



تأثیر مواد کاهنده نفوذ بر نفوذپذیری و مقاومت بتن با آزمون‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش"

مجید پرهیزکاری، علی صابری ورزنه، محمود نادری*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

کلمات کلیدی:

روش پیچش
محفظه استوانه‌ای
نفوذپذیری
مزوکریت
واترپروف

خلاصه: عوامل آسیب‌زا با نفوذ به داخل بتن باعث کاهش دوام آن می‌شوند. بنابراین آگاهی از میزان نفوذپذیری بتن دارای اهمیت می‌باشد. امروزه مواد افزودنی کاهنده نفوذ بتن به طور گسترده در ساخت انواع سازه‌های بتنی مانند مخازن ذخیره آب استفاده می‌شوند. در این تحقیق، به تأثیر عواملی چون مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، اثر مواد کاهنده نفوذ، سن بتن و همچنین ارتباط مقاومت سطحی و فشاری بتن با نفوذ آب سطحی به داخل بتن پرداخته شده است. نمونه‌های مکعبی بتنی با رده‌های مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال و سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تهیه شده‌اند. در نمونه‌ها، کاهنده‌های نفوذ مانند واترپروف، میکروسیلیس و مزوکریت استفاده شده است. با به کارگیری روش‌های پیچش، محفظه استوانه‌ای و جک بتن شکن اقدام به بررسی مقاومت سطحی، نفوذپذیری و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شده و ارتباط آن‌ها با هم بررسی گردید. همچنین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر مطابق با استاندارد 06-ASTM C642 اندازه‌گیری و از آن به عنوان معیاری برای سنجش نفوذپذیری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین کاهش نفوذ به ترتیب در نمونه‌های بتنی حاوی واترپروف، میکروسیلیس، مزوکریت و بدون افزودنی بوده و مقدار آن از ۵ تا ۲۰ میلی‌لیتر متغیر است. با کاهش نفوذپذیری، مقاومت سطحی از ۶ تا ۱۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری بتن‌ها از ۱۵ تا ۵۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین می‌توان با استفاده از معادله‌های رگرسیونی ارائه شده و به کارگیری هر یک از مؤلفه‌های مقاومت فشاری و سطحی نمونه‌های بتنی، حجم آب نفوذی به درون نمونه‌های بتنی را با دقت مناسبی پیش‌بینی نمود.

۱- مقدمه

نفوذپذیری که به صورت حرکت آب و یا هر سیال دیگری در جسم متخلخل بر اثر اعمال فشار تعریف می‌شود، می‌تواند به عنوان یک عامل تأثیرگذار برای نفوذ عوامل مخرب به بتن عمل کرده و آسیب‌های زیادی به وجود آورد. به همین علت، نفوذپذیری به عنوان عامل مهم و تأثیرگذار برای ارزیابی دوام و استحکام سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. عوامل تأثیرگذار در نفوذپذیری بتن به روش انجام آزمایش و نوع شرایط حاکم بر آزمایش‌ها و همچنین به نوع مصالح مصرفی و نحوه عمل‌آوری و به طور کلی ساختار بتن بستگی دارند. بنابراین سن نمونه، نحوه عمل‌آوری نمونه، نوع و مقدار افزودنی‌ها، اندازه منافذ و ترک‌ها، نحوه ارتباط و پیوستگی ترک‌ها، میزان تخلخل، وضعیت و شرایط ناحیه انتقال، جنس، ابعاد و وزن سنگ‌دانه‌های مصرفی، مواد افزودنی مصرف شده در خمیره سیمان و در نهایت نسبت آب به سیمان از عوامل تأثیرگذار بر نفوذپذیری ناشی

از ترکیبات و ساختار بتن محسوب می‌شوند. مطالعاتی در مورد نفوذپذیری سنگ‌دانه‌ها و بررسی وضعیت سنگ‌دانه‌هایی که توسط خمیره سیمان احاطه شده [۱] و اثر ساختار و جنس سنگ‌دانه‌ها بر روی نفوذپذیری بتن انجام شده است [۲]. ضمناً توجه به نفوذپذیری خمیره سیمان نسبت به سایر قسمت‌های تشکیل دهنده بتن اهمیت بیشتری دارد؛ و اینکه خمیره سیمان با نسبت حجمی زیاد و بسته به نوع مواد تشکیل دهنده درون ساختاری آن می‌تواند در میزان نفوذپذیری ناحیه انتقال سهم بیشتری را داشته باشد. بارگذاری نیز می‌تواند در نفوذپذیری تأثیر داشته باشد [۳].

بنابراین طراحی و ارزیابی سازه صرفاً بر اساس مقاومت، نمی‌تواند الزامات مربوط به دوام سازه را تأمین نماید. از مشکلات مهم و اساسی که معمولاً در سازه‌های بتنی به وجود می‌آید، می‌توان به نفوذ آب به داخل سازه‌های بتنی اشاره کرد [۴]. این مشکل در ارتباط با سازه‌هایی که در نگهداری مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرند از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۵]؛ بنابراین استفاده از مواد کاهنده نفوذ بتن در سازه‌های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

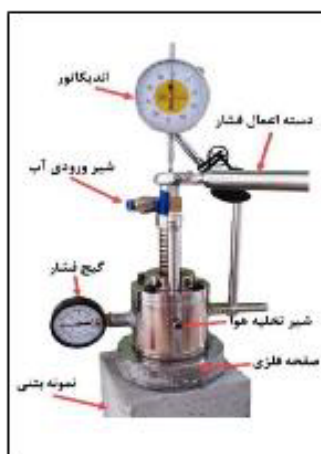


است. مطالعات بسیاری توسط محققین در ارتباط با عوامل مؤثر بر نفوذپذیری بتن انجام شده است. از جمله این عوامل می‌توان به نسبت آب به سیمان [۶]، مقدار سنگ‌دانه‌ها [۷]، اندازه سنگ‌دانه‌ها [۸]، مشخصات ریزساختاری [۹]، نوع افزودنی‌ها [۱۰]، اثر تنش وارده [۱۱] و اثر دما [۱۲] اشاره نمود. این مطالعات نشان می‌دهد که تغییر در نسبت‌های مخلوط بتنی به شدت بر میزان نفوذپذیری بتن تأثیرگذار است. اندازه‌گیری میزان نفوذ آب به داخل بتن به دو روش دبی ثابت و اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن صورت می‌گیرد. در روش دبی ثابت، فشار آب مشخصی به نمونه بتنی وارد می‌شود. هنگامی که دبی جریان نفوذ آب به داخل نمونه بتنی ثابت شد، با اندازه‌گیری آن ضریب نفوذپذیری به دست می‌آید. از آنجا که آزمایش‌های نفوذپذیری با استفاده از روش جریان با دبی ثابت با چالش‌های فراوانی همراه است، در برخی کشورها مانند آلمان آزمایش نفوذ آب تحت فشار، از طریق اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن انجام می‌شود [۱۳]. در این روش فشار آب ثابتی به انتهای نمونه وارد شده و از بیشینه عمق نفوذ آب در نمونه بتنی به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان نفوذپذیری آن استفاده می‌شود. در استاندارد BS EN 12390-8 [۱۴] با تغییرات مختصر، سهولت بیشتری برای انجام آزمایش فراهم شده است. بر اساس این استاندارد نمونه بتنی تحت فشار آبی برابر با ۵ بار قرار گرفته و حداکثر عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری شده و از آن به عنوان شاخصی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن استفاده می‌شود. پیشنهاد شده است که از روش جریان نفوذ آب با دبی ثابت برای نمونه‌های با نفوذپذیری بیشتر و از روش اندازه‌گیری عمق نفوذ آب برای نمونه‌های با نفوذپذیری کمتر استفاده شود [۱۵]. در تحقیق حاضر، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ و واترپروف، میکروسیلیس و مزوکریت با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات بسیاری در زمینه تأثیر مواد افزودنی بر دوام و نفوذپذیری بتن انجام شده است [۲۰-۱۷]. محققین به بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و سنگ‌دانه‌ها به سیمان پرداخته‌اند و دریافته‌اند که با افزایش مقاومت فشاری بتن متخلخل، نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد، اما به تدریج از نرخ این کاهش کاسته می‌شود. همچنین معادله‌ای تجربی برای بیان رابطه بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری ارائه نمودند [۲۱].

از جمله روش‌های در جای اندازه‌گیری مقاومت بتن می‌توان به آزمون "پیچش" [۲۲] اشاره نمود. در این روش میزان اندکی خرابی در سطح بتن ایجاد شده که بسیار ناچیز بوده لذا در زمره آزمون‌های نیمه مخرب

با خرابی جزئی طبقه‌بندی می‌شود؛ و دارای مزایای زیادی از قبیل کاربری وسیع، دقت، سرعت بالا، هزینه بسیار کم و سادگی و عدم نیاز به کارکنان حرفه‌ای و کارآزموده می‌باشد. در تحقیقات قبلی، از آزمون "پیچش" برای تعیین مقاومت فشاری بتن استفاده شده و در آن ضریب همبستگی بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی برابر ۰/۹۲ محاسبه شده است [۲۳ و ۲۴]. نتایج قرائت شده از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف نیز دارای ضریب همبستگی بالایی است به گونه‌ای که در یک تحقیق مقدار ضریب همبستگی حدود ۰/۹۶ به دست آمده است [۲۵]. در تحقیقاتی مشخص گردید که در صورت استفاده از آزمون "پیچش" برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی ملاتهای معمولی و ملاتهای اصلاح شده با پلیمر، ضریب همبستگی بالای ۰/۹۵ بین نتایج آزمون "پیچش" با نتایج حاصل از دستگاه جک بتن‌شکن وجود دارد [۲۷ و ۲۶]. همچنین در برخی تحقیقات، برای صحت‌سنجی آزمون پیچش از مقایسه نتایج حاصل از آزمون پیچش با نتایج حاصل از روش اجزا محدود استفاده گردیده که نتایج حاصله بیانگر دقت بالای این روش می‌باشد [۲۸-۳۰]. در تحقیقی دیگر نیز مشاهده شد که نتایج آزمون پیچش روی بتن‌های مسلح به الیاف پلیپروپیلن دارای همبستگی بالایی با نتایج حاصل از مقاومت فشاری آنها می‌باشد [۳۱ و ۳۲]. همچنین در گذشته از آزمون پیچش جهت ارزیابی مقاومت سطحی بتن خود متراکم استفاده شده است [۳۳ و ۳۴]. در یک تحقیق نیز مشاهده شد که نتایج حاصل از آزمون پیچش با مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف دارای همبستگی بالایی می‌باشد [۳۵]. در تحقیقی دیگر نتایج آزمون پیچش با نتایج آزمون استاندارد کشیدن از سطح مقایسه گردید که همبستگی بالایی به دست آمد.

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر مواد کاهنده نفوذ (شامل میکروسیلیس، واترپروف پودری، مزوکریت) بر نفوذپذیری، مقاومت فشاری و مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی انجام شده است. همچنین اثر تغییر نسبت آب به سیمان و افزایش سن بتن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چهار نوع بتن در حالت‌های مختلف (بدون ماده افزودنی، میکروسیلیس، واترپروف پودری، مزوکریت) در گستره مقاومت ۲۵ الی ۴۰ مگاپاسکال مورد استفاده قرار گرفته است. برای بررسی دقیق‌تر سن بتن و تأثیر زمان گیرش در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مقایسه گردیده و مشخصه‌های مقاومت فشاری و مقاومت سطحی بر اساس کاهش نسبت آب به سیمان در چهار رده مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال و افزایش سن بتن از ۷ تا ۹۰ روز ترسیم شده‌اند. از طرفی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ با استفاده از



ج

اجزای مختلف دستگاه

(c) Various components of the device



ب

آزمایش نفوذپذیری با دستگاه

(b) Penetration testing with the device



الف

دستگاه محفظه استوانه‌ای

(a) "Cylindrical chamber" device

شکل ۱. آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 1. "Cylindrical chamber" test

۲-۲- روش "پیچش"

روش "پیچش" به عنوان یکی از روش‌های تعیین مقاومت در جای بتن توسط نادری در سال ۲۰۰۵ ابداع گردید [۲۲]. این روش، به عنوان روش در جای اندازه‌گیری مقاومت بتن در محل یا آزمایشگاه می‌باشد. جهت اندازه‌گیری لنگر پیچشی اعمال شده به نمونه از پیچش سنج استفاده می‌شود (شکل ۲-الف). جهت انتقال لنگر پیچشی از پیچش‌سنج به بتن از یک استوانه فلزی به قطر ۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود. برای چسباندن مهره‌های فولادی به نمونه‌های بتنی از چسب دوجزئی استفاده شده است. بعد از گیرش چسب، توسط پیچش‌سنج، گشتاور پیچشی اعمال می‌شود تا بتن زیر استوانه گسیخته شود (شکل ۲-ب). خرابی حاصل از انجام آزمون خیلی کم بوده و به سادگی توسط ملات ترمیم می‌شود. (شکل ۲-ج).

با استفاده از رابطه ۱ می‌توان مقدار مقاومت سطحی حاصل از آزمون پیچش را برحسب مگاپاسکال محاسبه نمود.

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (1)$$

روش محفظه استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و 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. در نهایت با کمک نرم‌افزار متلب و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، نمودار سه بعدی ارتباط میان مقاومت سطحی و فشاری با نتایج روش محفظه استوانه‌ای و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر ترسیم گردیده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱- آزمون محفظه استوانه‌ای

روش آزمون "محفظه استوانه‌ای" بدین صورت است که در ابتدا سطح نمونه از هرگونه آلودگی زدوده می‌شود. سپس، یک صفحه فلزی پایه به کمک چسب اپوکسی روی سطح نمونه چسبانده می‌شود. در ادامه، محفظه فشار که شامل گیج اندازه‌گیری فشار و میکرومتر است، بر صفحه فلزی پایه محکم می‌شود. سپس، محفظه کاملاً با آب پر می‌شود. به منظور خروج هوای احتمالی محبوس شده در محفظه دستگاه، یک شیر تخلیه هوا روی آن تعبیه شده است. با چرخاندن اهرم، فشار به مقدار ۵ بار تنظیم می‌شود [۱۴ و ۱۳]. مدت زمان انجام آزمون ۵ ساعت (۳۰۰ دقیقه) بوده و نتایج در فواصل زمانی معین در جداول مشخصی وارد می‌گردد. در شکل ۱ قسمت‌های مختلف دستگاه محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است.



ج

(ج) آسبب ناچیز ناشی از آزمون
(c) Various components of the device



ب

(ب) نحوه قرارگیری آچار روی استوانه
(b) How to place the wrench on the cylinder



الف

(الف) آچار تورکومتر
(a) "twist-off" wrench

شکل ۲. نحوه انجام آزمون پیچش

Fig. 2. How to perform "twist-off" test

که در آن τ مقاومت سطحی، T لنگر پیچشی، C شعاع استوانه فولادی و J ممان قطبی دوم سطح است.

نتایج به دست آمده از آزمون پیچش به عنوان مقاومت سطحی بتن در نظر گرفته میشود. زیرا استوانه فولادی روی سطح بتن چسبانده شده و پس از اعمال لنگر پیچشی، استوانه فولادی از سطح بتن جدا میگردد که با استفاده از معادله فوق میتوان لنگر پیچشی را به مقاومت سطحی تبدیل نمود.

۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام آزمون مقاومت فشاری از جک بتن شکن ۲۰۰ تنی دیجیتالی استفاده شده است. نمونه‌های مکعبی بتنی به ابعاد ۱۰ و ۱۵ سانتی متر زیر جک بتن شکن تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند (شکل ۳). آزمایش‌های مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 [۳۷] انجام شده است.

۲-۴- آزمایش تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر با استفاده از استاندارد ASTM C642-06

تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بر اساس این استاندارد شامل ۴

مرحله است.

۱- ابتدا نمونه را با ترازوی بسیار دقیق وزن کرده و سپس برای تبخیر آب درون آن، در گرم‌خانه در دمایی بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت حداقل ۲۴ ساعت نگهداری می‌شود (شکل ۴-الف). بعد از خارج کردن نمونه‌ها از گرم‌خانه، جهت خنک کردن نمونه‌ها، اجازه داده می‌شود تا دمایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، نزدیک به دمای محیط، کاهش یابد. نمونه مجدداً وزن می‌گردد. اگر دو وزن به دست آمده به هم نزدیک باشند، نمونه کاملاً خشک شده است، در غیر این صورت نمونه باید مجدداً به مدت ۲۴ ساعت دوباره در گرم‌خانه قرار داده شود.

۲- بعد از خشک کردن کامل، نمونه‌ها در داخل آب با دمای حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۴۸ ساعت قرار داده می‌شوند (شکل ۴-ب).
۳- سپس نمونه در داخل دیگ فلزی پر از آب وارد شده و در زمان حدود ۵ ساعت به طور کامل و به صورت مستغرق جوشانده می‌شود (شکل ۴-ج). بعد از جوشاندن، شعله را خاموش کرده و به نمونه فرصت داده می‌شود تا به مدت حداقل ۱۴ ساعت با از دست دادن گرما خنک شده و به دمایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد برسد.



ج
شکستن نمونه‌ها
(c) Break samples



ب
نحوه قرار گرفتن نمونه زیر جک
(b) How to place the sample under the jack



الف
جک بتن شکن
(a) concrete breaker jack

شکل ۳. آزمون مقاومت فشاری

Fig. 3. Compressive strength test



د
اندازه‌گیری وزن ظاهری
(d) Measurement of
apparent weight



ج
جوشاندن نمونه‌ها
(c) Boiling the samples



ب
مغروق ساختن نمونه‌ها
(b) Drowning samples



الف
نمونه‌های قرار گرفته در گرم‌خانه
(a) The samples placed
in the oven

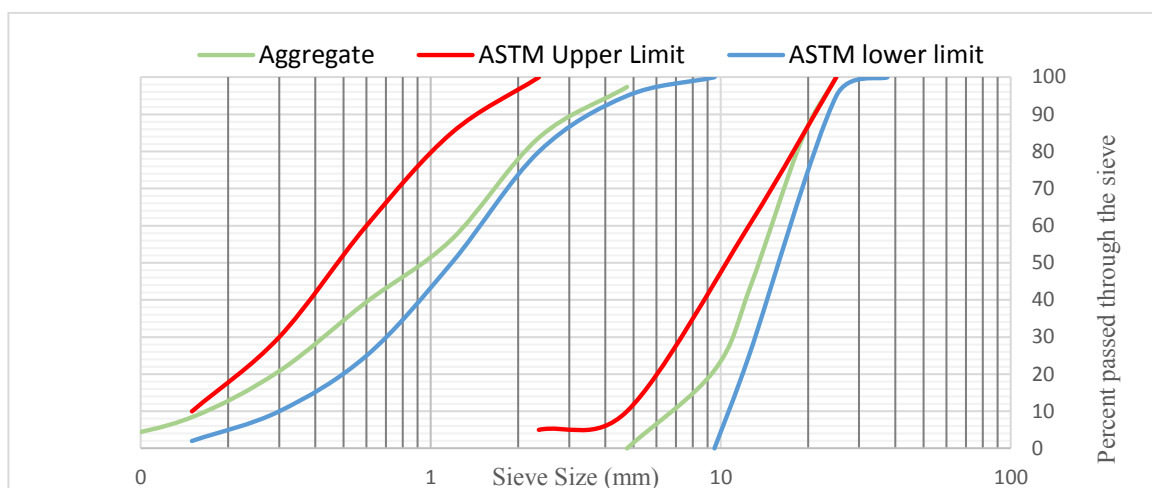
شکل ۴. آزمایش تعیین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

Fig. 4. Test to determine the volume percentage of permeable pores

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ (درصد)

Table 1. Chemical characteristics of type 2 cement (percentage)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Loss on ignition	Alkali as Na ₂ O
۲۰/۲۳	۴/۸۶	۴/۵۲	۶۳/۸۶	۲/۱۴	۰/۲۱	۰/۷۱	۲/۱۲	۱/۲	۰/۲۱



شکل ۵. منحنی‌های دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

Fig. 5. Granulation curves of aggregates

مواد مورد استفاده عبارت‌اند از: سیمان تیپ ۲، شن و ماسه از کارگاه تولید بتن آزادگان، آب آشامیدنی شهری، چسب از نوع رزین اپوکسی، مواد کاهنده نفوذ و فوق روان کننده از نوع پلیکربکسیلات. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی ارائه شده است.

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136 [۳۸] انجام پذیرفت. میزان جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای ASTM C127 [۳۹] و ASTM C128 [۴۰] به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ درصد به دست آمد. چگالی ماسه و شن با سطح خشک و در حالت اشباع به ترتیب برابر ۲۴۶۳ و ۲۵۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب است. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۵ نشان داده شده است.

جهت ساخت نمونه‌ها از روش گام به گام ACI211.1 [۴۱] استفاده گردید. بر اساس روش ذکر شده، برای تعیین مقدار مصالح ابتدا میبایست مقدار روانی بتن را مشخص نمود. با توجه به مبحث نهم مقررات ملی

۴- در ادامه بعد از مستغرق‌سازی و جوشاندن نمونه، آن را با استفاده از یک مقتول سیم در داخل یک سبد توری در داخل آب قرار داده و وزن غوطه‌وری آن در آب تعیین می‌شود (شکل ۴-د).

۳- روش تحقیق

جهت انجام آزمایش نفوذپذیری و پیچش از تعداد ۱۴۴ آزمون مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌مترمکعب و برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از تعداد ۱۴۴ آزمون مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌مترمکعب که در آب-آهک عمل‌آوری شده بودند، استفاده گردید. برای انجام آزمایش نفوذپذیری از حداقل ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط و به ازای هر سن استفاده شده است. آزمایش "پیچش" روی همان نمونه‌های مکعبی نفوذپذیری اعمال گردید و آزمایش مقاومت فشاری نیز بر روی حداقل ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط و به ازای هر سن اعمال شد.

جدول ۲. مشخصات چسب مصرفی برای انجام آزمایش‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش"

Table 2. Specifications of the adhesive used to perform "cylindrical chamber" and "twist-off" tests

نسبت اختلاط	رنگ	مدت خشک شدن	زمان چسبیدن	مقاومت (MPa)
نسبت یک به یک	طوسی	۱۰ ساعت	۹۰ دقیقه	۷۰

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط بتن

Table 3. Specifications of concrete mixing plans

مقاومت فشاری MPa	نام‌گذاری	آب به سیمان	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	وزن مخصوص بتن kg/m ³
۲۵	C25	۰/۵۲	۲۲۶	۴۳۵	۷۲۰	۸۹۵	۲۲۷۶
۳۰	C30	۰/۴۵	۲۲۶	۵۰۲	۷۲۰	۸۳۶	۲۲۸۴
۳۵	C35	۰/۳۹	۲۲۶	۵۷۹	۷۲۰	۷۷۳	۲۲۹۸
۴۰	C40	۰/۳۴	۲۲۶	۶۶۴	۷۲۰	۷۰۰	۲۳۱۰

۴۰ مگاپاسکال می باشد. با توجه به اینکه در اکثر سازه های بتنی در ایران و جهان مقدار مقاومت فشاری بتن در حالت عادی در این رنج می باشد لذا برای اینکه بتوان از نتایج این تحقیق برای کارهای عملی نیز استفاده نمود تصمیم گرفته شد که از ۴ طرح مختلف با مقاومت فشاری بین ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال استفاده گردد.

مواد کاهنده نفوذ از نوع افزودنی‌های داخل بتن و بر مبنای درصدی از سیمان مصرفی می باشد که به شرح ذیل است:

- میکروسیلیس: به عنوان مواد پر کننده بین اجزاء متشکله بتن عمل نموده و نه تنها باعث چسبندگی بین ذرات سیمان می شود بلکه چسبندگی بین سیمان و سنگدانه را نیز افزایش می دهد. رنگ و ظاهر پودر میکروسیلیس مطابق شکل ۶-الف است.

در جدول ۴ مشخصات شیمیایی پودر میکروسیلیس ارائه شده است.

- واترپروف: واترپروف به عنوان یک فیلر ضد آب برای پر نمودن خلل و فرج ریز به همراه مواد افزودنی کاهنده آب جهت کاهش نسبت آب به سیمان است. رنگ و ظاهر پودر واترپروف مطابق شکل ۶-ب است. در جدول ۵ مشخصات شیمیایی واترپروف ارائه شده است.

ساختمان، مقدار روانی بتن برای کارهای معمولی میبایست کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر باشد. لذا در این تحقیق مقدار روانی بتن حدود ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس میبایست با توجه به دانه بندی سنگدانه ها و مقدار اسلامپ بتن، نسبت به اندازه‌گیری مقدار تقریبی آب و هوای بتن اقدام نمود. در ادامه با توجه به استاندارد مذکور می بایست مقدار آب به سیمان را بر اساس مقاومت فشاری اولیه تعیین نمود. به عنوان مثال برای بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال، مقدار آب به سیمان برابر ۰/۴۵ می باشد. حال با توجه به داشتن مقدار آب به سیمان و همچنین مقدار آب، می توان مقدار سیمان را اندازه‌گیری نمود. به عنوان مثال برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال، مقدار سیمان برابر ۵۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب به دست می آید. سپس با استفاده از مقدار مدول نرمی و دانه‌بندی، مقدار درشت دانه‌ها به دست می‌آید. سپس اگر وزن شن و سیمان و آب در یک متر مکعب بتن از وزن مخصوص بتن تازه کم شود، وزن ماسه در یک متر مکعب به دست خواهد آمد.

مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی در جدول ۲ ارائه شده است. اختلاط نمونه‌ها در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق از ۴ طرح مختلف استفاده شده است که دارای مقاومت فشاری بین ۲۵ تا

جدول ۴. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس (درصد)

Table 4. Microsilica chemical properties (percentage)

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

جدول ۵. مشخصات شیمیایی واترپروف

Table 5. Waterproof chemical properties

Li	MnO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	درصد وزنی
۱۸/۱۱	۰/۰۹	۲/۴۲	۰/۶۳	۹/۳۰	۳/۷۰	۴۶/۷۴	۱/۵۸	۳/۴۷	۱۳/۵۰	

جدول ۶. رنگ و ظاهر مواد مصرفی کاهنده نفوذ

Table 6. Color and appearance of penetration reducing consumables

وزن مخصوص (gr/cm ³)	رنگ	نوع
۱/۴	کرم	پودری

۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- تأثیر مواد کاهنده نفوذ بر مقاومت سطحی بتن در سنین مختلف با توجه به نمودارها، در طرح اختلاطهای مختلف از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال مقدار نسبت آب به سیمان کاهش یافته و موجب افزایش مقاومت سطحی بتن می‌شود. از طرفی با تغییر سن بتن از ۷ روز به ۹۰ روز میزان مقاومت سطحی نیز افزایش داشته که در بیشتر نمونه‌ها به طور یکنواخت این افزایش وجود دارد. در شکل ۷، در یک سن مشخص از حالت بدون افزودنی، در مواد مزوکریت، میکروسیلیس و واترپروف افزایش مقاومت مشاهده شده است و با افزایش سن بتن از ۷ تا ۹۰ روز و در تمام موارد استفاده از مواد کاهنده نفوذ، مقدار مقاومت سطحی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. میزان تغییرات مقاومت سطحی در نمونه‌ها از حدود ۶ مگاپاسکال در نمونه‌های ۷ روزه فاقد

- مزوکریت: ماده مزوکریت گونه‌ی پیشرفته‌ای از مواد افزودنی بتن است که برای بهبود مشخصات مکانیکی و دوام انواع بتن‌های آماده، در محل اجرا به بتن افزوده می‌شود. این ماده علاوه بر بالا بردن اسلامپ (افزایش کارایی) باعث کاهش جذب آب و رفع نفوذپذیری بتن سخت شده می‌گردد. در جدول ۶ مشخصات ماده مزوکریت ارائه شده است. رنگ و ظاهر مواد مصرفی کاهنده نفوذ مطابق شکل ۶ می‌باشد.

بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۴۲] و ASTM C494 [۴۳] و توصیه شرکت‌های تولید کننده طبق جدول شماره ۴ مقادیر مصرفی مواد کاهنده نفوذ بر اساس درصد وزنی سیمان مصرفی در نمونه‌ها استفاده شده است.



شکل ۶. رنگ و ظاهر مواد مصرفی کاهش دهنده نفوذ

Fig. 6. Color and appearance of penetration reducing consumables

جدول ۷. نسبت‌های وزنی افزودنی‌های کاهش دهنده نفوذ (بر اساس درصد وزنی سیمان مصرفی)

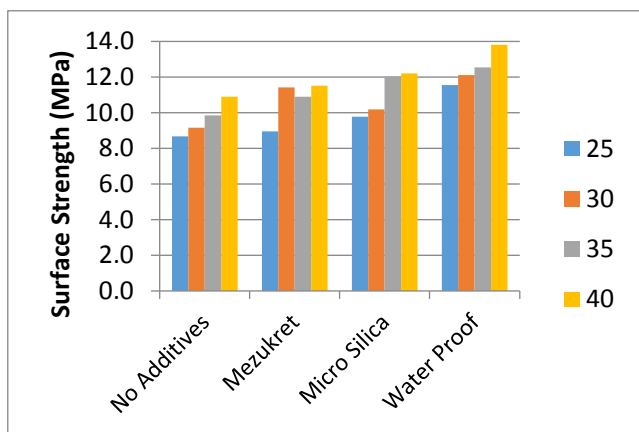
Table 7. Weight ratios of penetration reducing additives (based on the weight percentage of cement used)

میکروسیلیس	مزوکريت	واترپروف	فوق روان کننده
۱۰	۶	۲	۰/۸

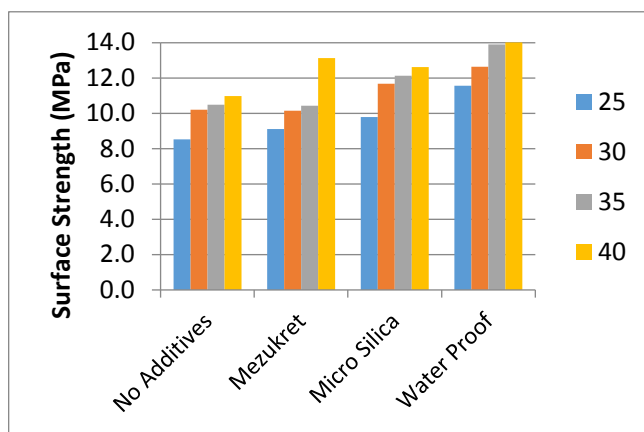
۴-۲- تأثیر مواد کاهش دهنده نفوذ بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف با توجه به شکل ۸ و بر اساس طرح اختلاط در چهار رده مقاومتی، افزایش مقدار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان، باعث ایجاد بیشترین مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی کاهش دهنده نفوذ و کمترین مقاومت فشاری در بتن‌های بدون افزودنی می‌شود. روند تغییرات در مقاومت فشاری نمونه‌ها مشابه مقاومت سطحی بوده و در بازه‌ی ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال متغیر است. بیشترین مقدار در نمونه‌های حاوی واترپروف و کمترین مقدار در نمونه‌های فاقد افزودنی است.

از طرفی با گذشت زمان و افزایش سن بتن از ۷ به ۲۸ و ۹۰ روز، شاهد

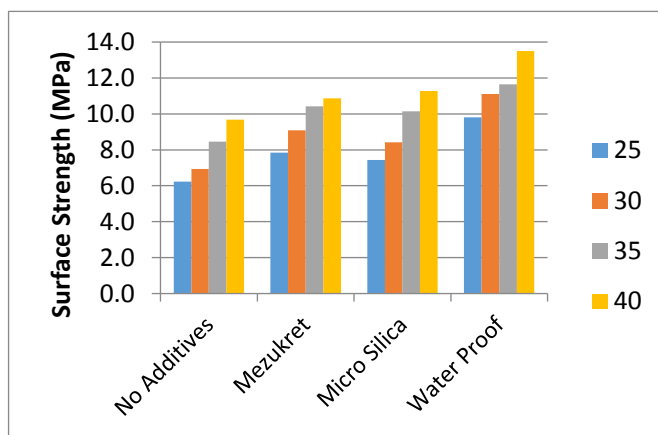
افزودنی، تا ۱۵ مگاپاسکال در نمونه‌های ۹۰ روزه حاوی واترپروف می‌باشد. ضمناً استفاده از واترپروف به میزان بسیار خوبی افزایش مقاومت سطحی را به دنبال داشته است. مواد کاهش دهنده نفوذ به همراه روان کننده نقش موثری در کاهش نفوذپذیری بتن دارند. ذرات ریز مواد کاهش دهنده نفوذ در نقش پر کننده حرکت کرده و به سوی فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌های درشت‌تر حرکت می‌کنند. این کار موجب پر شدن فضای خالی بین آن‌ها شده و به این ترتیب، نمونه نفوذناپذیرتر شده و مقاومت بیشتری در بتن حاصل می‌شود. به طور کلی، هر چه تعداد و ابعاد فضای خالی درون بتن کمتر باشد، مقاومت آن بیشتر خواهد بود.



(ب) مقاومت سطحی ۲۸ روزه
(b) Surface resistance of 28 days



(الف) مقاومت سطحی ۹۰ روزه
(a) Surface resistance of 90 days



(ج) مقاومت سطحی ۷ روزه
(c) Surface resistance of 7 days

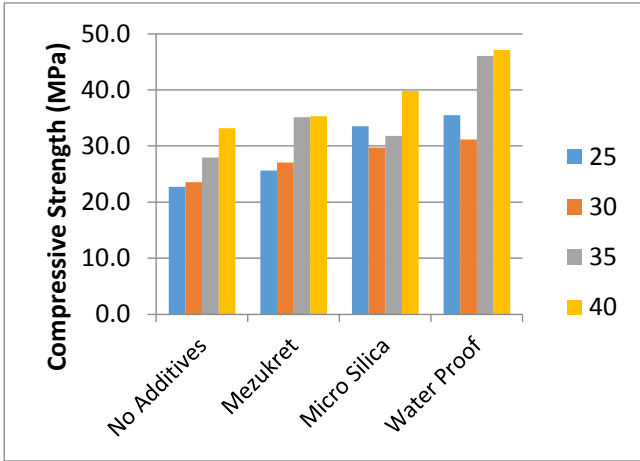
شکل ۷. نتایج حاصل از آزمون "پیچش"

Fig. 7. The results of the "twist-off" test

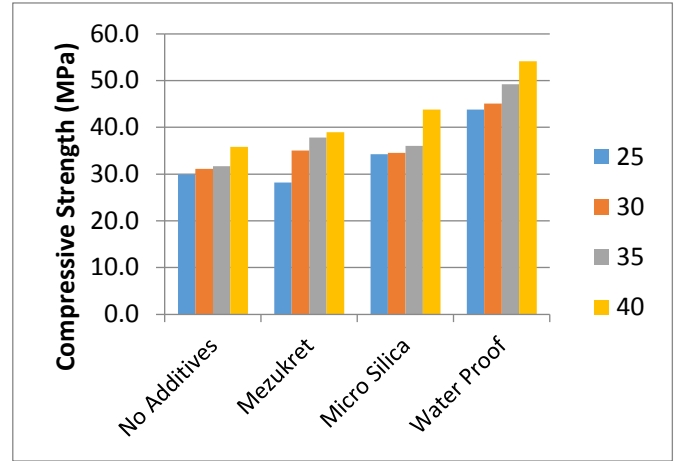
به تدریج تبخیر می‌شود و فضاهای خالی را در بتن برجای می‌گذارد که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری بتن است. همچنین، برای یک نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش سن بتن، به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و پر شدن فضاهای خالی با محصولات این واکنش، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ رابطه بین مقاومت‌های فشاری و سطحی نمونه‌های بتنی

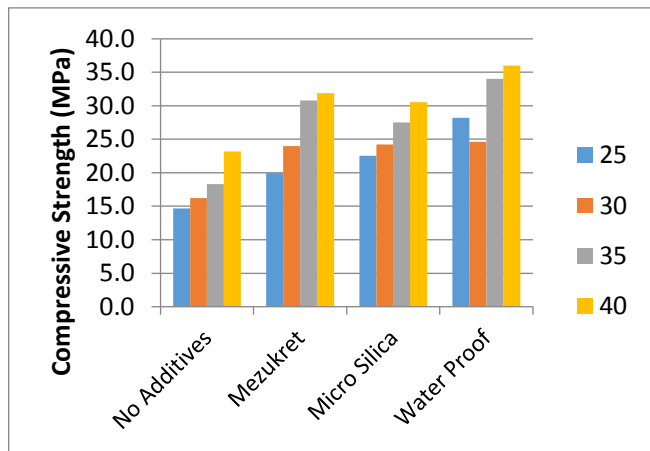
افزایش مقاومت فشاری و سطحی نمونه‌های بتنی هستیم (شکل ۹). با بررسی نمودارها دیده می‌شود که در یک سن مشخص، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار آب بیشتری به ازای واحد وزن سیمان در مخلوط بتن وجود دارد. در یک حجم ثابت از بتن‌ریزی تعداد حفره‌های آب در مورد مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی بیشتری وجود خواهد داشت. این آب محبوس شده



(ب) مقاومت فشاری ۲۸ روزه
(b) Compressive strength of 28 days



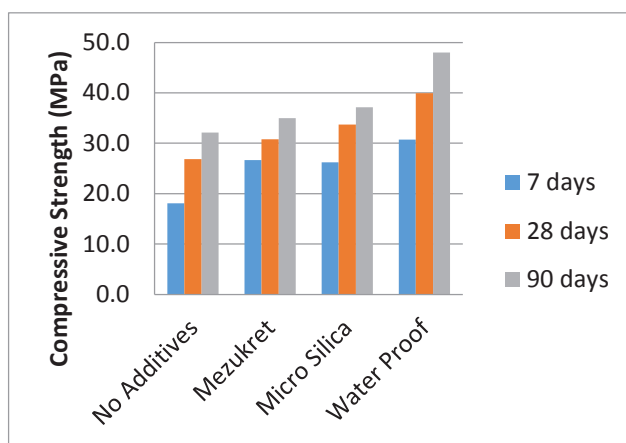
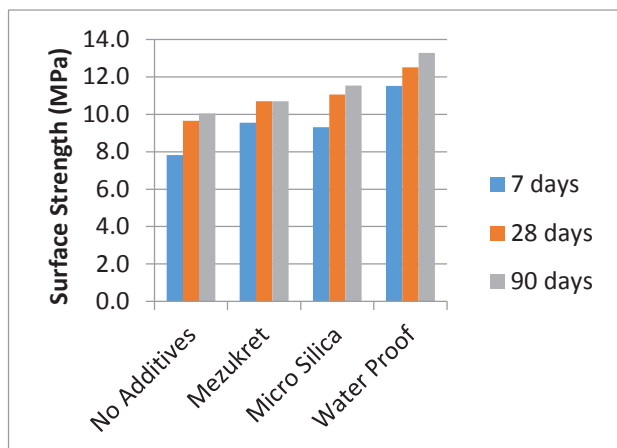
(الف) مقاومت فشاری ۹۰ روزه
(a) Compressive strength of 90 days



(ج) مقاومت فشاری ۷ روزه
(c) Compressive strength of 7 days

شکل ۸. نتایج حاصل از آزمون "مقاومت فشاری"

Fig. 8. The results of the "compressive strength" test

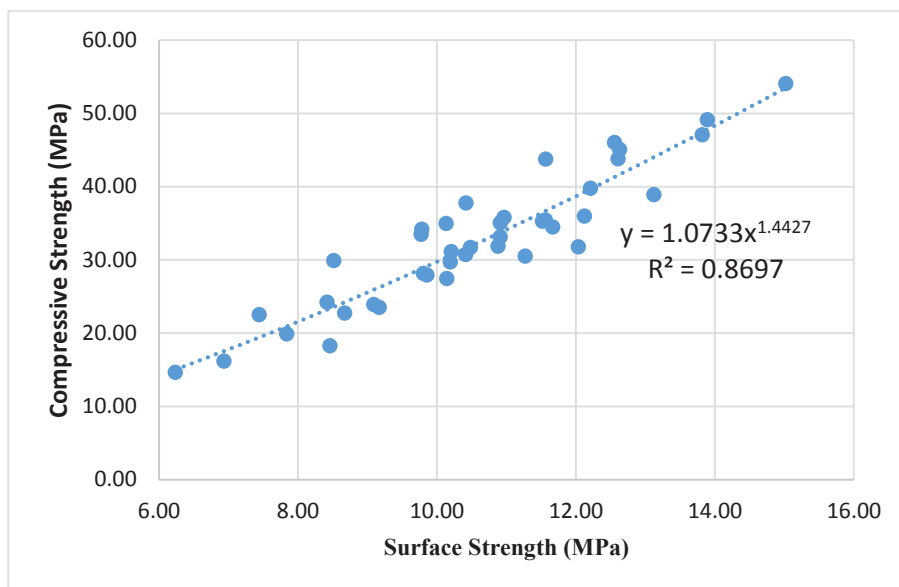


(ب) متوسط مقاومت سطحی نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز
 (b) Average surface resistance of samples at the age of 7, 28 and 90 days

(الف) متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز
 (a) Average compressive strength of samples at the age of 7, 28 and 90 days

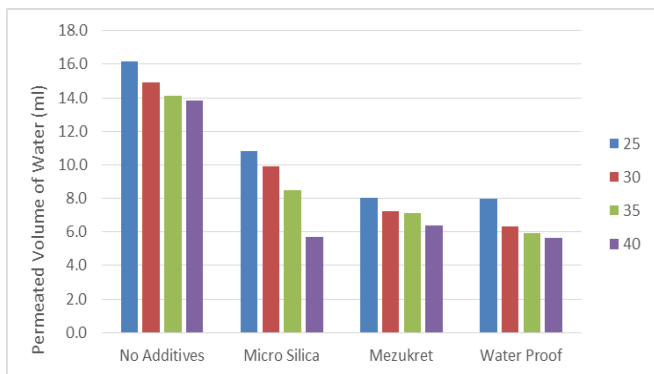
شکل ۹. نتایج حاصل از میانگین مقاومت آزمون "مقاومت فشاری" و "پیچش" در سنین مختلف

Fig. 9. The results of the average strength of "compressive strength" and "twist-off" tests at different ages

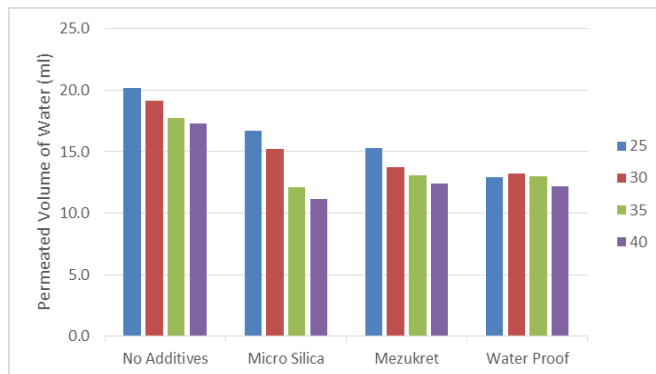


شکل ۱۰. رابطه میان "مقاومت فشاری" و نتایج حاصل از روش "پیچش"

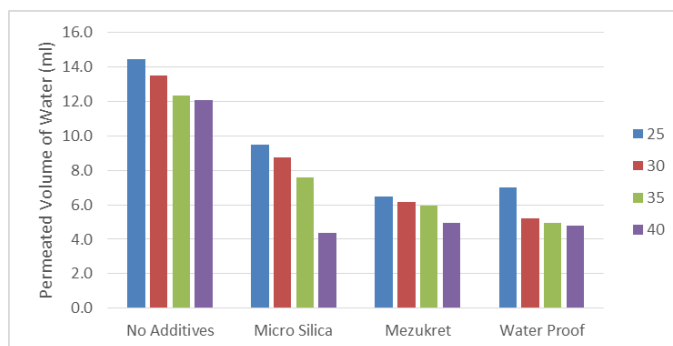
Fig. 10. The relationship between "compressive strength" and the results of the "twist-off" method



(ب) نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز
(b) Permeability of samples at the age of 28 days



(الف) نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۷ روز
(a) Permeability of samples at the age of 7 days



(ج) نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۹۰ روز
(c) Permeability of samples at the age of 90 days

شکل ۱۱. نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" برای انواع مواد کاهنده

Fig. 11. The relationship between "compressive strength" and the results of the "twist-off" method

افزودنی و با افزودنی‌های میکروسیلیس، مزوکریت و واترپروف در ادامه روی نمودارها رسم شده است. با توجه به شکل ۱۱ با افزایش سن نمونه‌های بتنی، به دلیل پیشرفت فرآیند هیدراسیون، از نفوذپذیری نمونه‌های بتنی کاسته شده است. در شکل ۱۱-الف حجم آب نفوذی برای نمونه‌های بتنی ۷ روزه از مقدار حداکثر ۲۰ میلی‌لیتر برای نمونه‌های فاقد افزودنی شروع شده و در نمونه حاوی واترپروف به ۱۳ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد. در ادامه، پس از ۲۸ روز، این تغییرات برای نمونه فاقد افزودنی از ۲۰ به ۱۶ میلی‌لیتر و

بررسی شده و با ترسیم نمودار و محاسبه تابع مربوطه می‌توان ارتباط نزدیکی میان مقاومت سطحی و فشاری برقرار نمود. لذا می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت سطحی با روش "پیچش" مقدار مقاومت فشاری بتن‌های حاوی مواد افزودنی کاهنده نفوذ را محاسبه نمود.

۳-۴- تأثیر مواد کاهنده نفوذ بر نفوذپذیری بتن در سنین مختلف
مقادیر حجم آب نفوذی برای نمونه‌های بتنی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بدون

برای نمونه حاوی واترپروف از ۱۳ به کمتر از ۶ میلی لیتر کاهش پیدا می کند (شکل ۱۱-ب).

پس از ۹۰ روز مقدار تغییرات کاهش نفوذپذیری بسیار کمتر شده و با شیب ملایم برای نمونه فاقد افزودنی از ۱۶ به ۱۴ میلی لیتر و برای نمونه های حاوی واترپروف از ۶ به ۵ میلی لیتر کاهش می یابد (شکل ۱۱-ج).

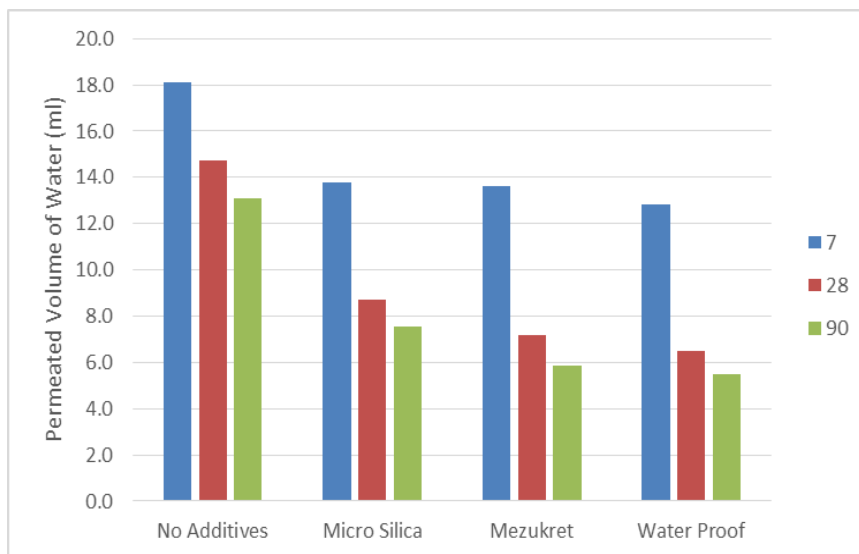
به طور کلی مقدار نفوذپذیری در نمونه ها از حالت فاقد افزودنی، تا حالت استفاده از مواد کاهنده نفوذ کاهشی بوده و روند کاهش نفوذپذیری در نمونه های حاوی واترپروف بیشتر از سایر نمونه ها می باشد. همچنین، میزان کاهش نفوذپذیری در اثر به کارگیری مواد افزودنی کاهنده نفوذپذیری به شدت تحت تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی قرار دارد و این مواد عملکرد مؤثرتری از خود برای کاهش نفوذپذیری در نسبت های آب به سیمان بیشتر نشان می دهند. این موضوع در نمونه های حاوی میکروسیلیس مشهود است اما در نمونه های فاقد افزودنی این روند بسیار کندتر دیده می شود. در شکل ۱۲ متوسط نفوذپذیری نمونه ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. باید این نکته را در نظر داشت که میزان نفوذپذیری خمیره سیمان با پیشرفت فرآیند هیدراسیون آن تغییر می کند. در خمیره تازه، جریان آب به وسیله اندازه، شکل و غلظت ذرات اولیه سیمان کنترل می شود. با پیشرفت هیدراسیون نفوذپذیری به شدت کاهش می یابد زیرا که حجم خالص ژل (شامل منافذ موجود در ژل) تقریباً دو برابر حجم سیمان هیدراته نشده است. لذا ژل تدریجاً بعضی از فضاهای اولیه را که به وسیله آب پر شده بود اشغال می کند. مواد کاهنده نفوذ به صورت یک فیلر ضد آب باعث پر شدن تمام خلل و فرج ریز در ساختار بتن شده و به همراه مواد افزودنی کاهنده آب مصرفی مثل روان کننده ها منجر به کاهش نسبت آب به سیمان شده، و بر نفوذپذیری و مقاومت بتن اثر می گذارند. اگر نفوذپذیری سنگ دانه ها خیلی کم باشد وجود این نوع مواد در بتن باعث کاهش سطح مؤثری که در آن آب جریان دارد می شود. به علاوه از آنجا که مسیر جریان آب در بتن باید ذرات سنگ دانه ها را دور بزند پس مسیر مؤثر به میزان فراوان طولانی تر خواهد شد و میزان نفوذ کاهش پیدا می کند. فضاها و حفره های موئینه عامل اصلی نفوذپذیری بتن به شمار می روند. این حفره ها با اندازه های بزرگ تر و حتی میکرون بوده و به همین دلیل عبور آب از میان این منافذ خیلی آسان تر از عبور آن از میان منافذ خیلی کوچک ژل صورت می گیرد. به طور کلی خمیره سیمان از خود ژل نفوذپذیرتر است، پس نتیجه می شود که نفوذپذیری خمیره سیمان به وسیله تخلخل موئینه خمیره کنترل می شود.

در شکل ۱۳ رابطه ی بین مقاومت فشاری نمونه های بتنی و نتایج حاصل

از آزمون "محفظه استوانه ای" نشان داده شده است. از شکل ۱۳ مشاهده می شود که نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه ای" با مقاومت فشاری نمونه های بتنی، دارای ضریب همبستگی ۰/۹۱ است. با توجه به ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری نمونه های بتنی با نتایج حاصل از روش های مذکور، می توان ارتباط مناسبی بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه های بتنی برقرار کرد. با توجه به نمودار شکل ۱۳ با استفاده از معادله محاسبه شده می توان روند کاهش نفوذپذیری را با افزایش مقاومت فشاری مرتبط دانست. در شکل ۱۴ همین ارتباط و همبستگی بین مقاومت سطحی و میزان نفوذپذیری برقرار شده و با افزایش نفوذپذیری میزان مقاومت سطحی کاهش یافته و نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه ای" با مقاومت سطحی نمونه های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ همانند مقاومت فشاری دارای همبستگی زیادی می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بین مقاومت سطحی نمونه های بتنی با نتایج حاصل از روش های مذکور، می توان ارتباط مناسبی بین مقاومت سطحی و نفوذپذیری نمونه های بتنی برقرار کرد. آن چیزی که در رابطه با استفاده از مواد کاهنده نفوذ به طور مشترک اتفاق می افتد، کاهش فضاهای خالی در بتن (تخلخل) با مواد پرکننده کاهنده نفوذ و فوق روان کننده، جهت کاهش نسبت آب به سیمان است. رابطه ای که بین تخلخل و مقاومت در حجم یا ملات سیمان سخت شده موجود است در بتن پیچیده تر است. وجود ریزترک ها در ناحیه انتقال و فصل مشترک بین خمیر سیمان و درشت دانه ها پیش بینی مقاومت را از روی ارتباط دقیق تخلخل - مقاومت مشکل می سازد. عموماً در سنین اولیه، مقاومت ناحیه انتقال از مقاومت خمیر کمتر است و در دراز مدت این پدیده معکوس می گردد. عملکرد بتن در مقابل تنش های وارده نه فقط به نوع تنش، بلکه همچنین به چگونگی ترکیب عوامل مختلف مؤثر بر تخلخل اجزای مختلف بتن بستگی دارد. از دیدگاه مقاومت، ارتباط بین نسبت آب به سیمان بتن و تخلخل، بدون شک مهم ترین عامل است زیرا مستقل از سایر عوامل، این پارامتر بر تخلخل، هم در خمیر سیمان و هم در ناحیه مشترک بین خمیر و سنگ دانه، مؤثر است.

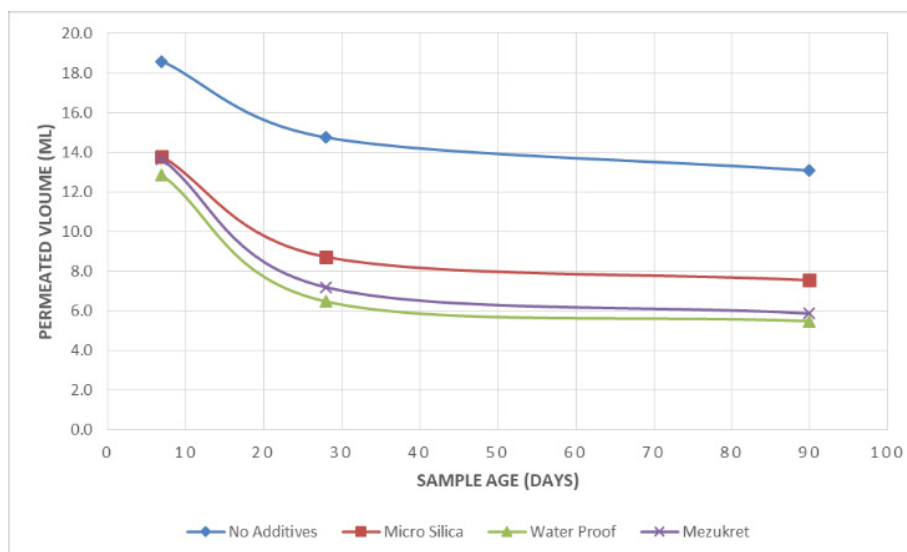
۴-۴ درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه ها با استفاده از استاندارد ASTM C642-06

مقادیر درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه های بتنی در شکل ۱۵ آمده است. بر اساس آن در تمامی نمونه های حاوی مواد کاهنده نفوذ مقادیر درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نسبت به نمونه ساخته شده بدون افزودنی کاهش یافته است. ضمناً با افزایش سن بتن از ۷ به ۹۰ روز، مقدار درصد حجمی



الف) متوسط نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

(a) Average permeability of samples at the age of 7, 28 and 90 days

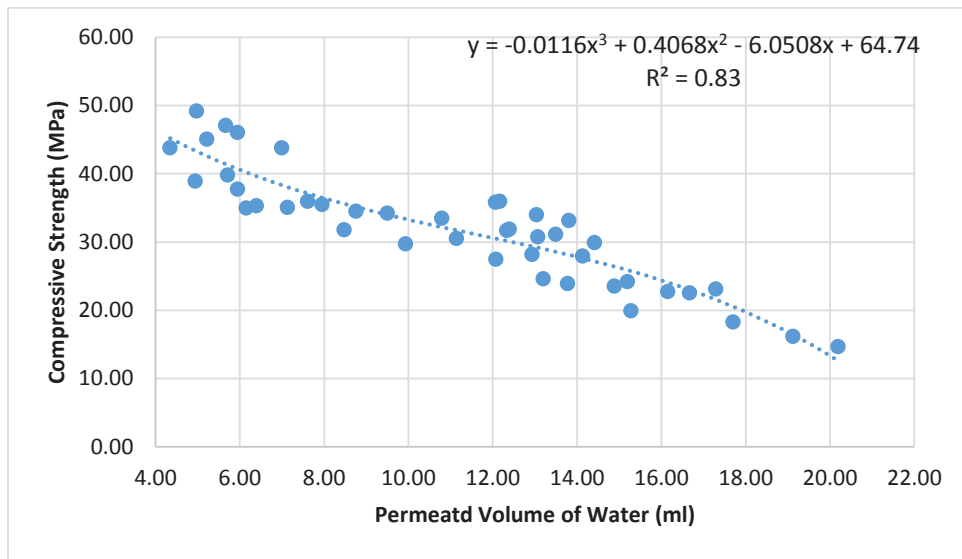


ب) متوسط نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

(b) Average permeability of samples at the age of 7, 28 and 90 days

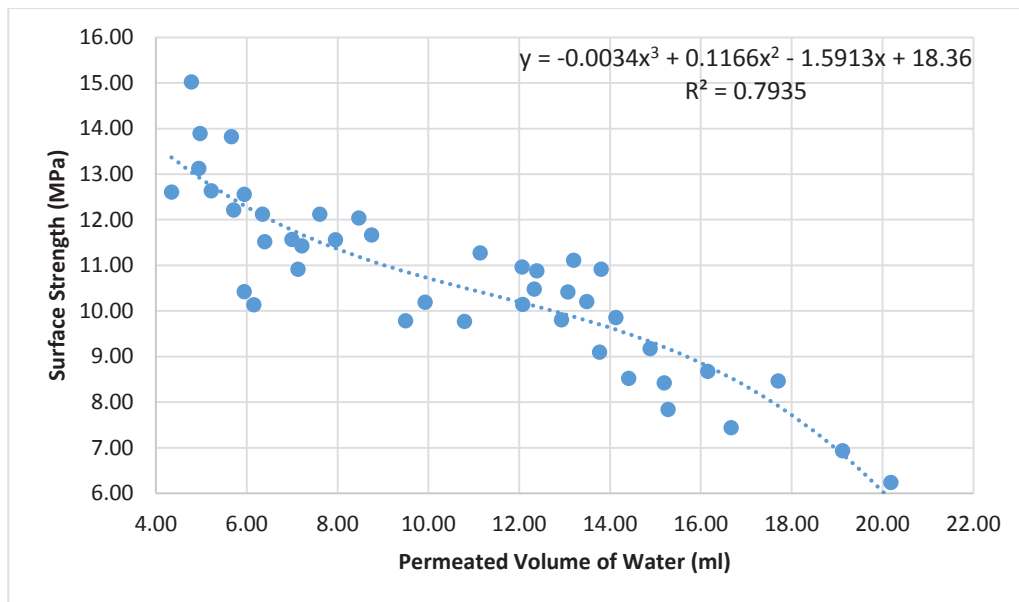
شکل ۱۲. نتایج حاصل از میانگین نفوذپذیری آزمایش "محفظه استوانه‌ای" در سنین مختلف

Fig. 12. The results of the average permeability of the "cylindrical chamber" test at different ages



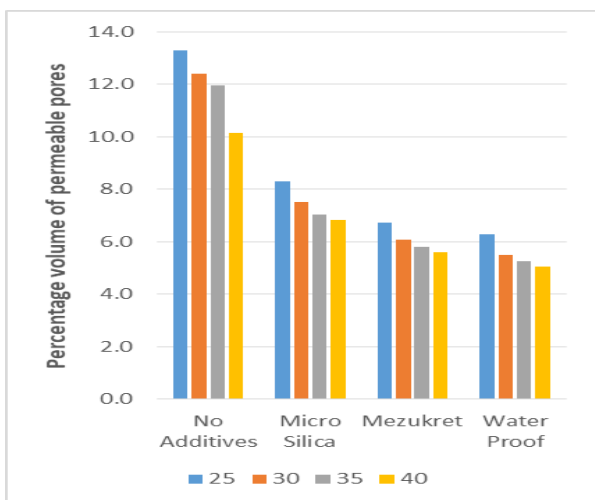
شکل ۱۳. رابطه میان نتایج آزمایش "مقاومت فشاری" با مقادیر نفوذپذیری حاصل از روش آزمایش "محفظه استوانه‌ای"

Fig. 13. The relationship between the "compressive strength" test results and the permeability values obtained from the "cylindrical chamber" test method.

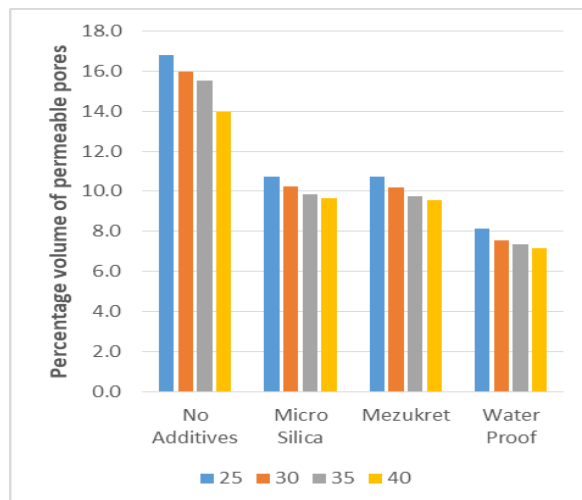


شکل ۱۴. رابطه میان نتایج آزمایش روش "پیچش" با مقادیر نفوذپذیری حاصل از روش آزمایش "محفظه استوانه‌ای"

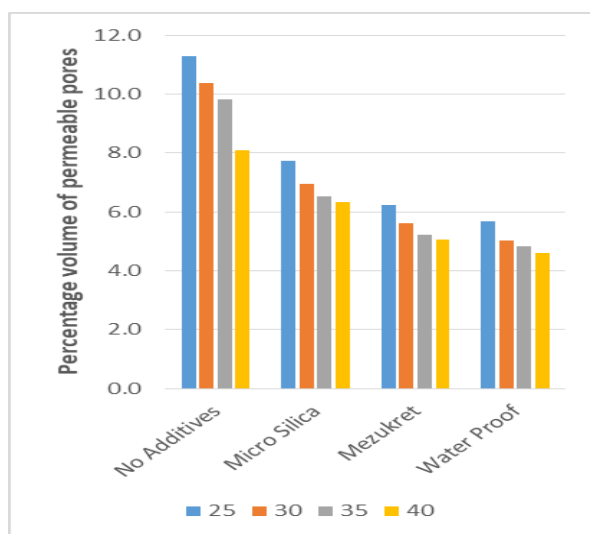
Fig. 14. The relationship between the test results of the "twist-off" method and the permeability values obtained from the "cylindrical chamber" test method



(ب) درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در سن ۲۸ روز
(b) Volume percentage of permeable pores at the age of 28 days



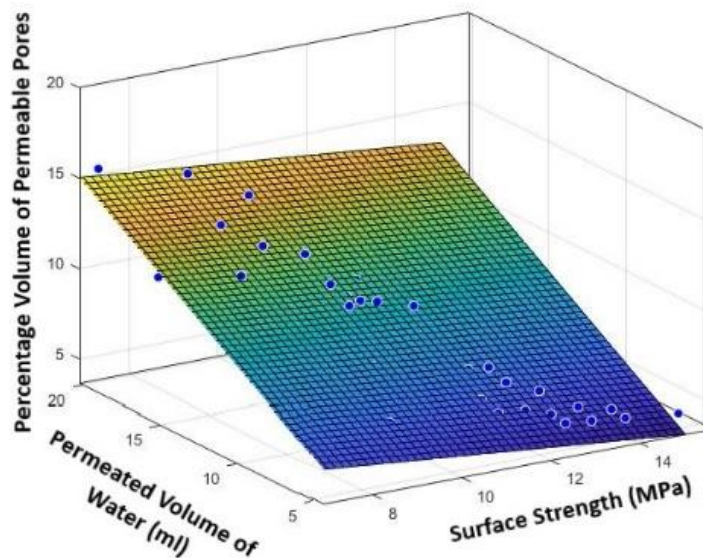
(الف) درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در سن ۷ روز
(a) Volume percentage of permeable pores at the age of 7 days



(ج) درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در سن ۹۰ روز
(c) Volume percentage of permeable pores at the age of 90 days

شکل ۱۵. درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

Fig. 15. Volume percentage of permeable pores



شکل ۱۶. رابطه میان نتایج روش "پیچش" و "محفظه استوانه‌ای" با درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

Fig. 16. The relationship between the results of "twist-off" and "cylindrical chamber" methods with the volume percentage of permeable pores

نفوذ برحسب میلی‌لیتر در روش "محفظه استوانه‌ای" و Z درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بوده و p_{00} ، p_{10} و p_{01} ضرایب ثابت صفحه درجه یک می‌باشند. با توجه به شکل ۱۶ با افزایش مقاومت سطحی میزان نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر کاهش پیدا کرده و همبستگی بالایی بین متغیرهای مذکور وجود دارد.

۴-۶- رابطه مقاومت فشاری با نفوذپذیری و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در فضای سه بعدی
در محیط برنامه‌نویسی متلب با ورود اطلاعات مربوط به نتایج مقاومت فشاری، نفوذپذیری و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بستگی سه مولفه به طور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گرفت که بر مبنای آن با ضریب همبستگی 0.87 و معادله نمودار (رابطه ۳) به صورت معادله یک صفحه می‌باشد.

$$Z = f(x, y) = p_{00} + p_{10} \times x + p_{01} \times y$$

$$p_{00} = 3.069$$

$$p_{10} = -0.03634$$

$$p_{01} = 0.6154$$

$$R - square = 0.8771$$

(۳)

منافذ نفوذپذیر کاهش محسوسی پیدا می‌کند. بیشترین مقدار درصد حجمی منافذ نفوذپذیر مربوط به نمونه ساخته شده‌ی فاقد افزودنی و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه‌ی بتنی حاوی افزودنی واترپروف و روان کننده است.

۴-۵- رابطه مقاومت سطحی با نفوذپذیری و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در فضای سه بعدی

در محیط برنامه‌نویسی متلب با ورود اطلاعات مربوط به نتایج مقاومت سطحی، نفوذپذیری و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر ارتباط سه مولفه به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس معادله نمودار (رابطه ۲) به صورت معادله یک صفحه محاسبه شده است.

$$Z = f(x, y) = p_{00} + p_{10} \times x + p_{01} \times y$$

$$p_{00} = 4.685$$

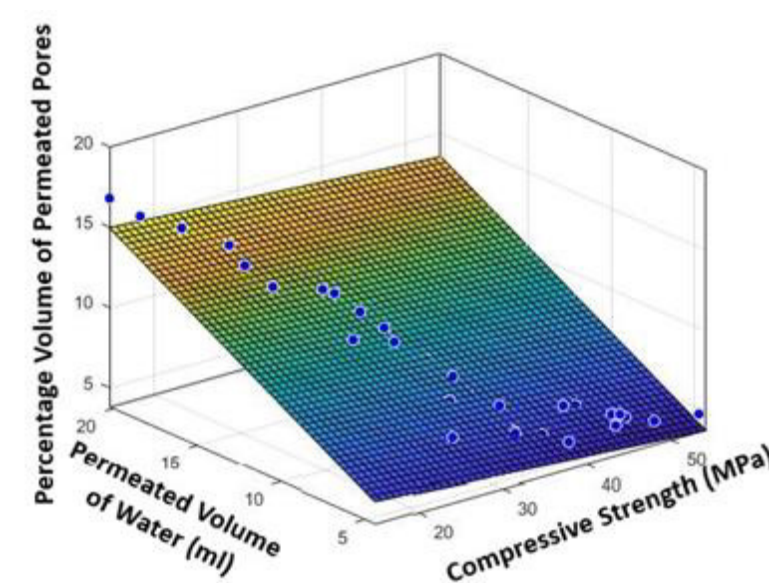
$$p_{10} = -0.2406$$

$$p_{01} = 0.5946$$

$$R - square = 0.8824$$

(۲)

در رابطه ۲، X مقاومت سطحی حاصل از روش "پیچش"، Y حجم



شکل ۱۷. رابطه میان نتایج مقاومت فشاری و "محفظه استوانه‌ای" با درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

Fig. 17. The relationship between compressive strength results and "cylindrical chamber" with volume percentage of permeable pores

کاهنده بیشتر از بتن بدون افزودنی می باشد. به گونه‌ای که برای بتن C40، مقاومت سطحی ۹۰ روزه بتن بدون افزودنی برابر ۱۰/۹ مگاپاسکال می‌باشد ولی همین مقدار برای بتن حاوی واترپروف، مزوکریت و میکروسیلیس به ترتیب برابر ۱۵/۱، ۱۳/۱ و ۱۲/۶ مگاپاسکال می باشد. برای دیگر نمونه‌ها نیز همین روند وجود دارد.

- رابطه معکوسی بین مقاومت‌های فشاری و سطحی با مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی برقرار می باشد، به نحوی که بیشترین نفوذپذیری در نمونه‌های با مقاومت کمتر برقرار است. به عنوان نمونه، مقاومت سطحی بتن C40، حدود ۲۹ درصد بیشتر از بتن C25 می‌باشد اما مقدار نفوذپذیری حدود ۱۷ درصد کاهش داشته است.

- رابطه مستقیمی بین درصد حجمی منافذ نفوذپذیر با مقدار نفوذپذیری وجود دارد به گونه‌ای که نفوذپذیری بتن با ۵/۱ درصد حجمی منافذ نفوذپذیر به مقدار ۵۹ درصد بیشتر از بتن دارای ۸/۱ درصد حجمی منافذ نفوذپذیر می باشد.

- با ترسیم نمودارهای سه بعدی در نرم افزار متلب مشاهده گردید که ارتباط مقاومت‌های سطحی، فشاری و نفوذپذیری با درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بسیار به هم نزدیک بوده و این ارتباط به لحاظ فرمول‌بندی با معادله

در رابطه ۳، X مقاومت فشاری، Y حجم نفوذ برحسب میلی‌لیتر در روش "محفظه استوانه‌ای" و Z درصد حجمی منافذ نفوذپذیر بوده و p_{00} ، p_{01} و p_{10} ضرایب ثابت صفحه درجه یک می‌باشند. با توجه به شکل ۱۷ با افزایش مقاومت فشاری میزان نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر کاهش پیدا کرده و همبستگی بالایی بین متغیرهای مذکور وجود دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به تأثیر عواملی چون اثر مواد کاهنده نفوذ، سن بتن و همچنین ارتباط مقاومت‌های سطحی و فشاری بتن با نفوذ آب سطحی به داخل بتن پرداخته شده است. برای انجام آزمایشات نیز آزمون‌های نوین پیچش و محفظه استوانه‌ای به کار گرفته شده است. نتایج حاصله در ادامه ذکر گردیده است:

- با توجه به ضریب همبستگی برابر ۰/۹۳ بین نتایج حاصل از آزمون پیچش با مقاومت فشاری بتن های حاوی مواد کاهنده نفوذ، لذا میتوان با استفاده از آزمون پیچش مقدار مقاومت فشاری بتن های حاوی مواد کاهنده نفوذ را با دقت بالایی ارزیابی نمود.

- مقدار مقاومت سطحی حاصل از آزمون پیچش برای بتن حاوی مواد

aggregate size on permeability of concrete, *ACI Materials Journal*, 112(6) (2015) 767.

- [9] H. Liu, G. Luo, H. Wei, H. Yu, Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios, *Applied Sciences*, 8(8) (2018) 1217.
- [10] I.G. Amadi, K.I. Amadi-Oparaeli, Effect of admixtures on strength and permeability of concrete, *The International Journal of Engineering and Science*, 7(7) (2018) 1-7.
- [11] Y. Yuan, Y. Chi, Water permeability of concrete under uniaxial tension, *Structural Concrete*, 15(2) (2014) 191-201.
- [12] M.B.A. Houaria, M. Abdelkader, C. Marta, K. Abdelhafid, Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, *Energy Procedia*, 139 (2017) 725-730.
- [13] D. fur Normung, Testing Concrete: Testing of Hardened Concrete (Specimens Prepared in Mould) DIN 1048 Part 5 1991, in, Germany, 1991.
- [14] B. Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, (2009) 12390-12393.
- [15] M. Hassani, K. Vessalas, V. Sirivivatnanon, D. Baweja, Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete, *ACI Mater. J*, 114 (2017) 911-922.
- [16] M. Naderi, Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method, Registration of Patent in Companies and industrial property Office, (2010).
- [17] A. Mardani-Aghabaglou, A. Nematzadeh, E. Geven, Effect of utilization of different type of mineral admixture on fresh and hardened properties of cementitious systems, *Sakarya University Journal of Science*, 23(2) (2019) 213-223.
- [18] R. Ramkrishnan, B. Abilash, M. Trivedi, P. Varsha, P. Varun, S. Vishanth, Effect of mineral admixtures on pervious concrete, *Materials Today: Proceedings*, 5(11) (2018) 24014-24023.

صفحه درجه یک با دقت مناسبی کاملاً برقرار است.

- با افزایش سن بتن، نرخ افزایش نفوذپذیری بتن بدون افزودنی، بیشتر از بتنهای حاوی مواد کاهنده نفوذ می باشد به گونه‌ای که بتن بدون افزودنی پس از گذشت ۹۰ روز دارای ۷۲ درصد افزایش در نفوذپذیری می باشد اما بتن های حاوی مواد کاهنده نفوذ حدودا دارای ۴۶ درصد افزایش در نفوذپذیری هستند.

منابع

- [1] M. Liang, K. Feng, C. He, Y. Li, L. An, W. Guo, A meso-scale model toward concrete water permeability regarding aggregate permeability, *Construction and Building Materials*, 261 (2020) 120547.
- [2] A. Akkaya, İ.H. Çağatay, Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods, *Construction and Building Materials*, 294 (2021) 123539.
- [3] W. Xue, H. Zhang, H. Li, W. Xu, Effect of early age loading on the subsequent mechanical and permeability properties of concrete and its mechanism analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, 14 (2021) 1208-1221.
- [4] N. Fanaie, S. Aghajani, E.A. Dizaj, Theoretical assessment of the behavior of cable bracing system with central steel cylinder, *Advances in structural engineering*, 19(3) (2016) 463-472.
- [5] E. Jahanbakhti, N. Fanaie, A. Rezaeian, Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection, *Journal of Constructional Steel Research*, 137 (2017) 180-191.
- [6] M. Dashtibadfarid, M. Afrasiabi, Low-permeability concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs, *Int. J. Innov. Eng. Sci*, 2 (2017) 20-24.
- [7] P. Halamickova, R.J. Detwiler, D.P. Bentz, E.J. Garboczi, Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, *Cement and concrete research*, 25(4) (1995) 790-802.
- [8] L. Kong, Y. Ge, Mechanism study of effect of coarse

- [29] A.S. Varzaneh, M. Naderi, Determination of shrinkage, tensile and compressive strength of repair mortars and their adhesion on the concrete substrate using "twist-off" and "pull-off" methods, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(4) (2021) 2377-2395.
- [30] A. Saberi Varzaneh, M. Naderi, The effects of pre-compress on the mortar/concrete bond and their in-situ compressive strength using "pull-off" and "twist-off" methods, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 12(1) (2022) 571-589.
- [31] V.A. Saberi, M. Naderi, Investigation of In-Situ Compressive Strength of Fiber-Reinforced Mortar and the Effect of Fibers on the Adhesion of Mortar/Steel, *Advanced design and manufacturing technology*, 14(2) (2021) 37-48.
- [32] A.S. Varzaneh, M. Naderi, Using "twist-off" and "pull-off" tests to investigate the effect of polypropylene fibers on the bond of mortar/concrete and to evaluate their in-situ compressive strength, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 23(6) (2021) 47-58.
- [33] M. Naderi, M. Nasiri, A. Saberi Vaezaneh, Evaluation of surface strength of self-compacting concrete under shrinkage and magnesium sulfate using "twist-off" method, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(6) (2022) 1-17.
- [34] A.S. Varzaneh, M. Naderi, The effects of pre-compress on the mortar/concrete bond and their in-situ compressive strength using "pull-off" and "twist-off" methods, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 12(1) (2022) 571-589.
- [35] A.S. Varzaneh, M. Naderi, study of bond strength between fiber-Reinforced mortar steel & their mechanical properties using push-out, "twist-off" & "pull-off" methods. *Revista Română de Materiale*, 51(2) (2021) 228-238.
- [36] A. ASTM C642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM, ASTM International, (2013).
- [37] B. EN, 12390-3 Testing Hardened Concrete:
- [19] B.B. Jindal, D. Singhal, S. Sharma, J. Parveen, Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture, *Computers and concrete*, 21(3) (2018) 345-353.
- [20] S. Kate, P. Jamale, To investigate the effect of permeability properties on hsc using different mineral admixture, *J Adv Sch Res Allied Educ*, 15(2) (2018) 314-318.
- [21] X. Cui, J. Zhang, D. Huang, Z. Liu, F. Hou, S. Cui, L. Zhang, Z. Wang, Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(11) (2017) 04017217.
- [22] M. Naderi, Assessing the in situ strength of concrete, using new twist-off method, (2006).
- [23] M. Naderi, R. Shibani, New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, *Aust, J. Basic Appl. Sci*, 7(2) (2013) 438-447.
- [24] M. Naderi, Using twist-off method for measuring surface strength of concretes cured under different environments, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4) (2011) 385-392.
- [25] M. Naderi, A. Saberi Varzaneh, Determination of Compressive and Flexural Strengths of In-situ Pozzolanic Concrete Containing Polypropylene and Glass Fibers Using "Twist-off" Method, *Modares Civil Engineering journal*, 20(5) (2020) 117-129.
- [26] M. Naderi, A. Esmaeli, A. Saberi Varzaneh, Assessment of the application, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(3) (2021) 23-41.
- [27] A.S. Varzaneh, M. Naderi, Numerical and experimental study of semi-destructive tests to evaluate the compressive and flexural strength of polymer-modified mortars and their adhesion to the concrete substrate, *Revista Romana de Materiale*, 50(4) (2020) 537-544.
- [28] A. Saberi Vaezaneh, M. Naderi, The effect of initial compression on the interface of repair/concrete and the evaluation of the compressive strength of mortars, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(5) (2022).

- West Conshohocken, PA, (2012).
- [41] G.R. Mass, Proportioning Mass Concrete a Incorporating Pozzolans Using ACI 211. 1, Concrete International, 4(8) (1982) 48-55.
- [42] ASTM, ASTM C1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, American Social Test. Materials, 4(2) (2012) 1-8.
- [43] ASTM, ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete, in, ASTM West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- Compressive Strength of Test Specimens; 17/30360096 DC, BSI: London, UK, (2009).
- [38] A. International, ASTM C136-01, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2001).
- [39] C. ASTM, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, (2012).
- [40] A. Standard, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Parhizkari, A. Saberi Vaezaneh, M. Naderi, *The effect of penetration-reducing materials on concrete permeability and strength with "cylindrical chamber" and "Twist-off" tests*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(1) (2023) 19-40.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21413.7714](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21413.7714)

