می‌شود، با استفاده از قانون دارسی^[۱۷] که حاکم بر جریان لایه‌یی است، ضرایب نفوذپذیری نمونه‌های بتنی محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین معادله‌ی یک‌بعدی حاکم بر نفوذ سیال در اجسام متخلخل با استفاده از قانون پایستگی جرم به دست آمده و پس از حل معادله‌ی مذکور، با استفاده از روش تفاضل محدود ضرایب انتشار نمونه‌های بتنی محاسبه شده است. ضریب انتشار همانند ضریب نفوذپذیری می‌تواند به عنوان معیاری برای سنجش نفوذپذیری نمونه‌ها استفاده شود. ضریب انتشار تابع عوامل مختلفی، از جمله میزان تراکم‌پذیری جسم متخلخل در اثر فشار اعمالی است. در نتیجه در فشارهای زیاد، که نفوذ سیال باعث تغییر شکل داخلی بتن می‌شود، ضریب انتشار می‌تواند به عنوان معیار دقیق‌تری نسبت به ضریب نفوذپذیری برای ارزیابی میزان نفوذ استفاده شود. قانون دارسی توزیع خطی فشار را در ارتفاع نمونه در نظر می‌گیرد. ضمن این‌که رابطه‌ی دارسی بر اساس نتایج آزمایشگاهی بر روی بستر ماسه‌یی پیشنهاد شده^[۱۷] و یک رابطه‌ی تجربی است. در صورتی که معادله‌ی انتشار بر اساس روابط ریاضی و فیزیک حاکم بر اساس انتشار به دست آمده است. با استفاده از معادله‌ی دو‌بعدی انتشار می‌توان پروفیل نفوذ سیال در جسم متخلخل را در طول مدت زمان انجام آزمایش به دست آورد. این امر با استفاده از معادله‌ی دارسی امکان‌پذیر نیست. البته در پژوهش حاضر از معادله‌ی یک‌بعدی انتشار استفاده شده است. در پژوهش حاضر، علاوه بر مطالعه‌ی مقاومت و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک، روابط بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار نمونه‌های بتنی با مقاومت فشاری، درصد حجمی منافذ نفوذپذیر، حجم نفوذ، عمق نفوذ و متوسط نرخ نفوذ نیز ارزیابی شده است.

۲. آزمایش‌های انجام شده

۱.۲. اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از روش "محفظه‌ی

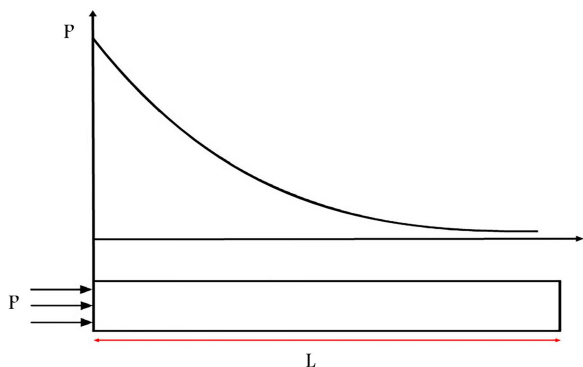
استوانه‌یی"

روش "محفظه‌ی استوانه‌یی" برای اولین بار توسط نادری (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده شده است.^[۱۵] از روش محفظه‌ی استوانه‌یی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری سایر مصالح، مانند: آجر، ملات، سنگ و... نیز استفاده می‌شود. همچنین از مزیت‌های روش ذکر شده نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری نفوذپذیری، مانند روش موجود در استاندارد بریتانیا، می‌توان به ارائه‌ی نتایج به صورت کمی اشاره کرد. روش کار به این صورت است که پس از زدودن سطح نمونه از آلودگی توسط برس سیمی، صفحه‌ی زیرسری توسط چسب بر روی سطح نمونه چسبانده و اجازه داده می‌شود تا چسب سخت شود. بسته به نوع چسب مصرفی



الف) دستگاه آزمایش؛ ب) شکستن نمونه آزمایش؛ ج) پروفیل نفوذ.

شکل ۱. دستگاه "محفظه‌ی استوانه‌یی" و روش انجام آزمایش.



شکل ۵. پروفیل یک بُعدی توزیع فشار در یک جسم متخلخل.

مشتق اول فشار نسبت به متغیر زمان و مشتق دوم آن نسبت به مکان به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial P_i^n}{\partial t} = \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 P_i^n}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1}^n - 2P_i^n + P_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \quad (12)$$

با استفاده از معادلات ۱۰ الی ۱۲ معادله‌ی نفوذ به صورت معادله‌ی ۱۳ نوشته خواهد شد:

$$\beta^2 \frac{P_{i+1}^n - 2P_i^n + P_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} \quad (13)$$

بنابراین فشار در هر نقطه در گام زمانی $n+1$ ام را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه کرد:

$$P_i^{n+1} = \frac{\beta^2 \Delta t}{(\Delta x)^2} P_{i+1}^n + (1 - \frac{2\beta^2 \Delta t}{(\Delta x)^2}) P_i^n + \frac{\beta^2 \Delta t}{(\Delta x)^2} P_{i-1}^n \quad (14)$$

برای پایداری جواب باید شرط ضرایب مثبت برقرار باشد. با استفاده از شرط اخیر می‌توان بیشینه‌ی Δt برای پایداری را مطابق معادله‌ی ۱۵ به دست آورد:

$$(1 - \frac{2\beta^2 \Delta t}{(\Delta x)^2}) \geq 0 \quad \rightarrow \quad \Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\beta^2} \quad (15)$$

شرایط مرزی نیز مطابق شکل ۵ به صورت رابطه‌ی ۱۶ است:

$$p(0, t) = P \quad p(L, t) = 0 \quad p(x, 0) = 0 \quad (16)$$

پروفیل توزیع فشار در جهت اعمال فشار در شکل ۵ نشان داده شده است.

۲.۲.۳. معادله‌ی انتشار با در نظر گرفتن نمونه‌ها به صورت یک محیط

نیمه بی‌نهایت

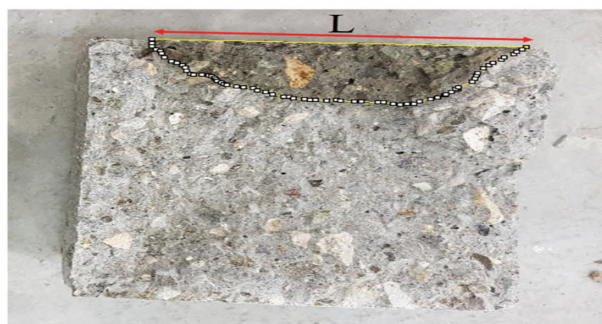
با توجه به این‌که در پژوهش حاضر آب نفوذ کرده به داخل نمونه‌ها از اطراف آنها خارج نمی‌شود (سطوح عمود بر سطح اعمال فشار)، می‌توان نمونه‌ها را به صورت یک محیط نیمه بی‌نهایت در نظر گرفت، که برای درک بهتر آن، پروفیل نفوذ آب در نمونه‌های ۱۵ سانتی‌متری و نمونه‌های با ابعاد بزرگ‌تر در شکل ۶ نشان داده شده است. از آن‌جا که آب تحت فشار از مرزهای نمونه به بیرون نشر پیدا نکرده است، می‌توان گفت که پروفیل نفوذ آب در نمونه‌های با ابعاد بزرگ‌تر نیز همانند نمونه با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر است. برای به دست آوردن طولی که در آن فرض نمونه‌ی نیمه بی‌نهایت تحقق پیدا می‌کند، باید معادله‌ی انتشار را با ضرایب انتشار و طول‌های مختلف برای نمونه‌ها حل کرد تا



الف) نمونه شکسته شده؛

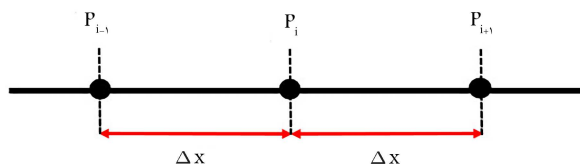


ب) تعیین طول؛



ج) تعیین محدوده تر شده توسط آب برای محاسبه متوسط عمق.

شکل ۳. اندازه‌گیری عمق نفوذ نمونه‌ی شکسته شده.



شکل ۴. گره مرکزی و گره‌های مجاور در مدل یک بُعدی.

که در آن β^2 ضریب انتشار یا ضریب نفوذ سیال ($\frac{m^2}{s}$) نام دارد و برابر با $\frac{k}{\mu \phi c_t}$ است.

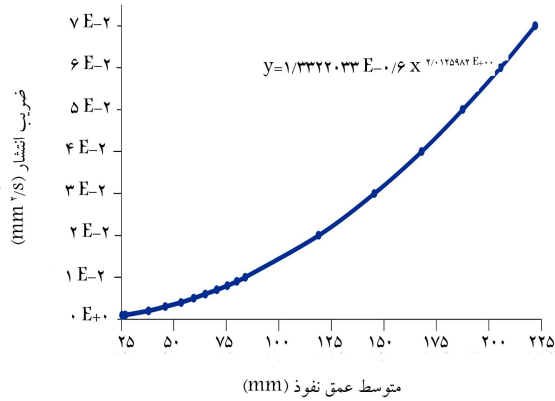
۱.۲.۳. حل معادله‌ی نفوذ سیال در جسم متخلخل

ضریب انتشار، اثر تغییر شکل داخلی در اثر فشار را در معادله‌ی انتشار جای می‌دهد. حل معادله‌ی انتشار با استفاده از روش عددی تفاضل محدود امکان‌پذیر است. در پژوهش حاضر، از روش صریح تفاضل محدود برای حل معادله‌ی نفوذ استفاده شده است. در شکل ۴، گره مرکزی و گره‌های مجاورش نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، معادله انتشار در گام زمانی n ام برای گره‌ی i ام به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشته می‌شود:

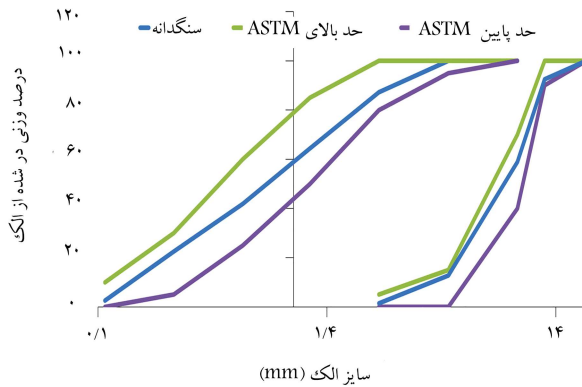
$$\frac{\partial P_i^n}{\partial t} = \beta^2 \frac{\partial^2 P_i^n}{\partial x^2} \quad (10)$$

جدول ۱. طرح اختلاط بتن (Kg/m^۳).

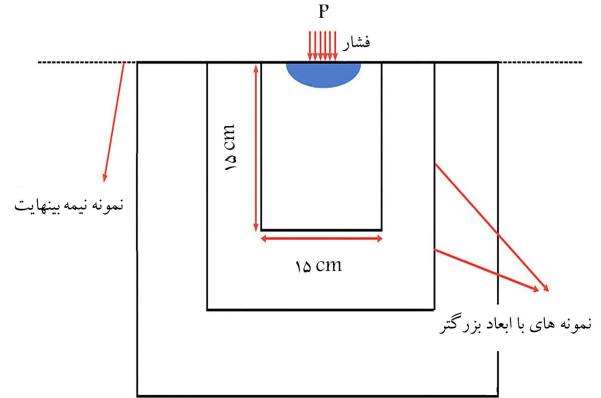
نسبت آب به سیمان	آب Kg/m ^۳	سیمان Kg/m ^۳	شن Kg/m ^۳	ماسه Kg/m ^۳	مقاومت نمونه مکعبی ۲۸ روزه (MPa)
۰/۵	۱۷۵	۳۵۰	۶۹۲	۹۹۸	۳۰



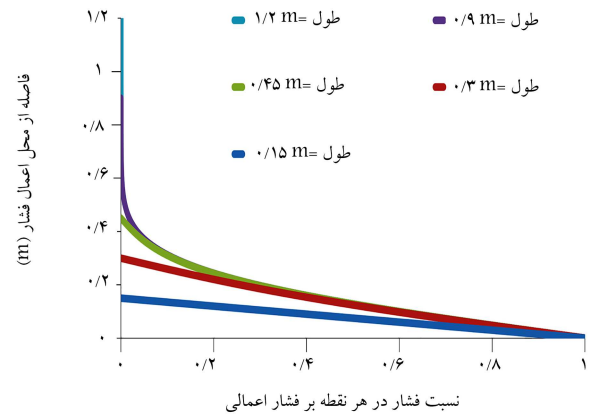
شکل ۸. رابطه‌ی بین عمق نفوذ و ضریب انتشار.



شکل ۹. منحنی دانه بندی ریزدانه و درشت‌دانه.



شکل ۶. نفوذ آب در نمونه‌های با ابعاد مختلف.



شکل ۷. تغییرات فشار آب در جهت اعمال فشار برای نمونه‌های با ابعاد مختلف.

مطابق شکل ۸، رابطه‌ی بین ضریب انتشار و متوسط عمق نفوذ بر اساس رابطه‌ی ۱۷ بیان می‌شود.

$$\beta^2 = 1/33220.33 \times 10^{-6} \cdot dm^{2/0.125982} \quad (17)$$

۴. مراحل پژوهش

در پژوهش حاضر اثر دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک با درصد‌های جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان، در مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تپ III (نمونه‌ی کنترل) بررسی شده است. به منظور بررسی نفوذپذیری نمونه‌ها از دو شاخص ضریب نفوذپذیری به دست آمده از قانون دارسی و ضریب انتشار به دست آمده از معادله‌ی نفوذ سیال در اجسام متخلخل استفاده شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C ۱۳۶-۰۶^[۱۸]، صورت گرفت که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. طرح اختلاط استفاده‌شده در پژوهش

مشخص شود که در چه طولی، مقدار نفوذ در مدل یک‌بعدی تحت تأثیر ابعاد نمونه قرار نگرفته است. این طول به عنوان طول نمونه‌ی نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۷، نحوه‌ی توزیع فشار آب در جهت اعمال فشار پس از گذشت ۵ ساعت برای نمونه‌های با ابعاد مختلف و ضریب انتشار برابر با $1 \times 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s}\right)$ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۷، پروفیل توزیع فشار در نمونه‌ها با بزرگ‌تر شدن طول آنها، انطباق بیشتری با هم پیدا می‌کند، به طوری که پروفیل توزیع فشار در نمونه‌های با ابعاد ۰/۹ و ۱/۲ متر بر هم منطبق شده است. بنابراین تحت فشار اعمالی و برای ضریب انتشار برابر با $1 \times 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s}\right)$ ، نمونه‌های با این ابعاد را می‌توان همانند یک محیط نیمه بی‌نهایت در نظر گرفت. شکل ۸، رابطه‌ی بین عمق نفوذ و ضریب انتشار نمونه‌های نیمه بی‌نهایت تحت فشار اعمالی به مدت ۵ ساعت را نشان می‌دهد. در شکل مذکور، عمقی که در آن مقدار فشار کوچک‌تر از 0.00001 فشار کاهش یافته‌ی اعمالی است، به عنوان عمق نفوذ در نظر گرفته شده است. برای تحقق شرط نیمه بی‌نهایت بودن نمونه‌ها، طول آنها برابر با ۱/۲ متر فرض شده است.

جدول ۲. نام‌گذاری نمونه‌های ساخته شده.

درصد وزنی جایگزینی				
نوع پوزولان مصرفی	۵	۱۰	۱۵	۲۰
دوده سیلیسی	SF۵	SF۱۰	SF۱۵	SF۲۰
زئولیت	ZE۵	ZE۱۰	ZE۱۵	ZE۲۰
خاکستر بادی	FA۵	FA۱۰	FA۱۵	FA۲۰
پودر آهک	LP۵	LP۱۰	LP۱۵	LP۲۰

به مدت ۵ ساعت بر روی دست‌کم ۲ نمونه انجام شد و نتایج بر اساس میانگین آنها در پژوهش حاضر ارائه شده است. تمامی مراحل آزمایش‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین (ره) انجام شده است. جهت سهولت در بیان نتایج، نام‌گذاری آنها بر اساس نوع ماده‌ی مصرفی در طرح اختلاط بتن و درصد وزنی جایگزینی آنها مطابق جدول ۲ صورت گرفته است. نمونه‌ی بتنی ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ II نیز C۳۰ نام‌گذاری شد. ترکیب شیمیایی سیمان، مواد مصرفی و همچنین مشخصات چسب مورد استفاده برای چسباندن صفحات زیرسری در جدول‌های ۳ الی ۸ ارائه شده‌اند.

حاضر بر اساس مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی ۲۸ روزه برابر با ۳۰ مگاپاسکال بوده و در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری از روش مقاومت فشاری تک‌محوره، آزمایش نفوذپذیری با استفاده از روش "محفظه‌ی استوانه‌یی" و همچنین تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM C۶۴۲-۰۶ از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر، که در آب آهک عمل‌آوری شده بودند، استفاده شد. آزمایش مقاومت فشاری و تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بر روی دست‌کم ۳ نمونه انجام و از میانگین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها برای انجام محاسبات استفاده شد. آزمایش نفوذپذیری تحت فشار ثابت برابر با ۵ بار

۵. نتایج

۱.۵. آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌های ساخته شده با استفاده از مواد مختلف استفاده شده در پژوهش حاضر پس از ۷ و ۲۸ روز از آب خارج شدند و در حالت اشباع با سطح خشک تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ی کنترل برابر با ۱۹٫۶ مگاپاسکال به دست آمد. در شکل ۱، نتایج مربوط به نسبت مقاومت فشاری ۷

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند نوع II.

L.O.I	SO _۳	K _۲ O	Na _۲ O	MgO	Cao	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	درصد وزنی
۱٫۸۸	۱٫۸۹	۰٫۶۸	۰٫۳۷	۳٫۲۲	۶۲٫۲۸	۳٫۸۶	۴٫۷۶	۲۰٫۷۹	

جدول ۴. ترکیب شیمیایی دوده‌ی سیلیسی.

C	SiC	SO _۳	K _۲ O	Na _۲ O	MgO	Cao	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	درصد
۰٫۳۰	۰٫۵۰	۰٫۱۰	۱٫۰۱	۰٫۳۱	۰٫۹۷	۰٫۴۹	۰٫۳۷	۱٫۳۲	۹۳٫۶۰	

جدول ۵. ترکیب شیمیایی زئولیت.

L.O.I	SO _۳	K _۲ O	Na _۲ O	MgO	Cao	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	درصد
۱۰٫۶۴	۰٫۰۶۸	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۷۹	۴٫۸۳	۰٫۹۷	۱۱٫۴	۶۸٫۹۵	

جدول ۶. ترکیب شیمیایی خاکستر بادی.

SO _۳	K _۲ O	Na _۲ O	MgO	Cao	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	درصد وزنی
۰٫۰۸	۱٫۰۱	۰٫۵۹	۱٫۰۹	۴٫۹۴	۴٫۴۲	۲۵٫۱۱	۶۱٫۳۴	

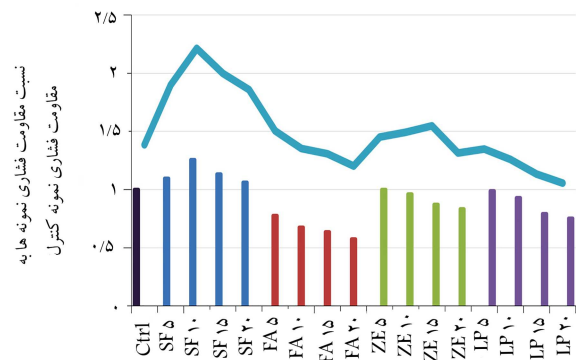
جدول ۷. ترکیب شیمیایی پودر آهک.

L.O.I	SO _۳	K _۲ O	Na _۲ O	MgO	Cao	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	درصد وزنی
۴۱٫۷۶	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۴	۵۳٫۱۶	۰٫۱۲	۱٫۰۳	۲٫۵۸	

جدول ۸. مشخصات چسب مصرفی.

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 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

روزه نسبت به نمونه‌ی کنترل شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها در سایر درصد‌های وزنی جایگزینی خاکستر بادی از مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی کنترل کمتر است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها با جایگزینی سیمان با ژئولیت تا ۱۵٪ وزن آن افزایش یافته و با افزودن بیشتر ژئولیت مقاومت فشاری کاهش یافته است. برخلاف نمونه‌های ۷ روزه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های حاوی ژئولیت در درصد‌های وزنی جایگزینی برابر با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی کنترل بیشتر بوده و در درصد وزنی جایگزینی برابر با ۲۰٪، مقدار آن نسبت به نمونه‌ی کنترل کمتر شده است. بنابراین مقدار بهینه‌ی ژئولیت برای رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۱۵٪ وزنی سیمان بوده است.



شکل ۱۰. نسبت مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل.

۲.۵. نتایج به دست آمده با استفاده از آزمون "محفظه‌ی استوانه‌یی"

و اندازه‌گیری درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

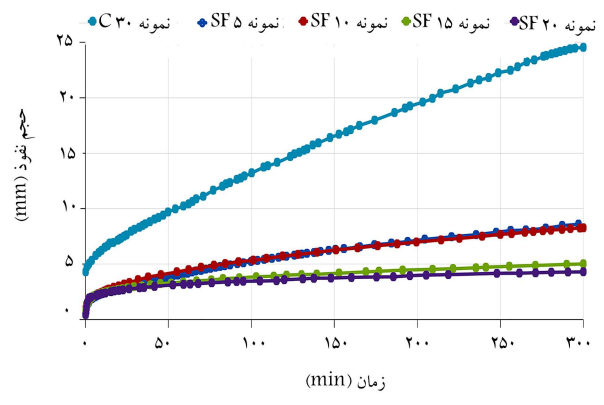
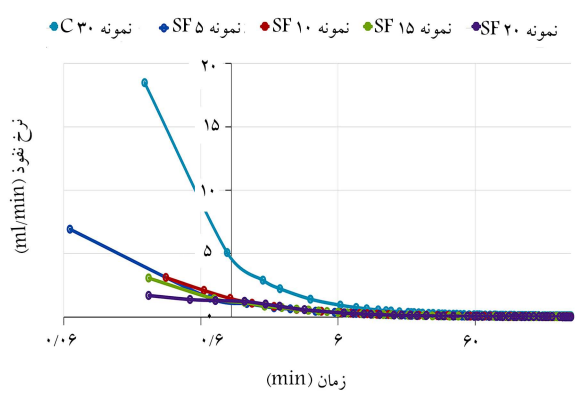
نتایج مربوط به آزمایش‌های "محفظه‌ی استوانه‌یی" و اندازه‌گیری درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌های ۷ روزه در جدول ۹ ارائه شده است. شکل‌های ۱۱ الی ۱۴، نیز تغییرات حجم نفوذ و نرخ نفوذ نمونه‌های ساخته شده با گذشت زمان را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌ها بیشتر شده است. همچنین به دلیل اصطکاک داخلی و لزجت آب، نرخ نفوذ آب در نمونه‌ها با افزایش زمان آزمایش کاهش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت رسیده است. برای بهتر نشان دادن نمودار نرخ نفوذ - زمان، محور زمان به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج جدول ۹ و شکل ۱۱، با افزایش مقدار وزنی دوده‌ی سیلیسی، عمق نفوذ، حجم آب نفوذ کرده، متوسط نرخ نفوذ، درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و ضرایب نفوذپذیری و انتشار نسبت به نمونه‌ی کنترل کاهش یافته‌اند. برای مثال ضرایب نفوذپذیری نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی در درصد‌های وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۶۷٫۳، ۷۷٫۳۴، ۸۰٫۸۵ و ۸۶٫۸۲ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل کاهش یافته‌اند. بنابراین با توجه به نتایج مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه‌ی حاوی دوده‌ی سیلیسی، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن دوده‌ی سیلیسی در جهت کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت فشاری عمل می‌کند. افزایش مقدار خاکستر بادی همانند دوده‌ی سیلیسی موجب کاهش پارامترهای نفوذپذیری در جدول ۹ محاسبه شده است شکل ۱۲، به طوری که ضریب نفوذپذیری در درصد‌های وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به مقدار ۴۸٫۹۶، ۶۰٫۹۳، ۶۵٫۵۳ و ۶۹٫۳۹ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل کاهش یافته است. در مقادیر وزنی یکسان خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیسی، دوده‌ی سیلیسی عملکرد بهتری در کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه داشته است. همچنین مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی کنترل با افزایش مقدار خاکستر بادی کاهش یافته است. نفوذپذیری با افزودن ژئولیت تا درصد وزنی ۱۰٪ کاهش یافته و با افزودن بیشتر ژئولیت، مقدار نفوذپذیری افزایش یافته است شکل ۱۳. به عنوان مثال، مقدار کاهش ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه‌ی کنترل در درصد‌های وزنی ژئولیت برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۶٫۶۳، ۳۶٫۴۰، ۳۶٫۶۸ و ۱۹٫۱۳ درصد بوده است. در درصد‌های وزنی مشابه برای دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی و ژئولیت، ژئولیت عملکرد ضعیف‌تری در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها داشته است. بنابراین ژئولیت در جهت کاهش نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌های ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی کنترل عمل کرده است. همانند ژئولیت، نفوذپذیری نمونه‌های حاوی پودر آهک تا درصد وزنی برابر با ۱۰٪ کاهش پیدا کرده و پس از آن سیر

۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ی کنترل مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۰، مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ها با افزایش مقادیر وزنی ژئولیت، پودر آهک و خاکستر بادی کاهش پیدا کرده است. البته مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های حاوی ژئولیت و پودر آهک با درصد وزنی جایگزینی برابر با ۵٪ نسبت به نمونه‌ی کنترل تغییر چندانی نداشته و تقریباً با مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل برابر بوده است.

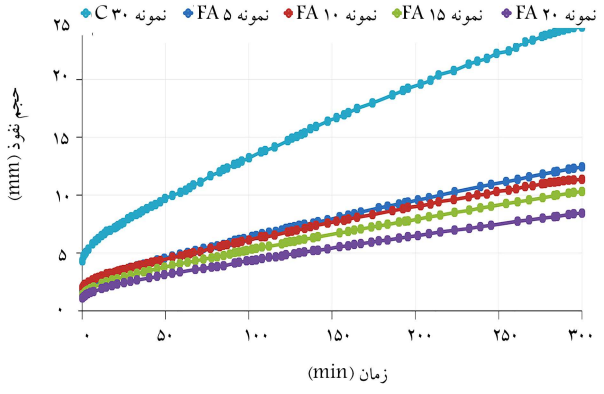
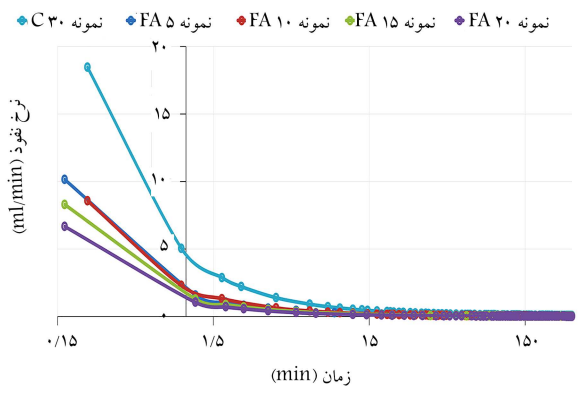
روند اخیر در مورد نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دوده‌ی سیلیسی متفاوت است و مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دوده‌ی سیلیسی در تمامی درصد‌های وزنی جایگزینی نسبت به نمونه‌ی کنترل بیشتر است. مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ها با جایگزینی سیمان با دوده‌ی سیلیسی تا ۱۰٪ وزن آن افزایش و با افزایش بیشتر مقدار دوده‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری کاهش یافته است. افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی کنترل برای درصد‌های وزنی جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۳٫۶، ۲۵٫۶۱، ۹٫۴۹ و ۶٫۰۲ درصد بوده است.

کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی کنترل برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده از ژئولیت در درصد‌های وزنی جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۵٫۰، ۴٫۰۳، ۱۳٫۰۱ و ۱۶٫۸۹ درصد بوده است. مقادیر کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های حاوی خاکستر بادی در درصد‌های وزنی جایگزینی مشابه نسبت به نمونه‌ی کنترل به ترتیب برابر با ۲۲٫۴۵، ۳۲٫۶۰، ۳۶٫۴۳ و ۴۲٫۵۵ درصد بوده است. درصد کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی کنترل در درصد‌های وزنی جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد برای پودر آهک نیز ۱۷٫۱، ۱۴٫۷، ۹٫۱ و ۲۴٫۹۰ درصد محاسبه شدند. بنابراین افزودن دوده‌ی سیلیسی موجب افزایش مقاومت فشاری و افزودن خاکستر بادی، ژئولیت و پودر آهک موجب کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی کنترل می‌شود.

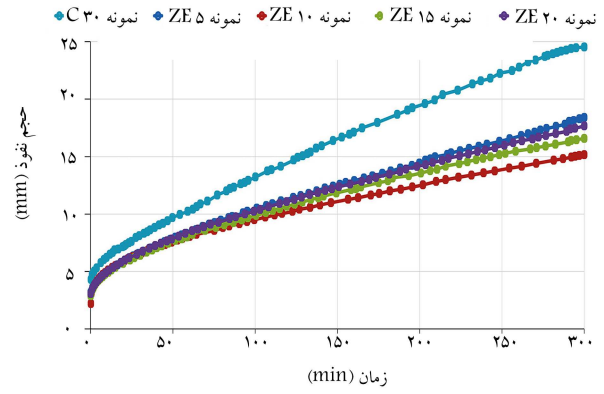
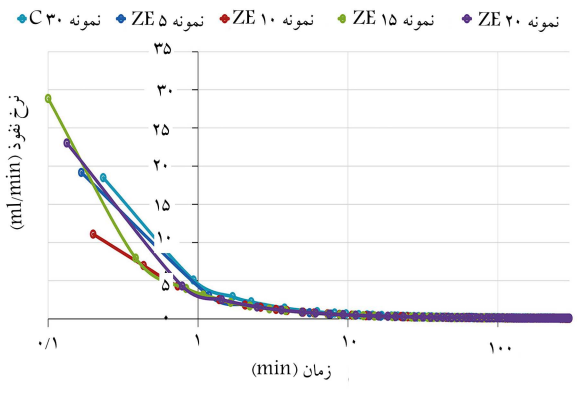
مطابق شکل اخیر، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش سن آنها افزایش یافته است. مقدار بهینه‌ی دوده‌ی سیلیسی نمونه‌های ۲۸ روزه برای رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت فشاری همانند نمونه‌های ۷ روزه‌ی حاوی دوده‌ی سیلیسی برابر با ۱۰٪ است. با افزایش مقدار خاکستر بادی و پودر آهک، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها کاهش یافته است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها برای تمامی مقادیر وزنی پودر آهک نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی کنترل کمتر است. جایگزینی ۵٪ وزن سیمان با خاکستر بادی موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸



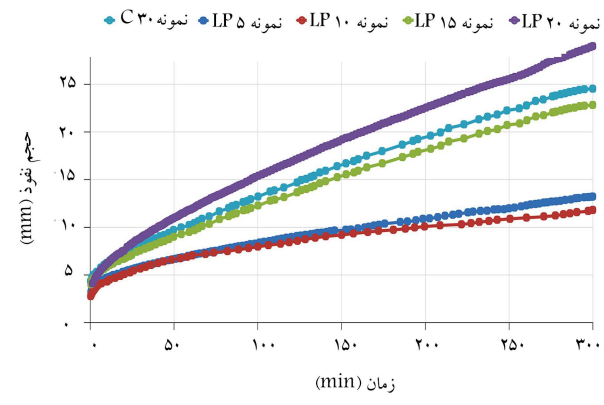
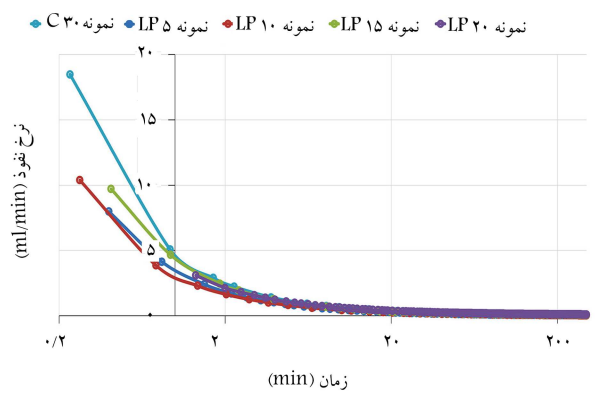
شکل ۱۱. تغییرات حجم و نرخ نفوذ نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی و نمونه‌ی کنترل با گذشت زمان.



شکل ۱۲. تغییرات حجم و نرخ نفوذ نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و نمونه‌ی کنترل با گذشت زمان.



شکل ۱۳. تغییرات حجم و نرخ نفوذ نمونه‌های حاوی زئولیت و نمونه‌ی کنترل با گذشت زمان.



شکل ۱۴. تغییرات حجم و نرخ نفوذ نمونه‌های حاوی پودر آهک و نمونه‌ی کنترل با گذشت زمان.

جدول ۹. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های ۷ روزه با استفاده از آزمون "محفظه‌ی استوانه‌یی" و اندازه‌گیری درصد حجمی منافذ نفوذپذیر.

نمونه	عمق (میلی متر)	حجم آب نفوذ کرده (میلی لیتر)	متوسط نرخ نفوذ (میلی لیتر) بر دقیقه)	درصد حجمی منافذ نفوذپذیر	ضریب نفوذپذیری (میلی متر بر ثانیه)	ضریب انتشار (میلی متر بر ثانیه)
C3°	۷۱	۲۴,۵۳	۰,۱۹۹	۱۵,۶۲	$۶/۵۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۳/۱۸ \times ۱۰^{-۲}$
ZE5	۶۵	۱۸,۴۰	۰,۱۶۴	۴,۱۶	$۵/۴۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۶۵ \times ۱۰^{-۲}$
ZE1°	۵۵	۱۵,۱۶	۰,۱۴۳	۱۲,۲۴	$۴/۱۸ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۰۲ \times ۱۰^{-۲}$
ZE15	۵۹	۱۶,۵۷	۰,۱۵۴	۱۳,۰۹	$۴/۷۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۳۰ \times ۱۰^{-۲}$
ZE2°	۶۳	۱۷,۶۶	۰,۱۶۱	۱۳,۹۷	$۵/۳۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۷۵ \times ۱۰^{-۲}$
SF5	۳۷	۸,۶۳	۰,۰۷۳	۹,۵۳	$۲/۱۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۲}$
SF1°	۳۳	۸,۲۵	۰,۰۷۲	۹,۰۳	$۱/۴۹ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۷/۱۴ \times ۱۰^{-۲}$
SF15	۲۷	۵,۰۰	۰,۰۵۸	۸,۴۱	$۱/۲۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۶/۰۳ \times ۱۰^{-۲}$
SF2°	۲۲	۴,۲۹	۰,۰۵۴	۸,۲۶	$۸/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۴/۱۴ \times ۱۰^{-۲}$
LP5	۵۱	۱۳,۲۲	۰,۱۲۶	۱۱,۳۶	$۳/۶۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۷۷ \times ۱۰^{-۲}$
LP1°	۴۸	۱۱,۸۱	۰,۱۲۲	۱۰,۵۴	$۳/۱۱ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$
LP15	۶۸	۲۲,۸۲	۰,۱۵۴	۱۵,۱۴	$۵/۸۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۸۳ \times ۱۰^{-۲}$
LP2°	۷۵	۲۹,۰۰	۰,۲۰۱	۱۶,۳۶	$۷/۲۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۳/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$
FA5	۴۶	۱۲,۴۳	۰,۰۹۳	۱۰,۷۷	$۳/۳۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۶۲ \times ۱۰^{-۲}$
FA1°	۴۴	۱۱,۶۶	۰,۰۹۰	۱۰,۳۹	$۲/۵۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲}$
FA15	۴۱	۱۰,۳۱	۰,۰۷۲	۹,۹۵	$۲/۲۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۲}$
FA2°	۳۳	۸,۴۳	۰,۰۵۸	۹,۲۲	$۲/۰۱ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۹/۶۷ \times ۱۰^{-۲}$

۳.۵. رابطه‌ی بین ضرایب انتشار و نفوذپذیری با سایر پارامترها

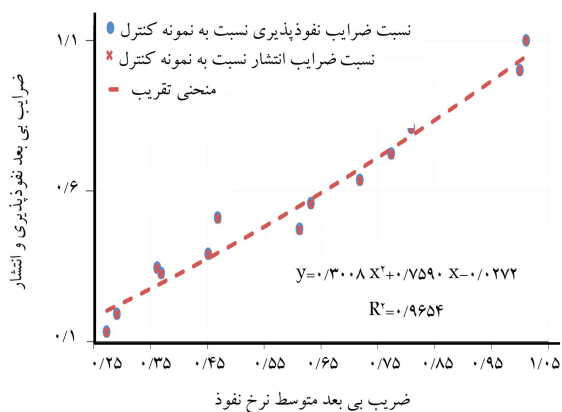
در شکل‌های ۱۵ الی ۱۹، مقادیر ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار نمونه‌ها (ضرایب ذکر شده بر اساس روابط ۵ و ۱۷ محاسبه شده‌اند) در برابر مقادیر ضرایب بی‌بعد مقاومت فشاری، عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌ها ترسیم و با استفاده از رگرسیون توسط توابع مختلف، روابط بین آنها بررسی شده است. ضرایب بی‌بعد هر پارامتر از تقسیم آن پارامتر به مقدار متناظر در نمونه‌ی کنترل به دست می‌آیند. از توابع درجه‌ی ۱، درجه‌ی ۲، توانی، لگاریتمی و نمایی برای تقریب روابط استفاده شده و بهترین تابع از میان توابع مورد استفاده بر اساس ضریب همبستگی به دست آمده برای تعیین رابطه‌ی بین متغیرها استفاده شده است.

این تذکر لازم است که از مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های ZE5°، SF1°، LP15 و FA2° برای به دست آوردن روابط بین ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب بی‌بعد عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر استفاده نشده است تا دقت روابط به دست آمده بررسی شود. این روابط با استفاده از رگرسیون مقادیر مربوط به سایر نمونه‌ها به دست آمده و با جایگذاری مقادیر مربوط به نمونه‌های ZE5°، SF1°، LP15 و FA2° در روابط به دست آمده، دقت آنها ارزیابی شده است.

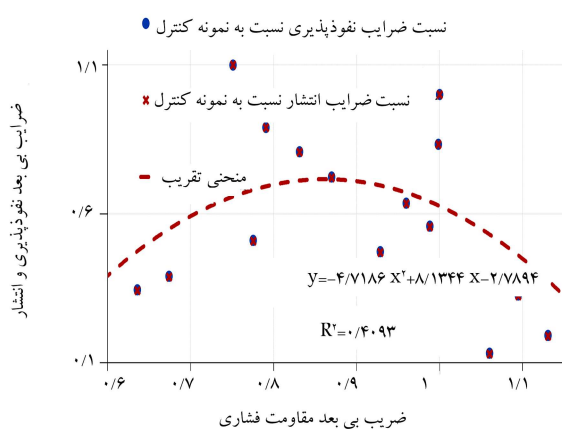
مطابق شکل‌های ۱۵ الی ۱۸، رابطه‌ی بین ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب بی‌بعد عمق نفوذ، حجم نفوذ، درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و متوسط نرخ

صعودی داشته است شکل ۱۴. با این تفاوت که در درصد وزنی ۲۰٪، مقدار نفوذ آب نسبت به نمونه‌ی کنترل بیشتر شده است. افزایش پودر آهک در درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، موجب کاهش ضریب نفوذپذیری به مقدار ۴۴/۱۲، ۵۲/۶۹ و ۱۱/۰ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل شده است. در درصد وزنی ۲۰٪، پودر آهک موجب افزایش ۹/۹۲٪ ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه‌ی کنترل شده است. بنابراین جز در درصد وزنی ۲۰٪، در سایر درصد‌های وزنی مورد استفاده، نفوذپذیری نسبت به نمونه‌ی کنترل کاهش یافته است. همچنین افزودن پودر آهک باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی کنترل در پژوهش حاضر شده است.

مواد افزودنی معدنی بسته به ترکیب‌های شیمیایی آنها به دو صورت فیزیکی و شیمیایی در هیدراسیون تأثیرگذار هستند.^[۱۹] جنبه‌ی شیمیایی مربوط به واکنش‌های سیلیسی یا سیلیسی - آلومینیومی و آهک ناشی از هیدراتاسیون سیمان است، که خاصیت پرکنندگی داشته و موجب کاهش منافذ بزرگ و کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن شده است.^[۲۰-۲۱] اثر فیزیکی نیز شامل اثر پراکنندگی ذرات افزودنی، اثر جایگزینی سیمان (رقیق‌کنندگی) و اثر تغییر در توزیع اندازه‌ی ذرات است. در مورد دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت اثر شیمیایی و در مورد پودر آهک آثار فیزیکی بیشتری تأثیر را در کاهش مقدار و اندازه‌ی منافذ و در نتیجه کاهش نفوذپذیری دارند. افزایش نفوذپذیری با افزودن بیشتر زئولیت و پودر آهک (۱۰٪ وزن سیمان) را می‌توان به تشکیل توده‌ی ذرات مذکور و افزایش مقدار منافذ در بتن و همچنین اثر رقیق‌کنندگی توجیه کرد.



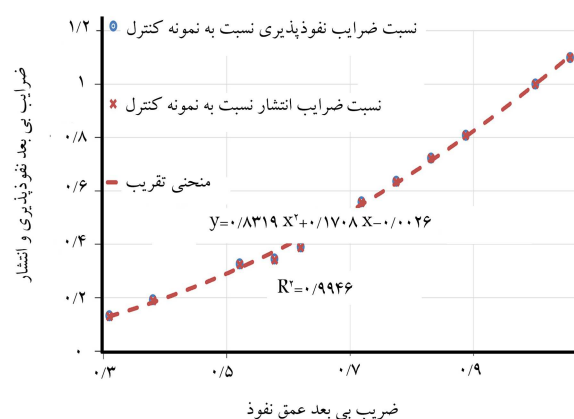
شکل ۱۸. رابطه‌ی بین ضرایب‌های بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضریب بی‌بعد متوسط نرخ نفوذ برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی ساخته شده با استفاده از مواد مختلف.



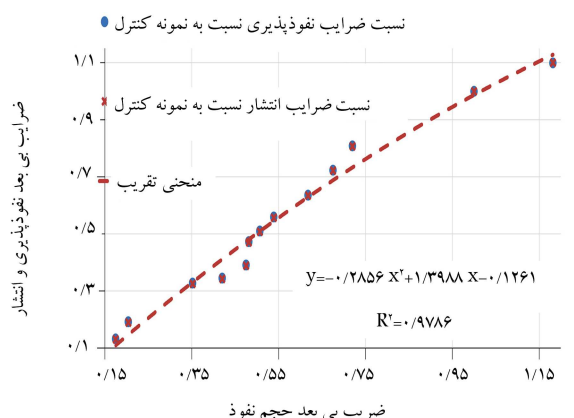
شکل ۱۹. رابطه‌ی بین ضرایب‌های بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضریب بی‌بعد مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی ساخته شده با استفاده از مواد مختلف.

تقریب روابط بین متغیرها در جدول ۱۰ و قدرمطلق درصد خطای حاصل از تقریب متغیرهای اخیر با استفاده از توابع ذکر شده برای نمونه‌های ZE5، SF15، LP15 و FA20 نیز مطابق جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. مطابق جدول ۱۱، قدرمطلق درصد خطای حاصل در بیشتر موارد کوچک‌تر از ۱۵٪ به دست آمده است، که بیانگر دقت مطلوب تابع درجه‌ی ۲ در پیش‌بینی روابط بین ضرایب بی‌بعد ذکر شده است. مطابق شکل ۱۹، به دلیل پراکندگی بسیار بالای نتایج به دست آمده، تابعی با دقت مطلوب جهت تقریب رابطه بین ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب بی‌بعد مقاومت فشاری وجود ندارد. دقیق‌ترین تابع جهت تقریب رابطه‌ی اشاره شده از میان توابع ذکر شده، تابع درجه‌ی ۲ با ضریب همبستگی برابر با ۰/۴۰۹۳ است. ضریب همبستگی به دست آمده بیانگر دقت پایین تابع درجه‌ی ۲ در تقریب رابطه بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار با مقاومت فشاری است. عدم وجود رابطه‌ی با دقت مطلوب جهت تقریب رابطه بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار با مقاومت فشاری را می‌توان به وسیله‌ی روند تغییرات این متغیرها در نمونه‌های ۷ روزه‌ی حاوی افزودنی‌ها توجیه کرد.

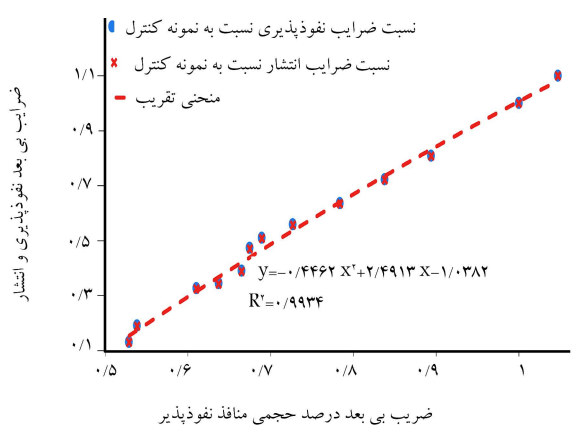
با افزایش درصد وزنی دوده‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری افزایش یافته و نفوذپذیری کاهش پیدا کرده است. با افزایش درصد وزنی خاکستر بادی، نفوذپذیری و مقاومت فشاری کاهش یافته است. در مورد زئولیت و پودر آهک نیز مقاومت



شکل ۱۵. رابطه‌ی بین ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضریب بی‌بعد عمق نفوذ برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی ساخته شده با استفاده از مواد مختلف.



شکل ۱۶. رابطه‌ی بین ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضریب بی‌بعد حجم نفوذ برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی ساخته شده با استفاده از مواد مختلف.



شکل ۱۷. رابطه‌ی بین ضرایب‌های بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضریب بی‌بعد درصد حجمی منافذ نفوذپذیر برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه‌ی ساخته شده با استفاده از مواد مختلف.

نفوذ با استفاده از تابع درجه‌ی ۲ با ضرایب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۹۹۴۶، ۰/۹۷۸۶ و ۰/۹۹۳۴ است. ضرایب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹۶ هستند، که بیانگر دقت بالای تابع درجه‌ی ۲ در تقریب رابطه بین متغیرهای مذکور است. مقادیر ضرایب ثابت چندجمله‌یی‌های درجه‌ی ۲ به دست آمده برای

جدول ۱۰. ضریب‌های همبستگی و ثابت‌های توابع درجه‌ی ۲ استفاده شده جهت تقریب روابط بین متغیرها.

ضریب همبستگی	ضریب‌های ثابت تابع درجه‌ی ۲			نوع رابطه $(Y = aX^2 + bX + c)$ ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار $Y =$
	R^2	c	b	
۰٫۹۹۴۶	۰٫۰۰۲۶	۰٫۱۷۰۸	۰٫۸۳۱۹	ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد عمق نفوذ
۰٫۹۷۸۶	-۰٫۱۲۶۱	۱٫۳۹۸۸	-۰٫۲۸۵۶	ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد حجم آب نفوذ کرده
۰٫۹۹۳۴	-۱٫۰۳۸۲	۲٫۴۹۱۳	-۰٫۴۴۶۲	ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد درصد حجمی منافذ نفوذپذیر
۰٫۹۶۵۴	-۰٫۰۲۷۲	۰٫۷۵۹۰	۰٫۳۰۰۸	ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد متوسط نرخ نفوذ
۰٫۴۰۹۳	-۲٫۷۸۹۴	۸٫۱۳۴۴	-۴٫۷۱۸۶	ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد مقاومت فشاری

جدول ۱۱. قدرمطلق درصد خطای حاصل در پیش بینی ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار با استفاده از توابع تقریب درجه‌ی ۲ به دست آمده برای روابط مختلف.

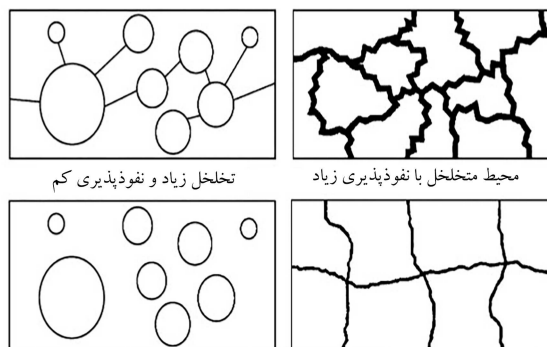
نمونه	رابطه‌ی ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد درصد حجمی منافذ نفوذپذیر	رابطه‌ی ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد متوسط نرخ نفوذ	رابطه‌ی ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد حجم نفوذ	رابطه‌ی ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار - ضریب بی بعد عمق نفوذ
ZE5	۲٫۴۳	۱۴٫۶۱	۸٫۴۷	۲٫۱۸
SF10	۳۶٫۶۱	۱۵٫۸۳	۳۷٫۹۱	۱۳٫۲۷
LP15	۶٫۲۲	۵٫۶۵	۴٫۳۹	۳٫۹۴
FA20	۴۴٫۵۷	۱۱٫۹۱	۵٫۰۱	۱۶٫۰۳

نفوذپذیری خواهد شد. همچنین نفوذپذیری تابعی از ریزساختار، نحوه‌ی ارتباط و پیوستگی منافذ است. در صورتی که مقاومت فشاری یک نمونه‌ی بتنی به شدت تحت تأثیر مقاومت ناحیه‌ی انتقال است. تأثیرپذیری نفوذپذیری و مقاومت فشاری از عوامل متفاوت دلیل دیگری بر عدم وجود رابطه‌ی دقیق بین دو متغیر مذکور است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رابطه‌ی بین ضرایب نفوذپذیری و انتشار، که به ترتیب با استفاده از قانون دارسی و معادله‌ی انتشار به دست آمده‌اند، با عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ، درصد حجمی منافذ نفوذپذیر و مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر وزنی مختلف دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که:

۱. نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه‌ی حاوی دوده‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی کنترل دارند. با جایگزینی سیمان با دوده‌ی سیلیسی تا ۱۰٪ وزنی آن، مقاومت فشاری افزایش و با افزایش بیشتر دوده‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری کاهش یافته است. بنابراین مقدار بهینه‌ی دوده‌ی سیلیسی برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری برابر با ۱۰٪ وزن سیمان است.
۲. نمونه‌های ۷ روزه‌ی حاوی خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک در تمام درصد‌های وزنی، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترل دارند. با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری آنها نیز افزایش می‌یابد. مقدار بهینه‌ی زئولیت در نمونه‌های ۲۸ روزه برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری بیشینه برابر با ۱۵٪ وزن سیمان است. با افزایش مقدار خاکستر بادی و پودر آهک در نمونه‌های ۲۸ روزه، مقاومت



شکل ۲۰. نمونه‌های دارای تخلخل و نفوذپذیری متفاوت. [۲۴]

فشاری با افزایش مقدار وزنی مواد ذکر شده کاهش یافته است؛ در صورتی که نفوذپذیری ابتدا روندی نزولی داشته و با گذر از درصد وزنی ۱۰٪، مقدار آن افزایش یافته است. بنابراین می‌توان بیان کرد که روند تغییرات نفوذپذیری و مقاومت فشاری بسته به نوع ماده‌ی مصرفی در ساخت نمونه‌های بتنی متفاوت است و این تفاوت باعث عدم وجود رابطه‌ی دقیق بین ضرایب بی بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب بی بعد مقاومت فشاری می‌شود.

نمونه با مقاومت فشاری بیشتر الزاماً نفوذپذیری کمتری ندارد. مقاومت یک نمونه با تخلخل کل آن (منافذ باز و بسته)، که شامل تمامی منافذ موجود در نمونه است، در ارتباط است. در صورتی که نفوذپذیری یک نمونه با مقدار تخلخل مؤثر که منافذ قابل نفوذ (منافذ باز) توسط مایع را شامل می‌شود، رابطه دارد. مطابق شکل ۲۰، در یک نمونه با تخلخل بیشتر و در نتیجه مقاومت کمتر ممکن است ارتباط میان منافذ بزرگ موجود در نمونه به دلیل آثار فیزیکی و شیمیایی مواد افزودنی قطع شود، و در نتیجه با وجود تخلخل کل بیشتر منجر به کاهش تخلخل مؤثر و در نتیجه کاهش

نفوذپذیری برابر با 10% وزن سیمان است. نفوذپذیری نمونه‌های حاوی پودر آهک با درصد‌های وزنی برابر با 5% ، 10% و 15% درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل کمتر است و در درصد وزنی 20% ، مقدار آن از نمونه‌ی کنترل بیشتر است.

۷. تابع درجه‌ی ۲ بیشترین دقت را در تقریب رابطه بین ضرایب‌های بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب‌های بی‌بعد عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نسبت به سایر توابع مورد استفاده در پژوهش حاضر دارد. در تمامی موارد، ضرایب همبستگی بزرگ‌تر از 0.96 به دست آمدند، که بیانگر دقت بالای روابط به دست آمده است. قدرمطلق درصد خطای حاصل در پیش‌بینی ضرایب بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار به دست آمده برای نمونه‌های ZE5، SF10، LP15 و FA20 با استفاده روابط به دست آمده در بیشتر موارد کوچک‌تر از 15% بوده است.

۸. از آن‌جا که رابطه‌ی بین تخلخل کل نمونه‌ها با تخلخل مؤثر آنها وجود ندارد، نمی‌توان تابعی با دقت کافی برای تقریب رابطه بین ضرایب‌های بی‌بعد نفوذپذیری و انتشار با ضرایب بی‌بعد مقاومت فشاری یافت. ممکن است نمونه‌ی با تخلخل کل بیشتر و در نتیجه مقاومت کمتر به دلیل ناپیوستگی و بسته بودن منافذ آن، تخلخل مؤثر و نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه با تخلخل کمتر و مقاومت بیشتر داشته باشد. نفوذپذیری و مقاومت فشاری به ترتیب تابعی از ریزساختار و مقاومت ناحیه‌ی انتقال هستند، که دلیل دیگری برای عدم وجود رابطه‌ی دقیق بین دو متغیر مذکور است.

فشاری کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی 5% ، 10% و 15% درصد زئولیت و 5% خاکستر بادی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی کنترل دارند و در سایر موارد، نمونه‌های 28 روزه‌ی حاوی خاکستر بادی، زئولیت و پودر آهک، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترل دارند.

۳. با گذشت زمان منافذ بیشتری از نمونه‌ها توسط آب پر می‌شود و در نتیجه حجم آب نفوذ کرده بیشتر می‌شود. همچنین به دلیل وجود اصطکاک داخلی و لزجت آب، نرخ نفوذ آب با گذشت زمان کاهش می‌یابد و به یک مقدار ثابت می‌رسد.

۴. با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی و خاکستر بادی، ضرایب نفوذپذیری و انتشار، عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی و خاکستر بادی، نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترل دارند.

۵. با افزودن زئولیت تا 10% وزنی سیمان ضرایب نفوذپذیری و انتشار، عمق نفوذ، حجم نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر کاهش یافته و با افزایش بیشتر آن نفوذپذیری افزایش پیدا کرده است. بنابراین درصد بهینه‌ی زئولیت برای رسیدن به کمترین نفوذپذیری برابر با 10% وزنی سیمان است. در تمامی درصد‌های وزنی استفاده شده در پژوهش حاضر، نفوذپذیری نمونه‌های حاوی زئولیت نسبت به نمونه‌ی کنترل کمتر است.

۶. همانند نمونه‌های حاوی زئولیت، مقدار وزنی پودر آهک برای رسیدن به کمترین

منابع (References)

- Neville, Adam M. "Portland cement, in properties of concrete", 3th Edn., Pitman Pub., London, England, pp. 1-63 (1981).
- Tajik Ghashghaei, H. and Hassani, A. "Investigating the relationship between porosity and permeability coefficient for pervious concrete pavement by statistical modelling", *Materials Sciences and Applications*, **7**(2), pp. 101-107 (2016).
- Li, X., Chen, S., Xu, Q. and et al. "Modeling the three-dimensional unsaturated water transport in concrete at the mesoscale", *Computers & Structures*, **190**, pp. 61-74 (2017).
- Yang, K., Yang, C., Long, A. and et al. "Use of two-pressure-head method to assess water permeability of structural concrete", *Materials Journal*, **115**(1), pp. 65-75 (2018).
- Wang, Q., Banthia, N. and Sun, W. "Water permeability of repair mortars under an applied compressive stress at early ages", *Materials and Structures*, **51**(6), p. 1-11 (2018).
- Amriou, A. and Bencheikh, M. "New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece", *Construction and Building Materials*, **151**, pp. 642-649 (2017).
- Yang, K., Basheer, P.A.M., Magee, B. and et al. "Repeatability and reliability of new air and water permeability tests for assessing the durability of high-performance concretes", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(12), pp. 1-11 (2015).
- Li, X., Xu, Q. and Chen, S. "An experimental and numerical study on water permeability of Concrete", *Construction and Building Materials*, **105**, pp. 503-510 (2016).
- Amriou, A. and Bencheikh, M. "New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece", *Construction and Building Materials*, **151**, pp. 642-649 (2017).
- Taylor, I.L. and Erlin, B. "A proposed simple test method for determining the permeability of concrete", *Journal of the PCA*, **3**(3), pp. 2-7 (1961).
- Collins, J.F., Derucher, J.R. and Korfiaris, G.P. "Permeability of concrete mixtures, part 1: literature review", *Civil Engineering for Practising and Design Engineers*, **5**, pp. 579-638 (1986).
- Arnold, S.R. and Littleton, I. "Investigation into the relationship between aggregate absorption and the permeability of concrete", *Technical note mat. & struct./12*, Dept. of Civil Engineering, Royal Military College of Science, pp.1-18, Shrivenham, UK (1983).

13. Lawrence, C.D. "Permeability and protection of reinforced concrete", *Symposium on Concrete Structures—The Need for Protection. Cement and Concrete Association*, **86**, Wakefield, pp.12, England (1986).
14. Basheer, P.A.M. "The autoclam-a new test for permeability", *Concrete*, **28**(4), pp. 27-29 (1994).
15. Naderi, M. "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 (2010).
16. ASTM C642-06, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2006).
17. Darcy, H. "Chapter III. source du rosoir, in Les fontaines publiques de la ville de dijon", ast Edn., *V. Dalmont*, pp.60-184, Paris, France (1856).
18. ASTM C136-06, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2006).
19. Tokyay, M. "Effects of mineral admixtures on hydration of portland cement", *In Cement and Concrete Mineral Admixtures*, 1st, Edn., pp. 49-74, CRC Press, Boca Raton, USA (2016).
20. Hossain, K.M.A. "Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete", *Cement and Concrete Composites*, **39**(2), pp. 201-210 (2004).
21. Hossain, K.M.A. and Lachemi, M. "Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar", *Cement and Concrete Composites*, **34**(4), pp. 695-702 (2003).
22. Chia, K.S. and Zhang, M.H. "Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete", *Cement and Concrete Research*, **32**(4), pp. 639-645 (2002).