

## تأثیر شرایط حاد محیطی بر نرخ نفوذ آب و مقاومت سطحی بتن‌های حاوی ژل میکروسیلیس الیاف‌دار و سوپر ژل با استفاده از آزمون‌های درجا

علی صابری ورزنده \*

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

محمود نادری

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

مجید پرهیزکاری

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

### چکیده

مشخصات مکانیکی و شیمیایی بتن در شرایط حاد محیطی، دست‌خوش تغییراتی می‌گردد که اغلب باعث کاهش مقاومت و دوام بتن می‌شود. لذا استفاده از افزودنی‌هایی که باعث افزایش پایایی بتن در شرایط حاد باشد مورد نیاز است. همچنین استفاده از آزمون‌هایی که بدون آسیب رساندن به بتن، قادر به اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت بتن هم به صورت درجا و هم به صورت آزمایشگاهی باشند دارای اهمیت می‌باشد. لذا تصمیم گرفته شد تأثیر برخی مواد افزودنی روی دوام بتن که به‌تازگی به‌وفور در کشور ایران مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گیرد. تحقیقات چندانی در خصوص تأثیر این مواد بر دوام و پایایی بتن در شرایط حاد محیطی وجود ندارد. در این تحقیق با به‌کارگیری آزمون‌های درجای محفظه استوانه‌ای (cylindrical chamber) و پیچش (Twist-off) اقدام به ارزیابی تأثیر چرخه‌های مختلف یخبندان و آب‌شدگی بر نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی افزودنی شده است. بر خلاف استانداردهای BS EN 12390-8 و DIN 1048 که برای اندازه‌گیری نفوذپذیری، احتیاج به شکستن بتن می‌باشد، در آزمون محفظه استوانه‌ای بدون آسیب به بتن می‌توان حجم و عمق نفوذ آب را اندازه‌گیری نمود. نتایج حاصله بیانگر این است که با به‌کارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای می‌توان عمق نفوذ بتن را با دقت بالا و بدون نیاز به شکستن نمونه‌ی بتنی اندازه‌گیری نمود. همچنین حدود ۷۸ درصد کاهش در مقاومت لایه‌ی سطحی بتن تا ۵۰ سیکل اول رخ داده و ۲۲ درصد باقیمانده در ۱۰۰ سیکل بعدی اتفاق افتاده است. نفوذپذیری بتن حاوی ژل میکروسیلیس و سوپرژل نیز به ترتیب حدود ۵۰ و ۳۰ درصد کمتر از نفوذپذیری بتن معمولی محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت، نرخ نفوذ، آزمون‌های ابداعی، شرایط حاد.

\* نویسنده مسئول: Ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

## ۱- مقدمه

می‌باشد. [۲۰].

علاوه بر اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی و دوام بتن، دستگاه‌هایی که با آن‌ها این عوامل را اندازه‌گیری می‌نمایند دارای اهمیت زیادی می‌باشد. آزمون پیچش یک آزمون نوین و درجا برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی لایه‌ها می‌باشد [۲۱]. در تحقیقات دیگر نیز از این آزمون برای ارزیابی مشخصات مکانیکی برخی مصالح استفاده شده است. صابری و همکاران در تحقیق نتیجه گرفتند که ضریب همبستگی بالای ۹۳ درصد میان نتایج آزمون پیچش با آزمون‌های استاندارد وجود دارد [۲۲]. در تحقیقی دیگر نیز صابری و همکاران برای ارزیابی دقت آزمون پیچش، از مدل‌سازی اجزا محدود استفاده نمودند که نتایج حاصله نشان از دقت بالای این روش دارد [۲۳]. یکی از آزمون‌های نوین دیگر برای ارزیابی نفوذپذیری بتن، دستگاه محفظه استوانه‌ای می‌باشد [۲۴]. در گذشته با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای، تحقیقاتی انجام شده است. امینی و همکاران با انجام تحقیقی با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای به این نتیجه رسیدند که مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن را می‌توان با دقت بالا با استفاده از آزمون فوق به دست آورد [۲۶]. همچنین در تحقیق فوق مشاهده شد که با افزایش دوره عمل‌آوری و کسب مقاومت فشاری، مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن کاهش می‌یابد [۲۶].

با توجه به توضیحات ارائه شده در بندهای بالا، سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی دارای تأثیر منفی روی مشخصات بتن می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه به تازگی در برخی از پروژه‌های عمرانی داخل ایران، برای کاهش مقدار نفوذپذیری بتن از افزودنی‌های جدیدی استفاده می‌شود که هیچ تحقیق دانشگاهی روی تأثیر آن مواد بر دوام بتن انجام نشده است، لذا در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های نوین پیچش و محفظه استوانه‌ای، اقدام به اندازه‌گیری مقاومت سطحی و نفوذپذیری بتن حاوی افزودنی‌ها تحت شرایط حاد محیطی یخبندان و آب‌شدگی شده است. در انتها نیز از نتایج این تحقیق برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب به داخل بتن بدون اینکه نیاز به شکستن نمونه باشد، استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۱-۲- مصالح مصرفی

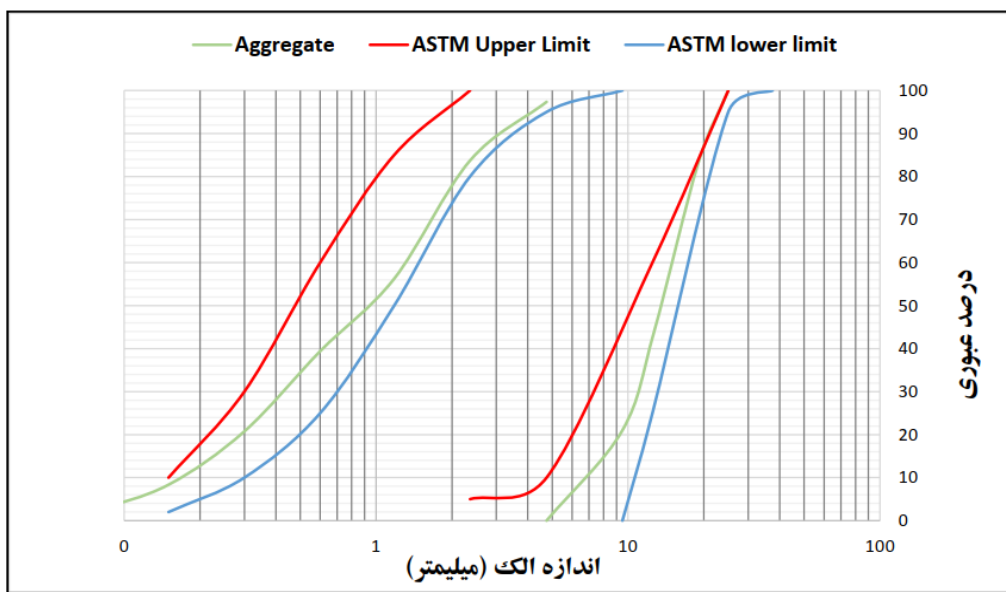
برای انجام آزمون‌ها روی بتن از سیمان پرتلند تپ ۲ ساخت

یکی از مهم‌ترین مواردی که برای ارزیابی دوام بتن استفاده می‌شود، نفوذپذیری است. همچنین بتن تحت شرایط حاد محیطی دچار کاهش مقاومت و در پی آن کاهش دوام شده که باعث نفوذ موادی از جمله آب، روغن و دیگر مایعات به داخل آن می‌شود. عواملی که در نفوذپذیری بتن تأثیرگذار می‌باشند، به ماهیت شیمیایی و فیزیکی بتن و به نوع آزمایش‌ها بستگی دارد [۱]. عوامل متعددی بر مقدار نفوذپذیری موثر می‌باشند از جمله می‌توان به افزودنی‌ها [۲]، ریزساختار بتن [۳]، وزن و ابعاد سنگ‌دانه‌ها [۴-۵]، دما [۶]، مقدار آب و سیمان [۷] و تنش‌های وارده [۸-۹] و مقدار عمل‌آوری [۱۰] اشاره نمود. همچنین خمیره سیمان در مقدار نفوذپذیری بتن مخصوصاً در ناحیه انتقال بسیار مؤثر می‌باشد [۱۱]. بر اساس نوع ساختار شیمیایی و فیزیکی آب، این مایع می‌تواند در ترک‌های ریز نفوذ کند. هر چه مقدار آبی که به بتن وارد می‌شود، بیشتر باشد باعث تخریب زیادتری در بتن خواهد شد. همچنین آب با حل نمودن ترکیبات آلی و معدنی در درون خود، باعث ورود این عوامل به داخل بتن می‌گردد [۱۲]. تأثیر نفوذ آب به داخل بتن زمانی مخرب‌تر می‌گردد که بتن تحت شرایط حاد محیطی قرار گیرد. یکی از این چرخه‌ها، سیکل‌های مختلف یخبندان و آب‌شدگی می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در خصوص چرخه‌های یخبندان و آب‌شدگی بر مقاومت بتن انجام شده است. در تحقیقاتی که نادری و همکاران و همچنین کائو و همکاران انجام دادند مشاهده شد که یخ‌زدگی بتن، باعث کاهش مقاومت و کیفیت چسبندگی بتن می‌گردد [۱۳-۱۴]. در خصوص مقاومت بتن نیز، بتن‌های دارای مقاومت ۳۵ مگاپاسکال و بیشتر دارای دوام بیشتری در مقابل شرایط محیطی حاد می‌باشند [۱۵]. چرخه‌های مختلف یخ‌زدگی علاوه بر اینکه باعث کاهش مقاومت بتن می‌گردد سبب گسترش ترک‌های ریز در ناحیه انتقال می‌شود [۱۶-۱۷]. در تحقیقی توسط نادری و همکاران مشاهده شد که چسبندگی بتن به صفحات CFRP طی چرخه‌های ۶۰ تا ۱۸۰ سیکل، باعث کاهش حدود ۲۰ درصدی شده است [۱۸]. حسنی و همکاران طی تحقیق نتیجه گرفتند که یکی از موارد مهم جهت جلوگیری از نفوذ مواد مضر به داخل بتن، مواد افزودنی کاهنده نفوذ می‌باشد [۱۹]. در تحقیقی دیگر توسط نادری و همکاران مشخص شد که مقدار نفوذپذیری بتن‌های حاوی پوزولان، کمتر از بتن‌های معمولی

کارخانه سیمان آبیگ (جدول ۱)، شن و ماسه کوهی، آب آشامیدنی، فوق روان کننده، چسب مخصوص و مواد کاهنده نفوذ استفاده شده است. و ۲۵۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد. نمودار دانه بندی سنگ دانه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. چسب مخصوص استفاده شده است. همچنین برای اندازه گیری مقدار چگالی و جذب آب نیز از استانداردهای ASTM C127 [۲۸] و ASTM C128 [۲۹] استفاده شده است. جذب آب شن و ماسه به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ درصد می باشد. چگالی نیز به ترتیب برابر ۲۴۶۳ و ۲۵۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد. نمودار دانه بندی سنگ دانه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. چسب مخصوص استفاده شده است. همچنین برای اندازه گیری مقدار چگالی و جذب آب نیز از استانداردهای ASTM C127 [۲۸] و ASTM C128 [۲۹] استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان تپ ۲

C <sub>3</sub> A	LOI	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	مشخصات شیمیایی وزن (درصد)
۶/۲۵	۱/۸۹	۳/۲۰	۱/۹۹	۰/۲۶	۰/۷۴	۶۲/۴۴	۴/۸۱	۲۱/۰۵	۳/۸۴	



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن و ماسه

تعیین گردید. طرح مخلوط نمونه های بتنی در جدول ۳ قابل مشاهده است.

مواد مورد استفاده برای کاهش مقدار نفوذ پذیری از نوع ژل میکروسیلیس الیافدار و سوپر ژل می باشد که مشخصات آن ها به ترتیب در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات چسب مصرفی (بر اساس مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده)

نسبت اختلاط	رنگ	زمان چسبیدن	مقاومت (MPa)
یک به یک	طوسی	۹۰ دقیقه	۷۰

طرح اختلاط های مورد نظر با توجه به استاندارد ACI211.1 [۳۰]

جدول ۳- طرح اختلاط بتن ها

مقدار افزودنی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	فوق روان کننده ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	ماسه ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	شن ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	نسبت آب به سیمان	سیمان ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	آب ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	رده مقاومتی (MPa)
۲۳	۰	۸۸۰	۷۰۰	۰/۵۵	۳۸۲	۲۱۲	C25
۲۵	۰	۸۶۵	۶۸۸	۰/۴۹	۴۱۶	۲۰۶	C30
۲۶/۵	۱/۱۷	۸۶۲	۶۸۶	۰/۴۵	۴۴۱	۱۹۸	C35
۲۸/۵	۱/۶۱	۸۵۲	۶۷۶	۰/۴۱	۴۷۶	۱۹۵	C40

## ۲-۲- معرفی آزمون‌ها

روش "پیچش"

آزمون "پیچش" آزمونی نوین برای تعیین مقاومت سطحی بتن می‌باشد. برای انجام آزمون پیچش مطابق شکل ۲-الف ابتدا یک استوانه فولادی به قطر ۴ سانتی متر روی سطح بتن چسبانده می‌شود. سپس مطابق شکل ۲-ب با استفاده از یک ترکمر ساده، به استوانه لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا دچار شکست شود. در شکل ۲-ج نیز نتیجه انتهایی قابل مشاهده است. رابطه بین ممان و مقاومت برشی مطابق رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$\tau = \frac{Tr}{J} \rightarrow J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1)$$

در رابطه فوق T ممان، r شعاع،  $\tau$  مقاومت و J ممان قطبی دوم سطح می‌باشد.

## جدول ۴- مشخصات ژل میکروسلیس الیافدار

نوع	رنگ	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	الیاف
دوگاب ژله ای	خاکستری تیره	۱/۳۵	پلی پروپیلن

## جدول ۵- مشخصات سوپرژل

نوع	رنگ	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	PH
ژل	خاکستری	۱/۴۵	۸

مقدار مصرف مواد فوق طبق استانداردهای ASTM C1202 [۳۱] و ASTM C494 [۳۲] و همچنین بر اساس توضیحات شرکت تولیدکننده برابر ۶ درصد وزنی سیمان می‌باشد.



ج) آسیب جزئی ناشی از آزمون



ب) اعمال لنگر



الف) استوانه فولادی

شکل ۲- آزمون پیچش

برای وارد نمودن فشار، باید اهرم دستی را چرخاند تا فشار وارده برابر ۵ بار تنظیم گردد. با استفاده از معادله ۲ و ۳ بترتیب می‌توان مقدار حجم نفوذ آب و نرخ نفوذ آب به داخل بتن را به سادگی اندازه گیری نمود.

آزمون محفظه استوانه‌ای

مطابق شکل ۳-الف ابتدا صفحه فولادی روی سطح بتن چسبانده شده و سپس دستگاه محفظه استوانه‌ای روی آن سوار شده و با آب پر می‌شود.



ب) دستگاه نفوذپذیری



الف) رینگ‌های فولادی

شکل ۳- آزمایش محفظه استوانه‌ای

آزمایش مقاومت فشاری

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از استاندارد BS EN 12390-3 [۳۳] استفاده شد. برای انجام آزمون، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر ساخته و در سیکل‌های مختلف یخبندان و آب‌شدگی قرار گرفت و سپس در زیر جک بتن شکن ۲۰۰ تنی قرار گرفت (شکل ۵).

### ۲-۳- روش تحقیق

برای انجام این تحقیق تعداد ۱۵۰ نمونه بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. همچنین از ۲ نوع بتن مختلف شامل بتن معمولی و بتن حاوی افزودنی و در چرخه‌های مختلف ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخبندان و آب‌شدگی قرار گرفتند. انجام تمامی آزمایش‌ها بیش از ۶ ماه بطول انجامید. برای انجام سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی، مطابق استاندارد ASTM C666 [۳۴] نمونه‌های بتنی به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۸- درجه قرار گرفته و سپس به مدت ۴ ساعت نیز در دمای ۴/۵+ قرار داده می‌شود. برای اینکه بتوان روند تأثیر افزایش سیکل‌های مختلف بر دوام بتن را مورد بررسی قرار داد لذا تصمیم گرفته شد از سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی با چرخه‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ استفاده شود.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- حجم نفوذ آب در سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی

مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی که توسط آزمون محفظه استوانه‌ای مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند در شکل ۶ قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۶-الف و ب مشاهده می‌شود مقدار نفوذپذیری بتن عادی برابر ۰/۰۱۱۵ میلی‌متر بر دقیقه به دست آمده است. اما همین مقدار برای بتن حاوی ژل میکروسیلیس برابر ۰/۰۰۵۷ میلی‌متر بر دقیقه و برای سوپر ژل برابر ۰/۰۰۸۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده، نفوذپذیری بتن حاوی ژل میکروسیلیس و سوپر ژل به ترتیب حدود ۵۰ و ۳۰ درصد کمتر از نفوذپذیری بتن معمولی می‌باشد. مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی که تحت ۵۰ سیکل قرار گرفته‌اند برای بتن معمولی، بتن حاوی ژل میکروسیلیس و بتن حاوی سوپر ژل به ترتیب برابر ۰/۰۱۴۸،

$$V = h \times A(2) \quad (2)$$

$$Q = \frac{V}{t}(3) \quad (3)$$

$V$  حجم آب نفوذ کرده ( $\text{mm}^3$ )،  $h$  قرائت میکرومتر ( $\text{mm}$ )،  $A$ ، سطح مقطع اعمال فشار ( $\text{mm}^2$ )،  $Q$  نرخ نفوذ آب ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) و  $t$  مدت زمان (s) است.

پس از اینکه مقدار نفوذپذیری نمونه‌ها تعیین گردید، مطابق شکل ۴، نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شده و مقدار عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری می‌شود.



الف) اندازه‌گیری عمق خیس شدگی

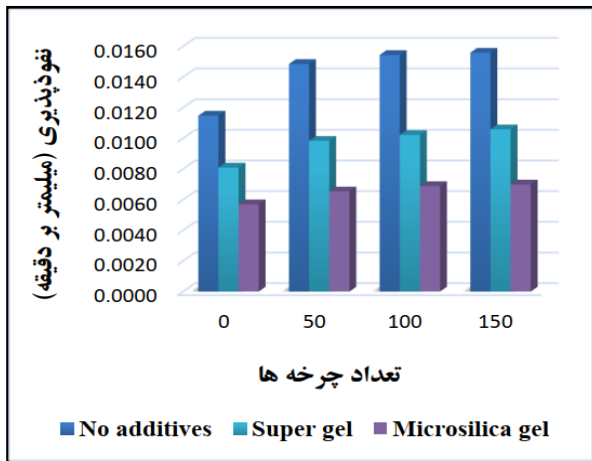


ب) نمونه‌ی زیر جک

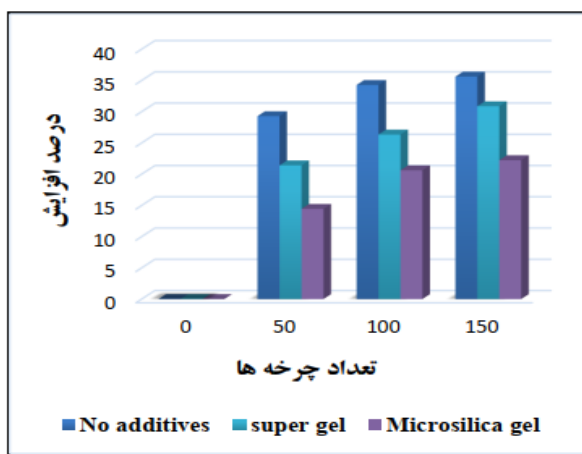
شکل ۴- عمق نفوذ آب در بتن



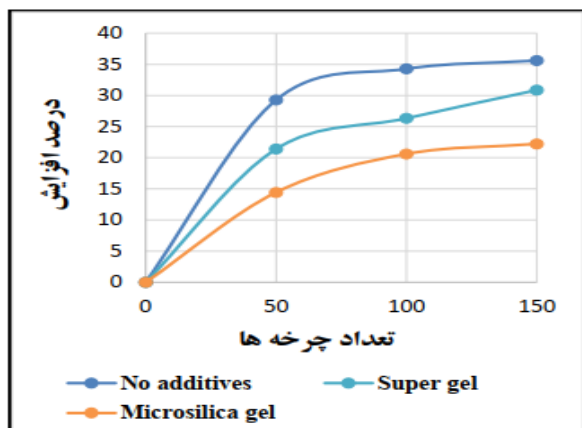
شکل ۵- مقاومت فشاری بتن



الف) مقدار نفوذپذیری



ب) درصد افزایش نفوذپذیری



ج) تغییرات درصد افزایش نفوذ پذیری

شکل ۶- نتایج حاصل از آزمون «محفظه استوانه‌ای» در سیکل - های مختلف یخبندان و آب‌شدگی

برای اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری بتن در استانداردهای DIN 1048-5 [۴۴] و BS EN 12390-8 [۴۵] از طریق اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن استفاده می‌شود. برای انجام این کار می‌بایست نمونه شکسته شده و عمق نفوذ آب اندازه‌گیری گردد. در

۰/۰۰۶۵ و ۰/۰۰۹۸ میلی‌متر بر دقیقه به دست آمده است. همچنین مقادیر مذکور در سیکل ۱۰۰ به ترتیب برابر ۰/۰۱۵۴، ۰/۰۰۶۹ و ۰/۰۱۰۲ میلی‌متر بر دقیقه و همچنین برای سیکل ۱۵۰ برابر ۰/۰۱۵۶، ۰/۰۰۷۱ و ۰/۰۱۰۶ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمده است. با توجه به شکل ۶، روند افزایش نرخ نفوذپذیری تا ۵۰ سیکل زیاد می‌باشد اما بعد از آن بسیار کند شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، حدود ۷۱ درصد افزایش حجم نفوذ در ۵۰ سیکل اول رخ داده و ۲۹ درصد افزایش حجم نفوذ در ۱۰۰ سیکل بعدی مشاهده شده است.

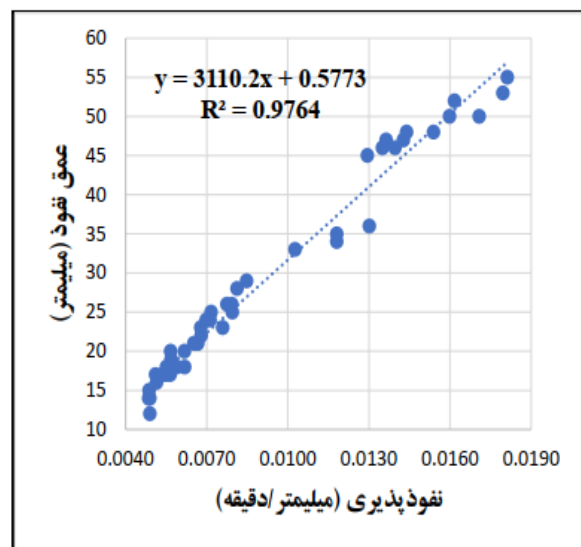
مطبق شکل ۶-ج، مشاهده می‌شود که ابتدا، آب با سرعت بیشتری به داخل بتن نفوذ می‌کند اما در ادامه با پر شدن منافذ، سرعت نفوذ آب به داخل بتن به صورت مقدار ثابتی در می‌آید. همچنین مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن‌های معمولی بیشتر از بتن‌های حاوی ماده کاهنده نفوذ می‌باشند به گونه‌ای که پس از اعمال ۱۵۰ سیکل یخبندان و آب‌شدگی روی بتن‌ها، نفوذپذیری بتن عادی حدود ۳۶ درصد افزایش داشته اما نفوذپذیری بتن‌های حاوی ژل میکروسیلیس و سوپرژل به ترتیب حدود ۲۲ و ۳۰ درصد می‌باشد. در کل با توجه به اینکه سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی باعث افزایش ترک‌های ریز در بتن می‌گردد لذا سبب نفوذ آب بیشتری به داخل بتن شده و همین یکی از عوامل اصلی کاهش دوام بتن می‌باشد. ژل میکروسیلیس الیافدار به صورت یک فیلر باعث پر شدن خلل و فرج بتن شده و لذا باعث تاثیر مثبت بر مقدار نفوذپذیری بتن می‌گذارد. غیاثوند و همکاران در تحقیقی نتیجه گرفتند که یکی از دلایل کاهش نفوذ آب به داخل بتن، کاهش مقدار خلل و فرج بتن می‌باشد [۳۵]. بوید و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که بتن‌های قرار گرفته در سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی دارای ترک‌های بیشتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد [۱۶]. که همین امر سبب افزایش مقدار نفوذ آب به داخل بتن می‌شود. در کل موادی که باعث کاهش منافذ بتن می‌شوند می‌توانند باعث کاهش نفوذ آب به داخل بتن گردد [۳۶-۳۹]. همچنین بتن با مقاومت بالا می‌تواند در برابر سیکل‌های یخبندان و آب‌شدگی تحمل بیشتری داشته باشد [۱۵].

پس از انجام آزمون نفوذپذیری، نمونه بتنی به دو قسمت تقسیم می‌شود. سپس، بیشترین مقدار عمق نفوذ آب به بتن اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۷ رابطه بین عمق نفوذ و نفوذپذیری نمونه‌ها نشان داده شده است. با به کارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای می‌توان عمق نفوذ بتن را با معادله ۴ و دقت بالا و بدون شکست نمونه‌ی بتنی اندازه‌گیری نمود.  $X$  مقدار نفوذپذیری حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای بوده که با جایگذاری در معادله، مقدار عمق نفوذ آب در بتن بدون شکستن نمونه قابل محاسبه می‌باشد. البته خاطر نشان می‌شود که با انجام تعداد بسیار بیشتری آزمایش روی بتن‌های با مقاومت‌های بیشتر و مشخصات متفاوت‌تر می‌توان به معادله‌ی کلی‌تر و دقیق‌تری دست یافت.

شکل ۷- رابطه بین عمق نفوذ و نفوذپذیری نمونه‌ها نشان داده شده است. با به کارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای می‌توان عمق نفوذ بتن را با معادله ۴ و دقت بالا و بدون شکست نمونه‌ی بتنی اندازه‌گیری نمود.  $X$  مقدار نفوذپذیری حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای بوده که با جایگذاری در معادله، مقدار عمق نفوذ آب در بتن بدون شکستن نمونه قابل محاسبه می‌باشد. البته خاطر نشان می‌شود که با انجام تعداد بسیار بیشتری آزمایش روی بتن‌های با مقاومت‌های بیشتر و مشخصات متفاوت‌تر می‌توان به معادله‌ی کلی‌تر و دقیق‌تری دست یافت.

$$y = 3110.2x + 0.57 \quad (۴)$$



شکل ۷- رابطه بین عمق نفوذ آب و حجم نفوذ

### ۳-۳- مقاومت سطحی تحت سبک‌های یخبندان و آب-شدگی

مطابق شکل ۹، نتایج حاصل از آزمون پیچش نشان می‌دهد که کاهش مقاومت سطحی بتن معمولی، بیشتر از نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ می‌باشد. این مقدار حدود ۳۳ درصد می‌باشد. نمونه‌های بتنی حاوی ژل میکروسیلیس الیافدار به دلیل فضاهای خالی کمتر دارای افت کمتری در مقاومت سطحی می‌باشند. مقدار کاهش مقاومت سطحی بتن پس از اتمام ۱۵۰ سیکل یخبندان و آب‌شدگی حاوی ژل میکروسیلیس و سوپر ژل به ترتیب برابر ۲۲/۷ و ۲۴ درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان کاهش مقاومت سطحی بتن تا چرخه ۵۰ سیکل دارای شتاب بیشتری است اما از آن به بعد از شدت آن کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی در ۵۰ سیکل ابتدایی حدود ۷۸ درصد و در ۱۰۰ سیکل بعدی حدود ۲۲ درصد می‌باشد.

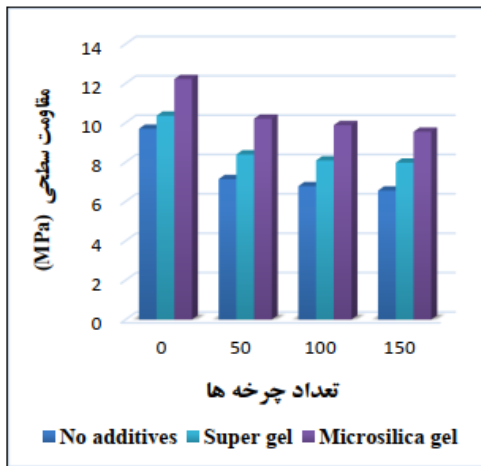
### ۳-۲- نفوذپذیری بتن با مقاومت‌های مختلف

همانطور که توضیح داده شد، بتن‌های استفاده شده در این تحقیق در رده‌های مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقدار نفوذ آب در بتن معمولی در رده‌های مذکور به ترتیب برابر ۰/۰۱۳۰، ۰/۰۱۱۸، ۰/۰۱۰۸ و ۰/۰۱۰۳ میلی‌متر بر دقیقه به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود نفوذپذیری دارای رابطه معکوس با مقاومت فشاری می‌باشد. مقدار آب نفوذ کرده در بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال حدود ۲۱ درصد کمتر از آب نفوذ کرده در بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. این روند برای بتن‌های حاوی ژل میکروسیلیس و سوپر ژل نیز برقرار می‌باشد. مقدار نفوذ آب برای بتن حاوی ژل میکروسیلیس برای رده‌های مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر

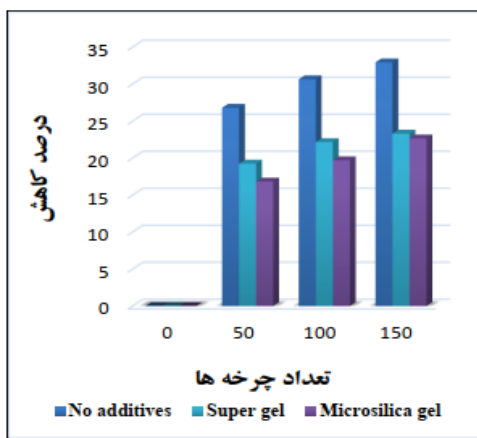
### ۳-۴- نتایج آزمایش «پیچش»، نفوذپذیری و عمق نفوذ در فضای سه‌بعدی

در محیط برنامه‌نویسی متلب با ورود اطلاعات مربوط به نتایج

مقاومت سطحی، حجم نفوذ و عمق نفوذ، ارتباط سه مؤلفه بطور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس معادله نمودار (رابطه ۵) به صورت معادله یک صفحه محاسبه شده است.



الف) تغییرات مقاومت سطحی



ب) درصد کاهش مقاومت سطحی

شکل ۹- نتایج آزمون «پیچش» در سیکل‌های یخبندان و آب-شدگی

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

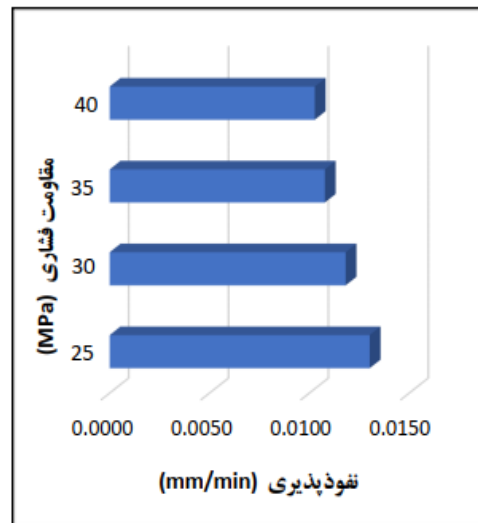
$$p_{00} = 14.73 \quad (۵)$$

$$p_{10} = -0.2081$$

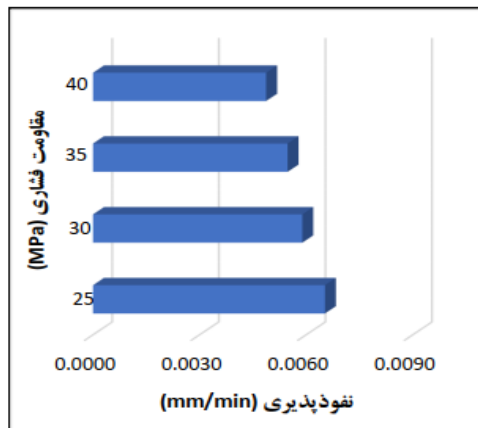
$$p_{01} = 0.08348$$

$$R - square = 0.82$$

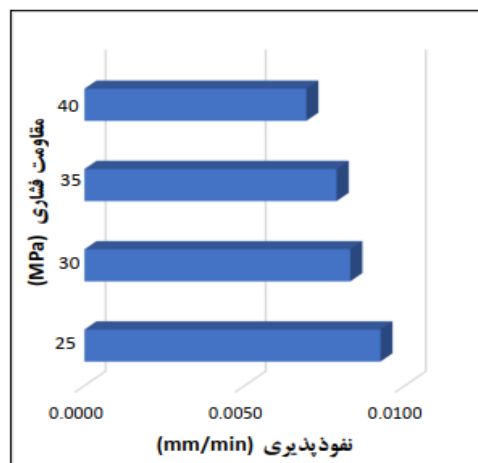
در رابطه ۵،  $X$  نفوذپذیری حاصل از روش «محفظه استوانه‌ای»،  $Y$  مقدار مقاومت سطحی نمونه‌ها و  $Z$  مقادیر عمق نفوذ می‌باشد.  $p_{00}$ ،  $p_{10}$  و  $p_{01}$  ضرایب ثابت صفحه درجه یک بوده که با توجه به شکل ۱۰ با افزایش مقاومت سطحی، نفوذپذیری و عمق نفوذ کاهش پیدا کرده است. همچنین همبستگی بالایی بین متغیرهای مذکور وجود دارد. در واقع بر اساس تحلیل هم‌زمان سه مؤلفه با همدیگر رفتار سطحی و درونی بتن بطور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گرفته که در نتیجه ضریب همبستگی در این نمودار صفحه‌ای



الف- بدون افزودن



ب) افزودنی ژل میکروسیلیس الیافی



ج) افزودنی سوپر ژل

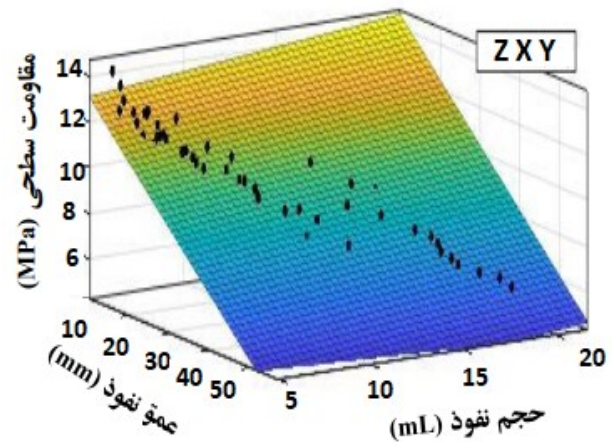
شکل ۸- نفوذپذیری بتن با رده‌های مقاومتی مختلف



باید معرف ریزساختار بتن‌ها باشند. بدین منظور، سه قطعه از هر بتن در ارتفاعات مختلف از سطح آنها تهیه شدند، یک قطعه در نزدیکی سطح نمونه، یک قطعه نزدیک به مرکز نمونه و یک قطعه بین سطح و مرکز نمونه. انتخاب قطعات از قسمت‌های مختلف نمونه‌ها، با توجه به ناهمگن بودن بتن به انجام مقایسه‌ای معقولانه‌تر درباره ریزساختار بتن‌های مورد مطالعه کمک بسزایی می‌کند.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصاویر گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و حاوی افزودنی نشان داده شده است. در این شکل‌ها، تصاویر (الف)، (ب) و (پ) به ترتیب مربوط به قطعات انتخاب شده از نزدیک سطح، بین مرکز و سطح و نزدیک مرکز نمونه‌ها هستند. همانگونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بتن حاوی افزودنی، ساختار بسیار متراکم‌تری نسبت به نمونه‌های بتنی بدون افزودنی دارد. علت این ساختار متراکم‌تر، خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس به دلیل سطح مخصوص بسیار بالای ذرات آن است. بعلاوه، میکروسیلیس به دلیل دارا بودن مقدار بسیار زیادی  $SiO_2$ ، دارای خاصیت پوزولانی بالایی است. در نتیجه این ویژگی، ژل ثانویه C-S-H زیادی تولید شده و فضاهای خالی در نمونه بتنی با این ژل پر می‌شوند. همچنین در ۱۲ دیده می‌شود که بتن بدون افزودنی ساختار متخلخل‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی افزودنی دارد. البته با توجه به ناهمگن بودن بتن، ممکن است این مقایسه دارای دقت بالایی نباشد. اما برای درک ریزساختار این نمونه‌های بتنی بسیار سودمند است.

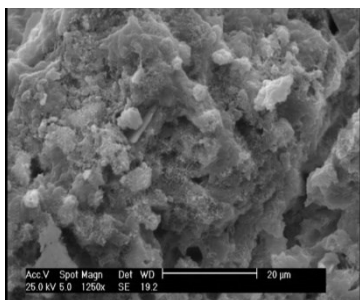
در فضای سه بعدی ۰/۹ محاسبه شده و دقت بهتری در موضوع نفوذپذیری در فضای دو بعدی دارد.



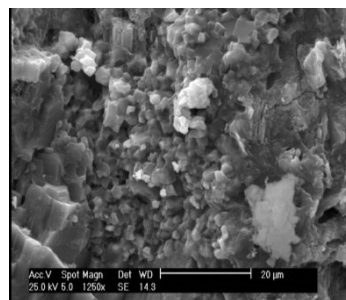
شکل ۱۰- تحلیل سه بعدی نتایج آزمایش «پیش» نفوذپذیری و عمق نفوذ

### ۳-۵- تأثیر افزودنی‌ها بر ریز ساختار بتن

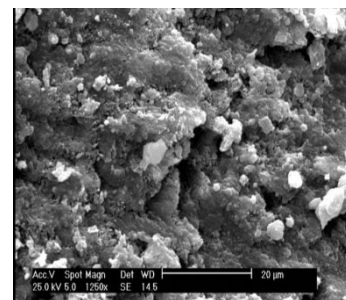
برای تحلیل و بررسی دقیق‌تر مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ضروری می‌باشد که ریزساختار بتن مورد مطالعه قرار بگیرد. بدین منظور نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و با افزودنی آماده گردید. سپس از تصاویر گرفته شده از ریزساختار آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی نتایج حاصله از آزمایش‌های نفوذپذیری استفاده گردید. بتن یک نوع ماده ناهمگن می‌باشد. بنابراین، قطعات انتخاب شده از نمونه‌های بتنی برای عکس‌برداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی



پ) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز



ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز



الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح

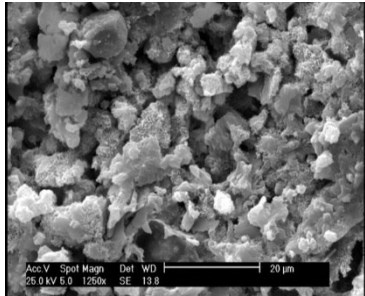
شکل ۱۱- تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی حاوی افزودنی

مقاومت سطحی و حجم نفوذ بتن شده است. سپس تأثیر شرایط حاد محیطی بر موارد مذکور نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در

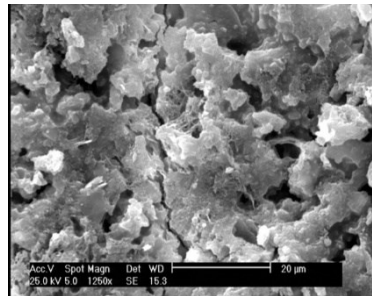
### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های درجا، اقدام به اندازه‌گیری

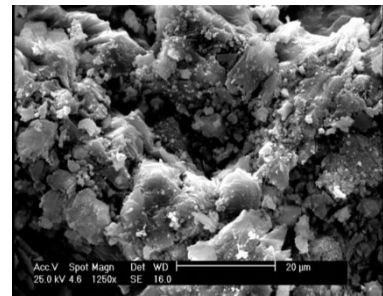
انتها نیز با استفاده از مواد کاهنده نفوذ، اقدام به افزایش دوام بتن در برابر نفوذ مواد مضر به داخل آن شده است. طبق نتایج به دست آمده داریم: - با به کارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای می‌توان عمق نفوذ بتن را با معادله  $y=3110.2x+0.57$  و دقت بالا و بدون شکست نمونه‌ی بتنی اندازه‌گیری نمود.  $X$  مقدار نفوذپذیری حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای بوده که با جایگذاری در معادله، مقدار عمق نفوذ آب در بتن بدون شکستن نمونه قابل محاسبه می‌باشد.



پ) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز



ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز



الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح

شکل ۱۲- تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی بدون افزودنی

(2021) 123-139.

[2] Amadi, I.G. and Amadi-Oparaeli, K.I. Effect of admixtures on strength and permeability of concrete, *The International Journal of Engineering and Science*, 7(7), (2018), 1-7.

[3] Liu, H. Luo, G. Wei, H. and Yu, H. Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios, *Applied Sciences*, 8(8), (2018), 1-16.

[4] Kong, L. and Ge, Y. Mechanism study of effect of coarse aggregate size on permeability of concrete, *ACI Materials Journal*, 112(6), (2015), 767-774.

[5] Halamickova, P. Detwiler, R.J. Bentz, D.P. and Garboczi, E.J. 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.

[6] Houaria, M.B.A. Abdelkader, M. Marta, C. and Abdelhafid, K. Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, *Energy Procedia*, 139(3), (2017), 725-730.

[7] Dashtibadfarid, M. and Afrasiabi, M. Low-permeability concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs, *Int. J. Innov. Eng. Sci.*, 2(2), (2017), 20-24.

[8] Yuan, Y. and Chi, Y. Water permeability of concrete under uniaxial tension, *Structural Concrete*, 15(2) (2014), 191-201.

[9] Xue, W. Zhang, H. Li, H. and Xu, W. Effect of early age loading on the subsequent mechanical and

- مقدار نفوذ آب در بتن تا ۵۰ سیکل یخبندان و آب‌شدگی، به سرعت اتفاق می‌افتد اما پس از آن دارای شیب ملایمی می‌شود. مقدار نفوذ آب در بتن معمولی حدود ۳۶ درصد و در بتن حاوی ژل میکروسیلیس و سوپرژل به ترتیب حدود ۲۲ و ۳۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

- طبق نتایج به دست آمده، نفوذپذیری بتن حاوی ژل میکروسیلیس و سوپرژل به ترتیب حدود ۵۰ و ۳۰ درصد کمتر از نفوذپذیری بتن معمولی می‌باشد.

- مقاومت سطحی بتن تا ۵۰ سیکل یخبندان و آب‌شدگی دارای کاهش با شیب تندی بوده اما پس از آن با شیب ملایم‌تری دچار کاهش شده است. حدود ۷۸ درصد کاهش مقاومت سطحی بتن تا ۵۰ سیکل اول رخ داده و ۲۲ درصد باقیمانده در ۱۰۰ سیکل بعدی اتفاق افتاده است.

- نفوذپذیری دارای رابطه معکوس با مقاومت فشاری می‌باشد. مقدار آب نفوذ کرده در بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال حدود ۲۱ درصد کمتر از آب نفوذ کرده در بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد.

## ۵- مراجع

[1] Akkaya, A. and Çağatay, I.H. Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods, *Construction and Building Materials*, 294(6),

- [21] Naderi M. New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, *Journal of Testing and Evaluation*. 35(6), (2007), 73-90.
- [22] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M. 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(2), (2021), 2377-2395.
- [23] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M. Experimental and Finite Element Study to Determine the Mechanical Properties and Bond Between Repair Mortars and Concrete Substrates. *J. Appl. Comput. Mech.*, 8(2), (2022), 493-509.
- [24] 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, Reg. N. 67726, (2010), Iran.
- [25] Naderi, M. Valibeigi, R. and Mirsafi, M. Investigating the effect of type of aggregate on strength and permeability of concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(1), (2017), 109-126.
- [26] Amini, A.F. Naderi, M. and Maleki, B. Estimating the permeability of the porous medium of concrete for petroleum derivatives using the cylindrical chamber method. *Sharif Civil Engineering Journal*. 33(2), (2018), 81-93.
- [27] ASTM C136-01, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2001).
- [28] ASTM C127, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of Coarse aggregate, (2015).
- [29] ASTM C128-15, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
- [30] ACI 211.1, Concrete Mix Design, ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete. (1997).
- [31] 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.
- [32] ASTM C494, Standard specification for chemical admixtures for concrete, in, ASTM West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [33] BS EN 12390-3. Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens. BS Standards. ISBN 9780580984426, (2019).
- permeability properties of concrete and its mechanism analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, 14(4), (2021), 1208-1221.
- [10] Sakai, Y. Yokoyama, Y. and Kishi, T. Relationship among the permeation rate of water into concrete, the mix design, curing, and the degree of drying, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(10). (2017), 595-602.
- [11] Liang, M. Feng, K. He, C. Li, Y. An, A. and Guo, W. A meso-scale model toward concrete water permeability regarding aggregate permeability, *Construction and Building Materials*, 261(3), (2020), 1-15.
- [12] Hossain, K. and Lachemi, M. Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34(4). (2004), 695-702.
- [13] Cao, D. Liu, J. Zhou, Y. Ge, W. and Zhang, X. Experimental Study on the Effect of Freeze-Thaw Cycles on Axial Tension and Compression Performance of Concrete after Complete Carbonization. *Advances in Civil Engineering*, 27(4), (2021), 1-16.
- [14] Naderi, M. and Smailzadeh, S. Ultimate strength of concrete beams strengthened by CFRP fabric and laminates, at high and freezing temperatures. *Amirkabir Journal of science and Research*, 48(1), (2016), 17-20.
- [15] Etman, A. and Ahmed. Effect of freezing-thawing on concrete behavior. *CHALLENGE JOURNAL OF CONCRETE RESEARCH LETTERS*. 9(1), (2018), 21-36.
- [16] Boyd, J. and Leone, A. Effect of freeze-thaw cycling on fatigue behaviour in concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 652, (2019), 012028.
- [17] Lee, S. Park, S. Kim, D. and Kang, J. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Performance of Concrete Containing Water-Cooled and Air-Cooled Slag. *Appl. Sci.* 72(11), (2021), 1-13.
- [18] Naderi, M. and Hajinasiri, A. Examining the adhesion quality of flexible sheets against temperature changes, wet and dry, and ice and ice melting. *The 6th National Congress of Civil Engineering, Iran*. (2013).
- [19] Hassani, M. Vessalas, K. Sirivivatnanon, V. and Baweja, D. Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete, *ACI Mater. J*, 114(5), (2017), 911-922.
- [20] Naderi, M. Kaboudan, A. and Kargarfard, K. Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), (2022), 25-43.

- [34] ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [35] E. Ghiasvand, B. Zaree, P. Sharifi, and E. Saraee, "Effect variation of maximum of size of aggregate on permeability of common concretes", 7th annual national concrete conference, Tehran, (2015).
- [36] Building and housing research center. Researches First international concrete and development conference. Tehran: Building and housing research center pub. (2004).
- [37] Final Report National concrete pavement technology center. Investigation into freezing-thawing durability of low-permeability concrete with and without air entraining agent. Tehran, (2009).
- [38] Tao, J. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-sio<sub>2</sub>. Cement and Concrete Research, 35(3), (2005), 1943-1947.
- [39] Montes, P. Bremmer, T.W. and Castellanos, F. Interactive effects of fly ash and CNI on corrosion of reinforced high-performance concrete. Materials and Structures, 39(2), (2006), 201-210.
- [40] S. Ahmad, A.K. Azad, and K.F. Loughlin, A study of permeability and tortuosity of concrete. 30th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, (2005), 23 - 24.
- [41] Hefnawy, E. and Ibrahim, A.A. Comparative study on strength, permeability and sorptivity of concrete and their relation with concrete durability. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). 4(4), (2014), 123-131
- [42] Koliass, S. and Georgiou, C. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. Journal of Cement & Concrete Composites. 27(5), (2005), 211-216.
- [43] Building and Housing Research Center, National durability of concrete code in Persian Gulf and Oman Sea, Issue: 428. Tehran. Building and Housing Research Center pub. (2014), 34-35.
- [44] DIN 1048-5. Testing Concrete: Testing of Hardened Concrete (Specimens Prepared in Mould). Germany. (1991).
- [45] BS EN 12390-8. Testing Hardened Concrete, Part 8 Depth Of Penetration Of Water Under Pressure. BRITISH STANDARD. (2009).

## **The effect of acute environmental conditions on water penetration rate and surface strength of concretes containing fibrous microsilica gel and super gel using in situ tests**

**Ali Saberi Varzaneh \***

**Ph.D, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.**

**Mahmood Naderi**

**Professor, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.**

**Majid Parhizkari**

**Ph.D Student, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.**

### **Abstract**

The mechanical and chemical characteristics of concrete undergo changes in extreme environmental conditions, which often reduce the strength and durability of concrete. Therefore, the use of additives that increase the reliability of concrete in acute conditions is required. It is also important to use tests that are able to measure the permeability and resistance of concrete both in situ and in the laboratory without damaging the concrete. Therefore, it was decided to investigate the effect of some additives on the durability of concrete, which are recently widely used in Iran. There is not much research on the effect of these materials on the durability and reliability of concrete in extreme environmental conditions. In this research, by using in-situ cylindrical chamber and twist-off tests, the effect of different cycles of freezing and thawing on the permeability and surface resistance of ordinary concretes and concretes was evaluated. Contains additives. Contrary to DIN 1048 and BS EN 12390-8 standards, which require breaking concrete to measure permeability, the volume and depth of water penetration can be measured in the cylindrical chamber test without damaging the concrete. The obtained results show that by using the new cylindrical chamber test, the penetration depth of concrete can be measured with high accuracy without the need to break the concrete sample. Also, about 78% decrease in the strength of the surface layer of concrete occurred in the first 50 cycles and the remaining 22% occurred in the next 100 cycles. The permeability of concrete containing microsilica gel and supergel was calculated to be about 50% and 30% lower than the permeability of normal concrete, respectively.

**Keywords:** Strength, Penetration Rate, Innovative Tests, Severe Winter Conditions.

---

\* Corresponding Author: Ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

