



## تأثیر سیکل‌های مختلف دمایی بر نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ

محمود نادری<sup>۱</sup>، علی صابری ورزنه<sup>۲\*</sup>، مجید پرهیزکاری<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

### کلمات کلیدی:

آزمون درجا

سیکل‌های دمایی

مقاومت

نرخ نفوذ

بتن

**خلاصه:** از دلایل مهم بروز ترک و تغییر شکل در المان‌های بتنی مخصوصاً در ناحیه سطحی، شرایط مختلف اقلیمی و تغییرات دمایی می‌باشد. در تحقیقات قبلی در ارتباط با رابطه‌ی نرخ نفوذ با مقاومت سطحی، پژوهش‌های زیادی صورت پذیرفته که دلیل وجود نداشتن روش‌های ساده یا قیمت بالای تجهیزات برای ارزیابی مقاومت سطحی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کاهش مقدار نفوذپذیری بتن وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از مواد کاهنده نفوذ می‌باشد. در این مقاله از مواد کاهنده نفوذ با نام‌های تجاری سوپرژل و مزوکریت استفاده شده است که امروزه در ایران بصورت فراوان در حال استفاده است. برای ارزیابی مقاومت سطحی از آزمون ساده "پیش" استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری نیز از آزمون "محفظه استوانه‌ای" استفاده گردید. برای اعمال چرخه‌های تغییرات دمایی، نمونه‌ها تحت سیکل‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه قرار گرفتند. نتایج حاصله بیانگر تأثیر مثبت مواد کاهنده نفوذ بر مقاومت سطحی بتن تحت شرایط تغییرات دمایی بوده است به گونه‌ای که در سیکل ۱۵۰ام، مقاومت سطحی بتن معمولی حدود ۳۰ درصد کاهش داشته اما کاهش مقاومت سطحی بتن‌های دارای مواد کاهنده نفوذ کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین افزایش نفوذپذیری بتن معمولی در سیکل ۱۵۰ام برابر ۴۸۶ درصد بدست آمده اما این مقدار در بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ حدود نصف این مقدار می‌باشد. در ادامه نیز با استفاده از نرم‌افزار متلب در فضای سه‌بعدی مشخص گردید که ارتباط نفوذپذیری با مقاومت بتن به یکدیگر نزدیک بوده و از نظر فرمول‌بندی با معادله صفحه درجه یک با ضریب همبستگی حدود ۹۱ درصد برقرار است.

### ۱- مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین مصالح کاربردی و به صرفه با انعطاف‌پذیری مناسب در صنعت ساختمان سازی است. بتن در برابر شرایط محیطی متغیر آب و هوایی و با گذشت زمان، دچار آسیب شده و استحکام و مقاومت خود را از دست می‌دهد. نفوذپذیری و مقاومت در طول عمر و دوام بتن دارای اهمیت زیادی می‌باشد. تأثیر عوامل آسیب‌رسان به سازه‌های بتنی به واسطه تغییرات دما در طول سال‌ها و تغییرات فصلی از زمستان تا تابستان، منجر به کاهش عمر مفید سازه‌ها می‌شود [۱]. در مخازن و سدهایی که برای نگهداری آب استفاده می‌شوند و فشارهای هیدرواستاتیکی زیادی دارند، نفوذپذیری عامل بسیار مهمی می‌باشد. تحت شرایط تغییرات دما که در طول سال به ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد ممکن است برسد امکان افزایش ترک‌ها و منافذ ریز در بتن بیشتر شده که در این حالت امکان نفوذ آب به داخل بتن افزایش پیدا کرده و سبب کاهش مقاومت سازه در برابر بارهای وارده می‌شود [۲].

در تحقیقات انجام شده نحوه عمل‌آوری بر میزان نفوذپذیری بتن تأثیرگذار است [۳]. در نحوه انجام آزمایش نفوذپذیری در استاندارد بریتانیا؛ نمونه‌های مکعبی بتنی در مدت زمان سه روز تحت فشار آب به مقدار ۵ بار قرار گرفته و سپس بیشترین مقدار عمق نفوذ آب در مقطع برش خورده آن اندازه‌گیری می‌گردد [۴]. برای اندازه‌گیری حجم آب نفوذ کرده به داخل نمونه مکعبی بتنی در این تحقیق از آزمون "محفظه استوانه‌ای" ابداعی توسط نادری [۵]، استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌ها مقرون به صرفه بوده و به آسانی و در موقعیت‌های مختلف قابل اعمال می‌باشد [۶]. در روش‌های استاندارد بریتانیا و "محفظه استوانه‌ای" ضریب همبستگی زیادی بین نتایج حاصل از این دو آزمایش در میزان نفوذپذیری نمونه مکعب‌های بتنی دیده می‌شود [۷]. در تحقیق دیگر رابطه مستقیمی بین حجم منافذ نفوذپذیر موجود و نفوذپذیری بتن به دست آمده است [۸]. باید توجه داشت طراحی و بررسی عمر مفید سازه فقط بر اساس مقاومت، نمی‌تواند شرایط مربوط به استحکام سازه را تأمین کند. از مشکلات اصلی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir



جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ (درصد)

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

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

افزایش مقاومت فشاری بتن، نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد، اما به تدریج از نرخ این کاهش کاسته می‌شود. همچنین معادله‌ای ریاضی برای بیان رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری ارائه دادند [۲۵]. در تحقیق حاضر، نفوذپذیری و مقاومت‌های سطحی و فشاری نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ با نام‌های تجاری سوپر ژل و مزوکریت تحت تأثیر سیکل‌های مختلف تغییرات دمایی بررسی شده است. تغییرات دمایی در بازه‌های زمانی ۴ ساعته در داخل آن با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و در هوای آزاد در دمای ۲۰ سانتیگراد اعمال گردیده است. نتایج حاصله بیانگر این است که رابطه معکوسی میان مقاومت سطحی با نرخ نفوذپذیری وجود دارد به گونه‌ای که نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" با مقادیر آزمایش "پیچش" نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد می‌باشد که در نتیجه با افزایش مقدار نرخ نفوذپذیری و افزایش فضای خالی و خروج رطوبت از بتن مقدار مقاومت سطحی بتن کاهش پیدا می‌کند. این رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری دارای ضریب ۹۰ درصد می‌باشد.

## ۲- کارهای آزمایشگاهی

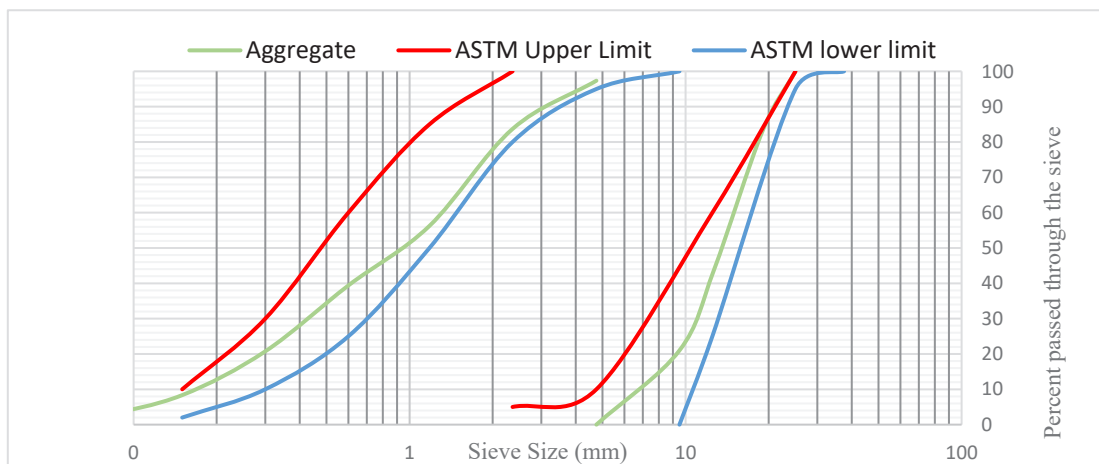
### ۲-۱- مصالح استفاده شده

مواد مورد استفاده عبارت‌اند از: سیمان تیپ ۲، آب شرب شهری، چسب از نوع رزین اپوکسی و فوق روان‌کننده از نوع پلی‌کربکسیلات. در جدول شماره ۱ مشخصات شیمیایی سیمان استفاده شده ارائه گردیده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه) بر طبق استاندارد ASTM C136 [۲۶] انجام گرفت. میزان جذب آب شن و ماسه استفاده شده بر اساس استانداردهای ASTM C127 [۲۷] و ASTM C128 [۲۸] به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ درصد محاسبه شد. چگالی ماسه و شن با رطوبت سطح خشک و در حالت اشباع (SSD) به ترتیب برابر ۲۴۶۸ و ۲۵۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

که بیشتر در سازه‌های بتنی ایجاد می‌شود، می‌توان به تخریب سازه‌های بتنی بر اثر نشست و نفوذ آب به داخل بتن اشاره کرد [۹]. این مشکل در ارتباط با تاسیساتی که در ذخیره مایعات مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند بسیار مهم است [۱۰]؛ بنابراین کاربرد مواد کاهنده نفوذ بتن در تاسیسات بتنی دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. تحقیقات زیادی توسط دانشمندان در ارتباط با عوامل مهم بر نفوذپذیری بتن انجام گردیده است. از جمله این موارد مهم می‌توان به مقدار آب به سیمان [۱۱]، وزن سنگ‌دانه‌ها [۱۲]، ابعاد سنگ‌دانه‌ها [۱۳]، وضعیت و شکل میکروسکوپی دانه‌بندی و ساختار داخلی [۱۴]، شرایط مواد افزودنی [۱۵]، اثر تنش ناشی از بارهای وارده [۱۶] و اثر افزایش دما [۱۷] اشاره نمود.

در این تحقیق برای بررسی مقاومت سطحی نمونه‌های مکعبی بتنی از روش "پیچش" استفاده شده است. این روش در زمره روش‌های درجای نیمه مخرب به حساب می‌آید. این آزمایش توسط نادری برای بررسی مقاومت سطحی انواع مصالح ابداع گردیده است [۱۸]. آزمون "پیچش" یک روش اقتصادی با دقت بالا، هزینه اندک، خرابی کم و با قابلیت اجرای راحت در همه مکان‌ها در تعیین مقاومت فشاری بتن و انواع مصالح پر کاربرد ساختمانی می‌باشد. برای بررسی مقاومت سطحی انواع ملات و بتن با استفاده از آزمون "پیچش" تحقیقات زیادی انجام شده است. در یک پژوهش با بکارگیری آزمون پیچش، رابطه بین مقاومت سطحی و مقاومت فشاری با دقت زیادی محاسبه شد [۱۹]. در پژوهش دیگری با مصرف سیمان تیپ ۲ تحت شرایط متفاوت عمل‌آوری، ضریب همبستگی ۹۴ درصد میان نتایج حاصل از مقاومت سطحی آزمایش "پیچش" و مقاومت فشاری در نمونه‌های مکعبی بتنی محاسبه شده است [۲۰].

تحقیقات وسیعی در زمینه تأثیر مواد افزودنی بر مشخصات ساختاری و نفوذپذیری بتن انجام شده است [۲۱-۲۴]. برخی از محققان به بررسی ارتباط میان مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل با نسبت‌های متفاوت آب به سیمان و وزن سنگ‌دانه‌ها به سیمان پرداخته‌اند و دریافته‌اند که با



شکل ۱. منحنی‌های دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

Fig. 1. Granulation curves of aggregates

جدول ۲. اطلاعات فنی چسب استفاده شده در 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 یک‌به‌یک	طوسی	۱۰ ساعت	۹۰ دقیقه	۷۰

جدول ۳. اطلاعات فنی افزودنی مزوکریت

Table 3. Mezukret additive technical information

نوع	رنگ	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
پودر	کرم	۱/۴

بتن سخت شده می‌گردد. در جدول شماره ۳ اطلاعات فنی ماده مزوکریت ارائه شده است.

– سوپر ژل: مقدار مصرف سوپرژل بسته به طرح اختلاط بتن حدود ۳ تا ۱۰ درصد وزن سیمان مصرفی خواهد بود. سوپر ژل را می‌توان به دو صورت به بتن اضافه نمود: پس از اختلاط کامل تمام اجزاء سازنده بتن با کل آب اختلاط بتن یا بخشی از آن مخلوط نموده و به مخلوط بتنی اضافه شود. در جدول شماره ۴ اطلاعات فنی افزودنی سوپرژل ارائه شده است. ظاهر و رنگ مواد کاهنده نفوذ در شکل ۲ قابل مشاهده است.

اطلاعات فنی چسب رزین اپوکسی در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

مواد مصرفی کاهنده نفوذ از انواع افزودنی‌های داخل بتن و بر اساس درصدی از سیمان مصرف شده بوده که به شرح ذیل است:  
 – ماده کاهنده نفوذ با نام تجاری مزوکریت گونه‌ی جدیدی از مواد افزودنی بتن است که برای بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام ساختار بتن‌های آماده، در محل اجرا به بتن اضافه می‌گردد. این افزودنی علاوه بر زیاد کردن اسلامپ (افزایش کارایی) سبب کاهش جذب آب و نفوذپذیری

جدول ۴. اطلاعات فنی افزودنی سوپرژل

Table 4. Super gel additive technical information

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



ب) سوپرژل  
(b) Super gel



الف) پودر مزوکریت  
(a) Mezukret powder

شکل ۲. رنگ و ظاهر مواد مصرفی کاهش‌دهنده نفوذ

Fig. 2. Color and appearance of penetration reducing consumables

می‌آید. سپس اگر مقدار شن و سیمان و آب در یک متر مکعب بتن از وزن مخصوص بتن تازه کم شود، مقدار ماسه در یک متر مکعب محاسبه خواهد آمد. طرح اختلاط نمونه‌های مکعبی بتنی در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. در این پژوهش از ۴ طرح اختلاط متفاوت استفاده شده است که مقاومت فشاری آنها در چهار گروه ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۳۰] و ASTM C494 [۳۱] و راهنمای کارخانجات تولیدکننده، مقادیر افزودنی‌های کاهش‌دهنده نفوذ نسبت به درصد وزنی سیمان مصرفی در نمونه‌های بتنی حاوی مزوکریت و سوپر ژل به ترتیب برابر ۶ و ۵ درصد می‌باشد. با استفاده از آزمون اسلامپ، مقدار روانی بتن‌های مختلف تعیین و در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

جهت تهیه نمونه‌ها از روش گام به گام ACI211.1 [۲۹] استفاده شد. بر اساس روش مطرح شده، برای تعیین مقدار مورد نیاز مصالح ابتدا می‌بایست مقدار روانی بتن را تعیین نمود. میزان روانی بتن برای کارهای بتنی ساختمانی 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 نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها و تعیین اسلامپ بتن، نسبت به اندازه‌گیری مقدار حدودی آب مصرفی و هوای غیر عمد محبوس در بتن اقدام نمود. بعد از آن طبق استاندارد مذکور می‌بایست نسبت آب به سیمان را بر اساس مقادیر پیشنهادی مقاومت فشاری اولیه تعیین نمود. در ادامه با داشتن نسبت آب به سیمان و همچنین وزن آب، می‌توان جرم سیمان را اندازه‌گیری نمود. سپس با استفاده از مقادیر مدول نرمی و دانه بندی، وزن درشت دانه‌ها بدست

جدول ۵. اطلاعات طرح اختلاط بتن

Table 5. Specifications of concrete mixing plan

مقاومت فشاری MPa	نام گذاری	آب به سیمان	آب (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص بتن kg/m <sup>3</sup>
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

جدول ۶. مقدار اسلامپ بتن ها (میلی متر)

Table 6. Amount of concrete slump (mm)

	C25	C30	C35	C40
بتن بدون افزودنی	۹۵	۸۸	۸۲	۷۷
بتن حاوی سوپر ژل	۱۰۹	۱۰۲	۹۷	۹۱
بتن حاوی مزوکریت	۱۰۸	۹۹	۹۵	۹۰



ب) نحوه آماده ساختن نمونه ها  
(b) How to prepare samples



الف) نمونه های بتنی در گرمخانه  
(a) Concrete samples in the oven

شکل ۳. انجام سیکل های تغییرات دما

Fig. 3. doing different temperature cycles

دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نگهداری شده و سپس نمونه ها از گرم کن خارج و در فضای آزاد و در دمای ۲۰ درجه در مدت ۴ ساعت سرد می شود که به این شکل یک سیکل تغییرات دمایی کامل می شود (شکل ۳).

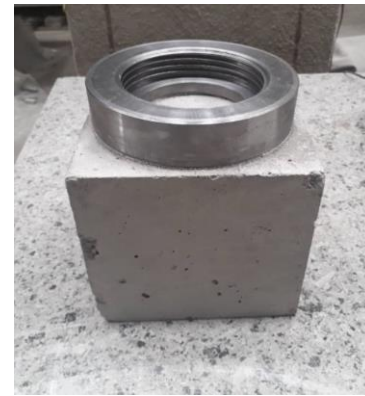
برای بررسی تاثیر سیکل های تغییرات دما بر مقاومت سطحی و نفوذپذیری بتن از تغییرات دمایی در حدود ۵۵ تا ۶۰ درجه سانتی گراد و در بازه های زمانی ۴ ساعته استفاده شد [۳۲]. جهت اعمال دما در محیط آزمایشگاه، نخست نمونه های مکعبی بتنی در گرم کن برای مدت ۴ ساعت در



ج) اجزای مختلف دستگاه  
(c) Various components of the device



ب) تثبیت دستگاه  
(b) Installation of the device



الف) رینگ‌های محفظه استوانه‌ای  
(a) "Cylindrical chamber" rings

#### شکل ۴. آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 4. "Cylindrical chamber" test

#### ۲-۴- روش "پیچش"

آزمایش "پیچش"، یک روش مفید و کارآمد در تعیین مقاومت سطحی و فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در محل و چه در آزمایشگاه است. به‌عنوان یک روش دقیق، سریع و با هزینه پایین و با تخریب جزئی، در گروه آزمایش‌های نیمه مخرب قرار می‌گیرد. این آزمایش در وضعیت‌های قائم، افقی و به‌طور کلی بر روی هر سطح مناسب به آسانی و بدون احتیاج به برنامه‌ریزی قبلی قابل بهره‌برداری است. تجهیزات مورد نیاز در این آزمایش، بسیار ساده و در دسترس بوده و انجام آزمایش نیاز به آموزش چندانی ندارد. استفاده از آزمایش "پیچش" بر این اساس است که یک استوانه فلزی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، با استفاده از چسب مخصوص، به سطح محل انجام آزمایش چسبانده می‌شود (شکل ۵-الف). بعد از چسباندن استوانه‌ی فولادی، با استفاده از یک ترک‌متر معمولی، به استوانه فلزی، گشتاور پیچشی اعمال می‌گردد (شکل ۵-ب) تا استوانه فلزی از روی سطح بتن جدا شود (شکل ۵-ج). خرابی حاصل از انجام این آزمایش به‌راحتی با استفاده از یک ملات مناسب ترمیم می‌شود. رابطه بین تنش برشی ایجاد شده در زیر استوانه فولادی با لنگر پیچشی اعمالی، مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

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

جهت انجام آزمایش نفوذپذیری و پیچش از تعداد ۴۸ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن‌ها از تعداد ۱۴۴ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر که در آب آهک عمل‌آوری شده بودند، استفاده گردید. برای انجام آزمایش نفوذپذیری شامل ۳ حالت مختلف شامل یک حالت بدون افزودنی و دو حالت شامل افزودنی‌های کاهنده نفوذ و چهار رده مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال و به ازای چهار سیکل تغییرات دمایی با چرخه‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ استفاده شده است.

#### ۲-۳- آزمایش محفظه استوانه‌ای

نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که در ابتدا سطح بتن مورد نظر کاملاً خشک و با برس تمیز می‌شود و سپس صفحه فلزی دایره‌ای دستگاه با چسب مخصوص به سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۴-الف). سپس دستگاه روی رینگ دایره‌ای بسته می‌شود (شکل ۴-ب). در ادامه، محفظه دستگاه با کمک کیف و لوله پلاستیکی پر از آب شده و میکرومتر عقربه‌ای روی اهرم تنظیم می‌گردد. با پیچاندن اهرم دستی، فشار ثابت ۵ بار به آب تامین شده که توسط فشارسنج عقربه‌ای قابل مشاهده است. مقدار حجم نفوذ آب، با مشاهده میکرومتر عقربه‌ای، در زمان‌های مختلف ثبت می‌شود. در شکل ۴-ج قسمت‌های مختلف دستگاه محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است.



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



(الف) استوانه فلزی  
(a) Metal cylinder



(ج) آسیب ناچیز ناشی از آزمون  
(c) Low damage caused by the test

شکل ۵. نحوه انجام آزمون پیچش

Fig. 5. How to perform "twist-off" test

### ۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- اثر مواد کاهنده نفوذ بر مقاومت سطحی بتن تحت سیکل‌های مختلف دمایی

نمونه‌های مکعبی بتنی تحت تغییرات دمایی در بازه ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در شکل ۷-الف، میانگین مقاومت سطحی بتن‌های با رده‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۷-ب نیز درصد کلی کاهش مقاومت سطحی نمونه‌ها با استفاده از آزمون پیچش نشان داده شده است.

مطابق شکل ۷ مقاومت سطحی بتن معمولی در سیکل‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ به ترتیب برابر ۹، ۶/۸، ۶/۷ و ۶/۴ مگاپاسکال می‌باشد. در

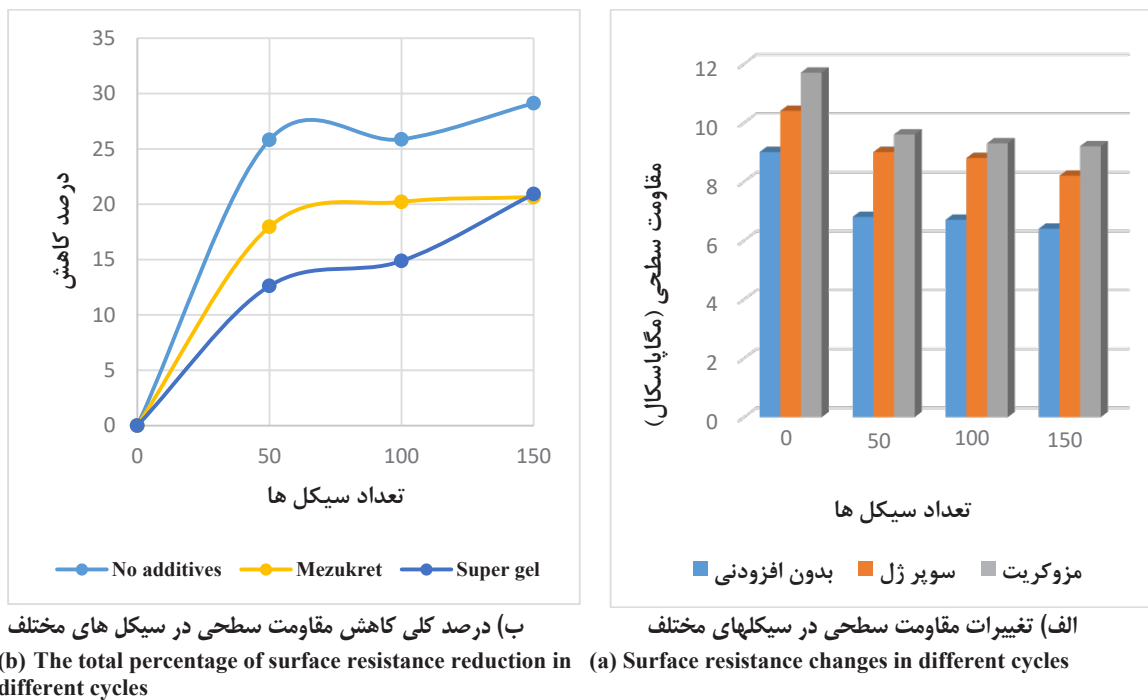
که در آن  $\tau$  مقاومت سطحی (MPa)، T لنگر پیچشی (N.mm)، r شعاع استوانه فولادی (mm) و J ممان قطبی دوم سطح ( $\text{mm}^4$ ) می‌باشد. البته در این آزمون می‌توان مستقیماً همان لنگر پیچشی ایجاد شده در آزمون را به مقاومت فشاری ربط داد.

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری نیز از جک بتن شکن ۲۰۰ تنی دیجیتالی استفاده شد. نمونه‌های مکعبی بتنی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر بعد از اعمال چرخه تغییرات دما و بعد از هر ۵۰ سیکل تا ۱۵۰ سیکل زیر جک بتن شکن تحت بارگذاری تا مرحله گسیختگی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 [۳۳] انجام شده است (شکل ۶).



شکل ۶. انجام آزمون مقاومت فشاری

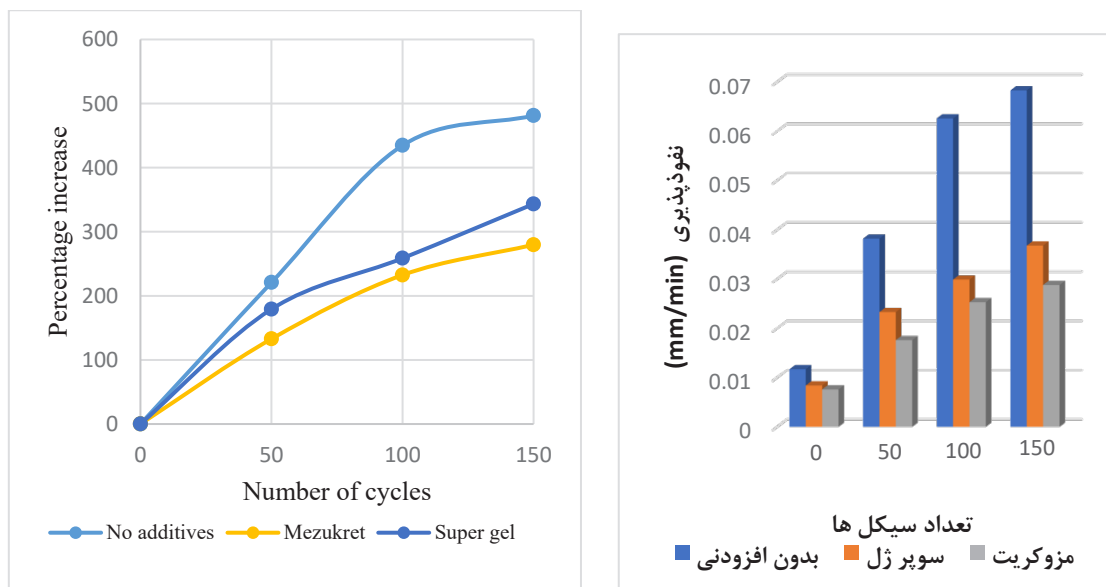
Fig. 6. compressive strength" test



شکل ۷. نتایج حاصل از آزمون "پیچش" تحت اثر سیکل‌های مختلف تغییرات دمایی

Fig. 7. The results of the " twist-off " test under the effect of different cycles of temperature changes





(b) The overall percentage of permeability increase in different cycles (a) Permeability changes in different cycles

شکل ۸. نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" تحت اثر سیکل‌های مختلف تغییرات دمایی

Fig. 8. The results of the "Cylindrical chamber" test under the effect of different cycles of temperature changes

از میان منافذ داخل بتن تبخیر شده و خارج می‌شود. وجود همین منافذ و فضاهای خالی در داخل بتن و سطح بتن، کاهش مقاومت سطحی بتن را به دنبال داشته و با شکل‌گیری ترک‌های ریز در ظاهر بتن روند کاهش مقاومت تسریع می‌شود. هنگامی که بتن در معرض گرما قرار می‌گیرد، دو تغییر اساسی در بتن به وجود می‌آید: ۱- زمانیکه بتن تحت تغییرات دما قرار می‌گیرد، مشخصات مکانیکی آن به دلیل تغییرات دمایی که به مصالح وارد می‌شود و تغییرات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، کمتر می‌شود، ۲- حالتی به نام "ورقه شدن" که در پی آن بخشی از سطح بتن دچار آسیب و فرسایش شده و باعث از بین رفتن خواص ظاهری بتن می‌گردد، که می‌تواند ناشی از تغییرات در داخل مصالح مصرفی در درون و سطح بتن باشد.

۳-۲- اثر مواد کاهنده نفوذ بر نفوذپذیری بتن تحت سیکل‌های مختلف دمایی

در شکل ۸-الف، میانگین نفوذپذیری بتن‌های با رده‌های مقاومتی مختلف نشان داده شده است. در شکل ۸-ب نیز درصد کلی افزایش نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" قابل مشاهده است.

صورتی که مقاومت سطحی بتن حاوی سوپرژل در سیکل‌های فوق به ترتیب برابر ۱۰/۴، ۹، ۸/۸ و ۸/۲ مگاپاسکال بوده و این مقادیر برای بتن حاوی مزوکریت به ترتیب برابر برابر ۱۱/۷، ۹/۶، ۹/۳ و ۹/۲ مگاپاسکال می‌باشد. مشاهده می‌شود که میزان کاهش مقاومت سطحی در نمونه‌های فاقد افزودنی بیشتر از نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ می‌باشد. با اعمال ۱۵۰ سیکل، مقاومت سطحی بتن معمولی حدود ۲۹ درصد کاهش داشته اما کاهش مقاومت سطحی بتن‌های حاوی مواد کاهنده حدود ۲۰ درصد می‌باشد. در پژوهش‌های دیگر نیز نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده است. در یک پژوهش مقدار مقاومت سطحی به دست آمده با استفاده از آزمون پیچش روی بتن معمولی برابر حدود ۸ مگاپاسکال به دست آمده است که در این تحقیق نیز برابر ۹ مگاپاسکال شده است [۳۴]. در مورد نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ، به دلیل کمتر شدن فضاهای خالی لذا مقدار مقاومت سطحی نیز کمتر تحت تاثیر چرخه‌های دمایی قرار گرفته است. در خصوص کاهش مقاومت سطحی نمونه‌ها بعد از اعمال تغییرات دمایی می‌توان گفت که تغییرات دما باعث ایجاد تنش‌هایی در بتن شود. چنانچه این تنش‌ها از مقاومت کششی بتن بیشتر باشد سبب ترک خوردگی در بتن می‌گردند. با اعمال تغییرات دما، به تدریج رطوبت داخل بتن کاهش پیدا کرده و آب

تغییرات دمایی می‌توان گفت زمانی که بتن در معرض تغییرات دما و تنش‌های ناشی از آن قرار می‌گیرد، تغییرات شیمیایی و فیزیکی در مواد تشکیل دهنده بتن رخ می‌دهد که باعث ناسازگاری دمایی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها به جهت برابر نبودن ضریب انبساط حرارتی این دو می‌شود. خروج آب از منافذ و ترک‌های ریز داخل بتن بر اثر چرخه تغییرات دما و به صورت سیکل‌های مداوم نهایتاً باعث گسترش فضاهای خالی در بین ترک‌ها و منافذ داخل بتن شده و کاهش مقاومت فشاری بتن را به دنبال دارد.

### ۳-۴- رابطه مقاومت با نفوذپذیری نمونه‌ها

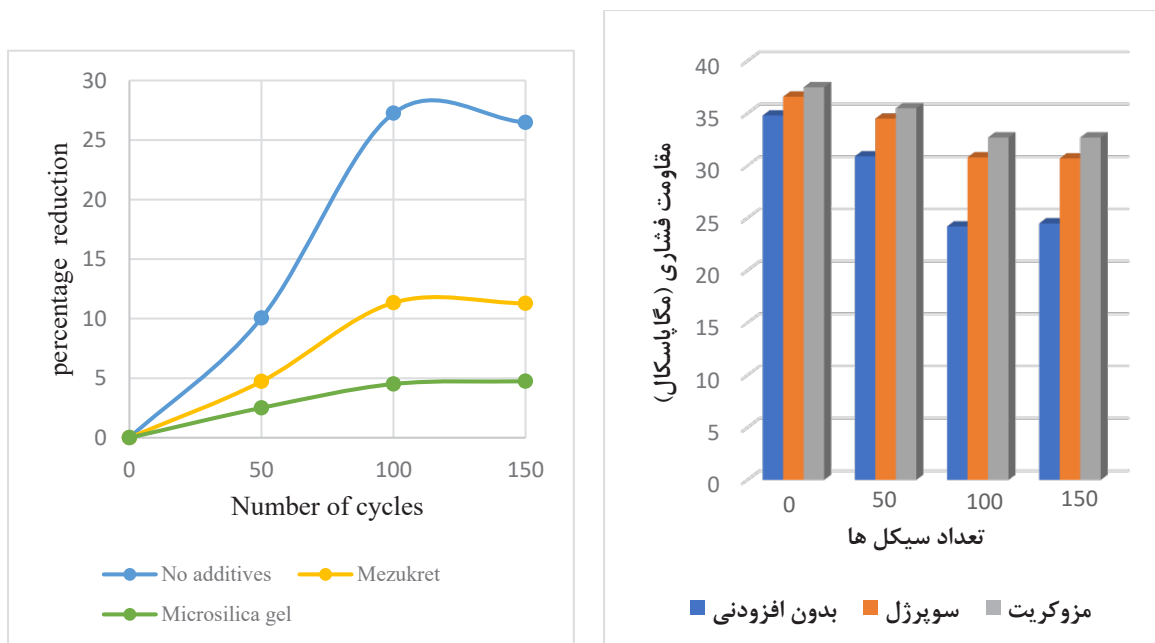
در شکل ۱۰-الف رابطه‌ی بین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" نشان داده شده است. بر اثر سیکل‌های تغییرات دمایی، مقدار نفوذپذیری آن‌ها رو به افزایش است و به همان ترتیب مقاومت فشاری رو به کاهش می‌باشد. از شکل ۸-الف مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از روش "محفظه استوانه‌ای" با مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، دارای ضریب ضریب همبستگی ۹۰ درصد می‌باشد. در شکل ۱۰-ب با ادامه چرخه تغییرات دما و با افزایش نفوذپذیری میزان مقاومت سطحی کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" با مقادیر آزمایش "پیچش" نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد می‌باشد. وجود ریزترک‌های ناشی از افزایش تعداد چرخه‌های تغییرات دما در ناحیه فصل مشترک بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه، پیش‌بینی مقاومت را از روی ارتباط دقیق فضاهای خالی مشکل می‌سازد. قطعاً با افزایش سیکل‌های تغییرات دما میزان آسیب‌ها به سطح بتن بیشتر شده و با گذشت زمان این آثار به صورت ترک‌های ریز در سطح بتن و پوسته پوسته شدن سطوح نمونه‌های بتنی به خوبی پدیدار می‌شود. البته در نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ آثار خرابی و فرسایش در سطح بتن نسبت به نمونه‌های فاقد مواد کاهنده نفوذ، کمتر بوده و در نتایج به دست آمده بر اساس ارتباط مستقیمی که میان مقاومت فشاری و مقاومت سطحی وجود دارد رابطه معکوسی میان مقاومت سطحی و نرخ نفوذپذیری قابل بیان می‌باشد. ولی با توجه به نمودار در قسمت‌هایی از آن که میزان نرخ نفوذ کاهش پیدا کرده، پراکندگی نقاط نیز بیشتر شده و تحلیل رابطه میان مقاومت سطحی و نرخ نفوذپذیری سخت‌تر می‌شود. در شکل ۱۰-ج ارتباط بین نتایج مقاومت سطحی حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی تحلیل شده و به صورت یک معادله خط محاسبه شده و با ترسیم نمودار و برازش تابع مربوطه می‌توان رابطه نزدیکی میان

مطابق شکل ۸، در نمونه‌های فاقد مواد افزودنی، میزان نفوذپذیری نمونه‌ها تحت اعمال ۱۵۰ چرخه‌ی کامل تغییرات دمایی، ۴۸۶ درصد افزایش داشته است. براساس قرائت دستگاه محفظه استوانه‌ای، نرخ نفوذپذیری بتن معمولی بعد از ۱۵۰ چرخه به طور متوسط به عدد  $0/0683$  میلی‌متر بر دقیقه رسیده در صورتیکه برای بتن‌های حاوی سوپرژل و مزوکریت نرخ نفوذپذیری به ترتیب برابر  $0/0368$  و  $0/0288$  میلی‌متر بر دقیقه شده است. به عبارتی در بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ سوپرژل و مزوکریت مقدار نرخ نفوذپذیری بتن در ۱۵۰ چرخه کامل به ترتیب ۳۴۳ و ۲۸۰ درصد افزایش یافته که به مراتب کمتر از بتن‌های فاقد مواد افزودنی می‌باشد. در تحقیقات دیگر نیز نتایج مشابهی بدست آمده است. در یک تحقیق مشخص گردید که تاثیر چرخه‌های مختلف دمایی روی بتن معمولی باعث افزایش حدود ۶ برابری مقدار نفوذپذیری می‌شود. در این تحقیق نیز شاهد حدود افزایش مقدار نفوذپذیری بتن حدود ۵ برابر می‌باشیم [۳۵]. در مورد نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ، به دلیل کمتر شدن فضاهای خالی مقدار نفوذپذیری نیز کمتر تحت تاثیر چرخه‌های دمایی قرار گرفته و از طرفی سیکل‌های تغییرات دما بر توزیع اندازه‌ی حفره‌ها اثر گذاشته و دانه‌های سیمان در حال هیدراته شدن در معرض دمای زیاد قرار گرفته، و در نتیجه اندازه‌ی حفره‌های تخلخل خمیر سیمان بزرگتر خواهد شد. از آن جایی که مقدار نفوذپذیری بتن، با تخلخل (حفره‌های مویینه) بتن کنترل می‌شود، انتظار می‌رود که در شرایط یکسان، نفوذپذیری با افزایش دما افزایش یابد.

### ۳-۳- اثر مواد کاهنده نفوذ بر مقاومت فشاری بتن تحت سیکل‌های مختلف دمایی

در شکل ۹-الف، میانگین مقاومت فشاری بتن‌های با رده‌های مختلف قابل مشاهده است. در شکل ۹-ب نیز درصد کلی کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.

مطابق شکل ۹، در نمونه‌های فاقد مواد افزودنی میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت سیکل‌های تغییرات دمایی حدود  $27/2$  درصد می‌باشد. در صورتیکه در مورد نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ به دلیل کمتر شدن فضاهای خالی و کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سوپرژل و مزوکریت به ترتیب برابر  $14/4$  و  $11/3$  درصد می‌باشد. در مورد نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ، به دلیل کمتر شدن فضاهای خالی مقدار مقاومت فشاری نیز کمتر تحت تاثیر چرخه‌های دمایی قرار گرفته است. در خصوص کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از اعمال



(ب) درصد کلی کاهش مقاومت فشاری در سیکل‌های مختلف

(الف) تغییرات مقاومت فشاری در سیکل‌های مختلف

(b) The overall percentage of compressive strength reduction (a) Compressive resistance changes in different cycles in different cycles

شکل ۹. نتایج حاصل از آزمون "مقاومت فشاری" تحت اثر سیکل‌های مختلف تغییرات دمایی

Fig. 9. The results of the "compressive strength" test under the effect of different cycles of temperature changes

مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس رابطه (۳) به صورت معادله یک صفحه محاسبه شده است.

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

$$p_{00} = -2.669$$

$$p_{10} = -1.25$$

$$p_{01} = 0.3594$$

$$R - square = 0.901$$

(۳)

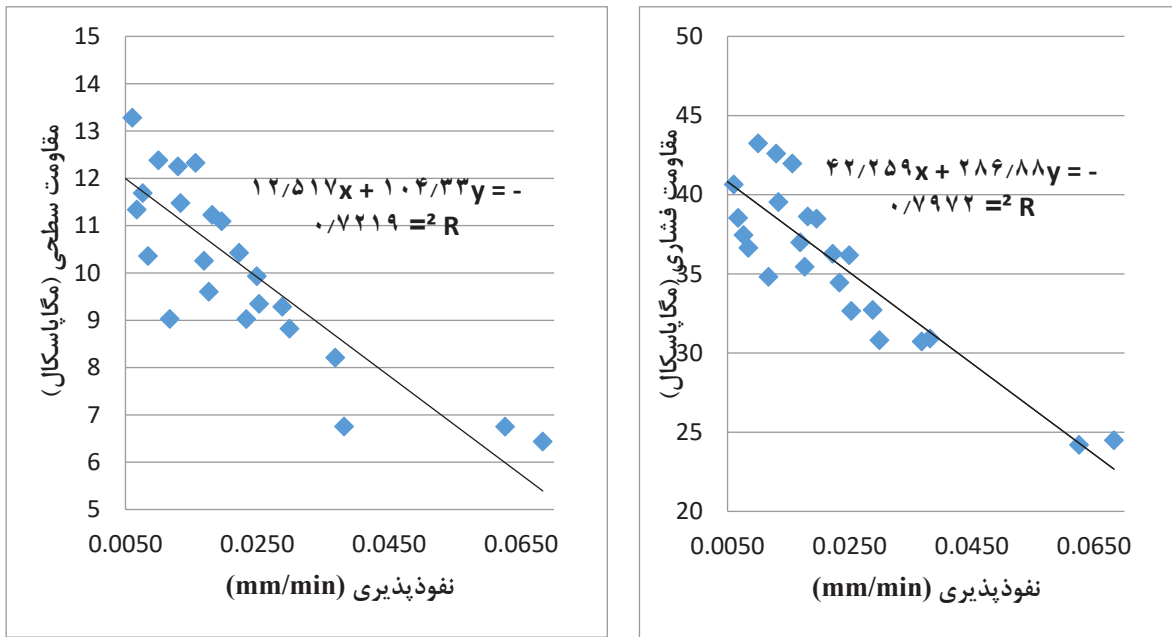
مقاومت سطحی و فشاری برقرار نمود. لذا می‌توان با بررسی مقاومت سطحی نمونه‌های مکعبی از روش "پیچش" میزان مقاومت فشاری بتن‌های حاوی مواد افزودنی کاهنده نفوذ را توسط معادله (۲) و با دقت مناسبی به دست آورد.

$$Y = 2.48x + 10.6$$

(۲)

۳-۵- مقایسه نتایج آزمایش "پیچش"، "محفظه استوانه‌ای" و "فشاری" در فضای سه‌بعدی

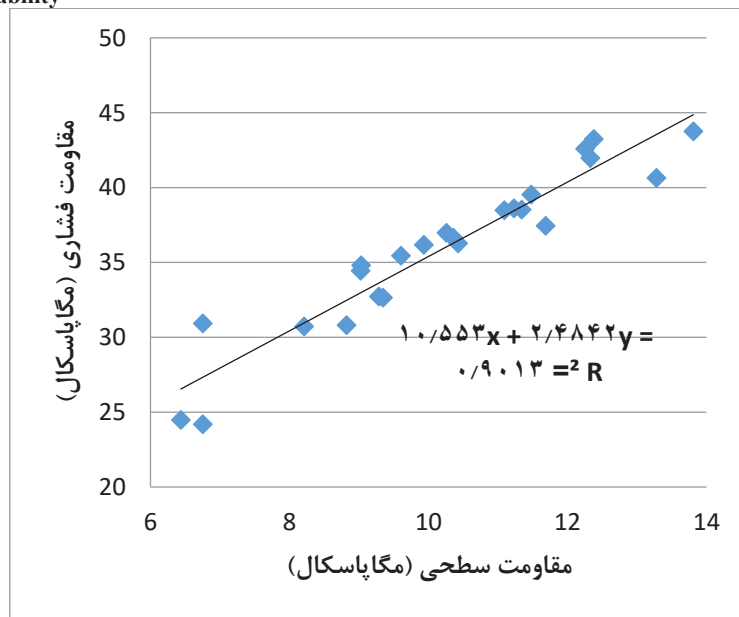
در محیط برنامه‌نویسی متلب با ورود اطلاعات مربوط به نتایج مقاومت سطحی، مقاومت فشاری و نرخ نفوذپذیری، ارتباط سه مولفه بطور هم‌زمان



ب: رابطه میان مقاومت سطحی با نفوذپذیری

الف: رابطه میان "مقاومت فشاری" و نفوذپذیری

(b) The relationship between surface resistance and permeability (a) The relationship between "compressive strength" and permeability

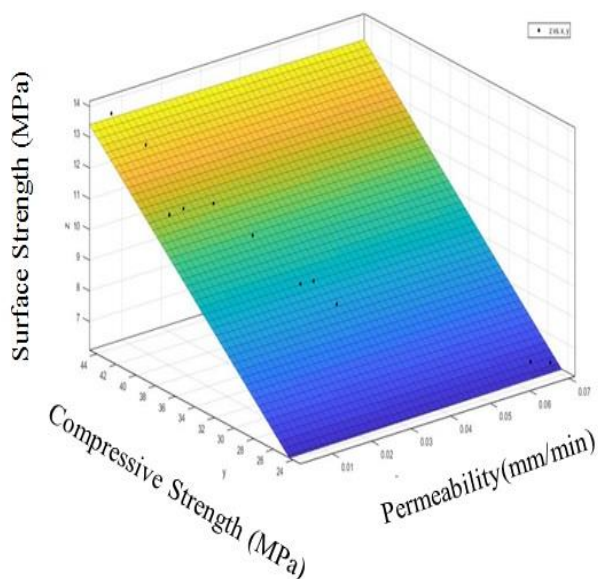


ج: رابطه میان مقاومت فشاری و مقاومت سطحی

(c) The relationship between compressive strength and surface resistance

شکل ۱۰. رابطه میان نتایج حاصل از آزمون‌های پیچش، محفظه استوانه‌ای و فشاری

Fig. 10. The relationship between the results of "twist-off", "Cylindrical chamber" and "compressive strength" tests



شکل ۱۱. نمودار سه بعدی نتایج آزمایش "پیچش" و "مقاومت فشاری" و روش "محفظه استوانه‌ای"

Fig. 11. The three-dimensional diagram of the results of "twist-off" and "compressive strength" tests and the "Cylindrical chamber" method.

ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. برای هر رده‌ی مقاومتی تعداد ۶ نمونه‌ی مکعبی ساخته شد که ۳ نمونه در زیر جک بتن شکن قرار گرفت و ۳ نمونه تحت آزمون پیچش قرار گرفتند. سپس نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و آزمون پیچش مورد مقایسه قرار گرفت.

در شکل ۱۲ نتایج حاصل از انجام آزمون پیچش و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی نشان داده شده است. با انجام تحلیل رگرسیون خطی، رابطه ۴ بدست می‌آید که دارای ضریب تعیین ۰/۹۸ می‌باشد.

$$y=8.596x-15.211 \quad (۴)$$

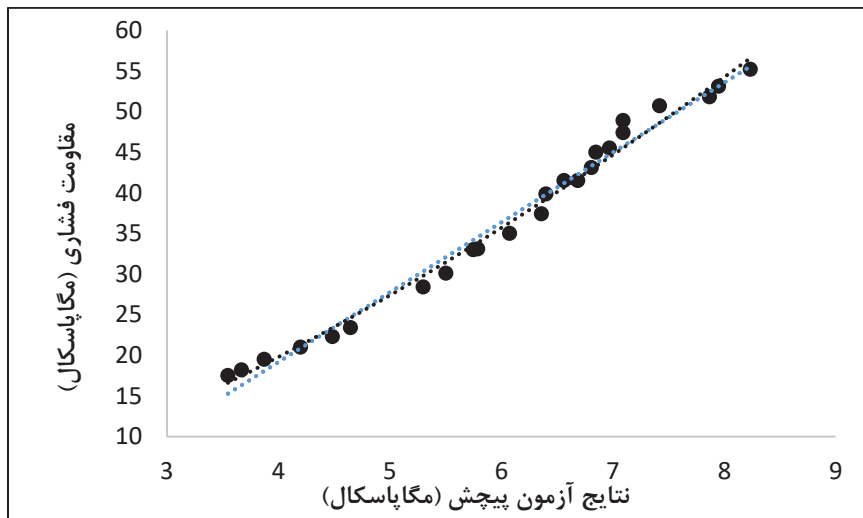
اما چنانچه معادله رگرسیون در حالت خطی بصورت  $y=ax$  انتخاب و تحلیل همبستگی صورت پذیرد، مقدار ضریب تعیین به ۰/۹ کاهش می‌یابد. لذا می‌توان از منحنی توانی که تا حدود زیادی با منحنی خطی ساده تطابق دارد استفاده نمود. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که مقدار ضریب تعیین در یک مدل توانی برابر ۰/۹۷ می‌باشد. رابطه رگرسیون توانی در این حالت برابر است با (رابطه ۴)

$$y=2.6366x^{1.4542} \quad (۵)$$

در رابطه ۳،  $X$  حجم نفوذ بر اساس نتایج حاصل از روش "محفظه استوانه‌ای"،  $Y$  مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها و  $Z$  مقادیر مقاومت سطحی به دست آمده از روش "پیچش" می‌باشد و  $P_{00}$ ،  $P_{10}$  و  $P_{01}$  ضرایب ثابت صفحه درجه یک بوده که با توجه به شکل ۱۱ با افزایش مقاومت سطحی، نرخ نفوذپذیری کاهش پیدا کرده و در مقابل مقاومت فشاری افزایش یافته و همبستگی بالایی بین متغیرهای مذکور وجود دارد. در واقع بر اساس تحلیل همزمان سه مولفه با همدیگر، رفتار سطحی و درونی بتن بطور همزمان مورد ارزیابی قرار گرفته که در نتیجه ضریب همبستگی در این نمودار صفحه‌ای در فضای سه بعدی ۹۰ درصد محاسبه شده و دقت بهتری در موضوع نفوذپذیری نسبت به فضای دو بعدی دارد.

۳-۶- مقایسه نتایج آزمایش "پیچش" و "محفظه استوانه‌ای" با آزمون‌های استاندارد موجود

با توجه به اینکه آزمون‌های استفاده شده در این پژوهش، آزمون‌هایی نوین می‌باشد لذا در پژوهش‌های قبلی توسط نویسندگان، نسبت به مقایسه‌ی آزمون‌های فوق با آزمون‌های آزمایشگاهی استاندارد اقدام شده است. در این قسمت نیز خلاصه‌ای از موارد ذکر شده، بیان می‌گردد. برای صحت سنجی آزمون پیچش، اقدام به ساخت بتن با رده‌های مقاومتی مختلف بین ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال گردید [۳۴]. نمونه‌های ساخته شده، بصورت مکعبی و دارای



شکل ۱۲. رابطه بین نتایج حاصل از آزمون پیچش با مقاومت فشاری

Fig. 12. The relationship between the results of " twist-off " and "compressive strength" test

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 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.

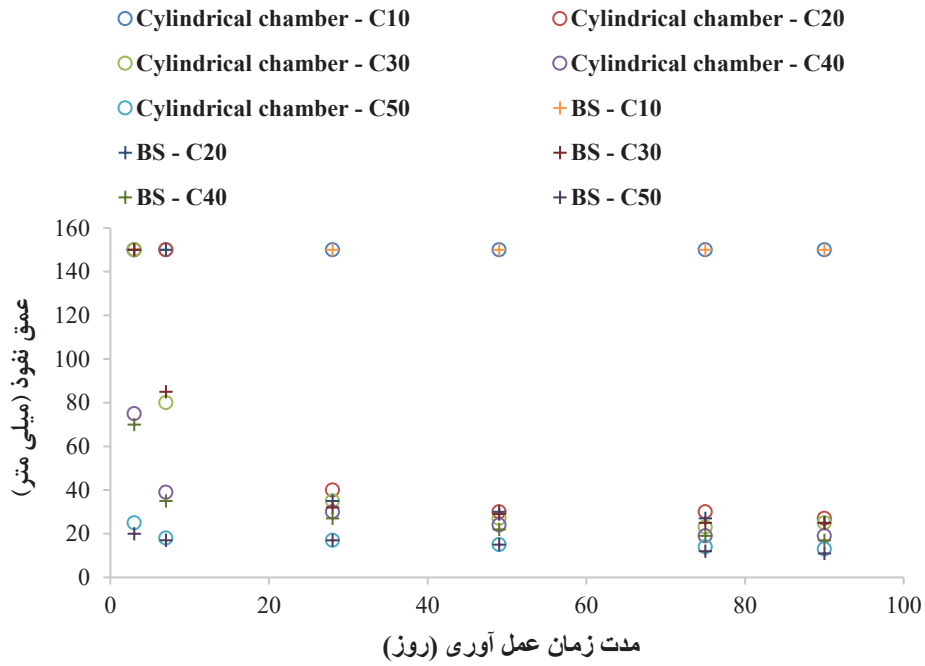
در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تصاویر گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و حاوی افزودنی نشان داده شده است. در این شکل‌ها، تصاویر (الف)، (ب) و (پ) به ترتیب مربوط به قطعات انتخاب شده از نزدیک سطح، بین مرکز و سطح و نزدیک مرکز نمونه‌ها هستند. همانگونه که در شکل ۱۴ 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 ۱۵ 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.

لذا می‌توان با به‌کارگیری آزمون پیچش، مقدار مقاومت برشی بدست آمده از این آزمون را جهت تبدیل به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن، با استفاده از منحنی کالیبراسیون توانی (شکل ۱۲) و در محدوده اطمینان بالا محاسبه نمود. همچنین مقدار ضریب تغییرات در محاسبه نتایج حاصل از آزمون پیچش برابر ۳ درصد می‌باشد که مقدار اندکی بوده و نشانگر قابل اعتماد بودن داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

همچنین برای صحت سنجی آزمون محفظه استوانه‌ای، اقدام به ساخت بتن با رده‌های مقاومتی مختلف بین ۱۰ تا ۵۰ مگاپاسکال گردید [۳۶]. نمونه‌های ساخته شده، بصورت مکعبی و دارای ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. تعدادی از نمونه‌ها تحت آزمون محفظه استوانه‌ای قرار گرفت و تعدادی دیگر با استفاده از روش اشاره شده در استاندارد BS EN 12390-8:2009 [۳۷] مورد آزمایش قرار گرفتند. مقدار عمق نفوذ آب برای نمونه‌های بتنی پس از دوره‌های مختلف عمل‌آوری که با استفاده از آزمون‌های محفظه استوانه‌ای و استاندارد BS بدست آمده‌اند در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود که همبستگی خوبی بین این دو روش وجود دارد.

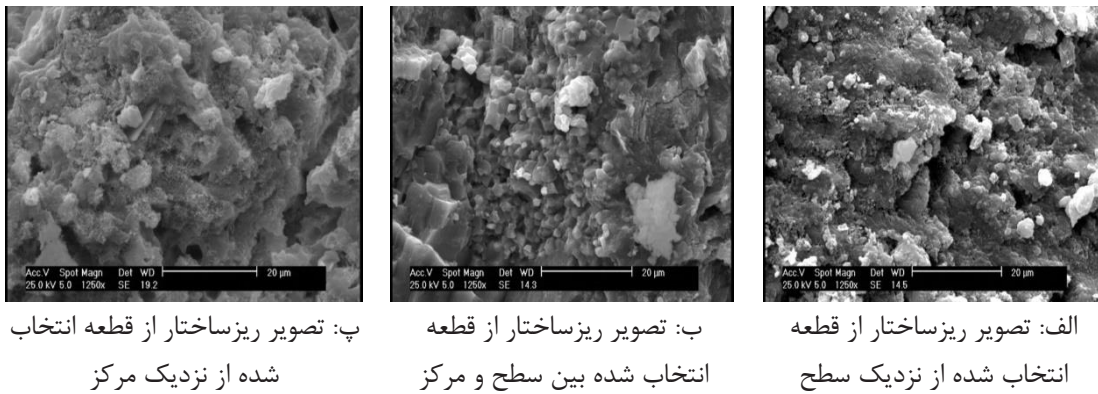
### ۳-۷- تاثیر افزودنی‌ها بر ریز ساختار بتن

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



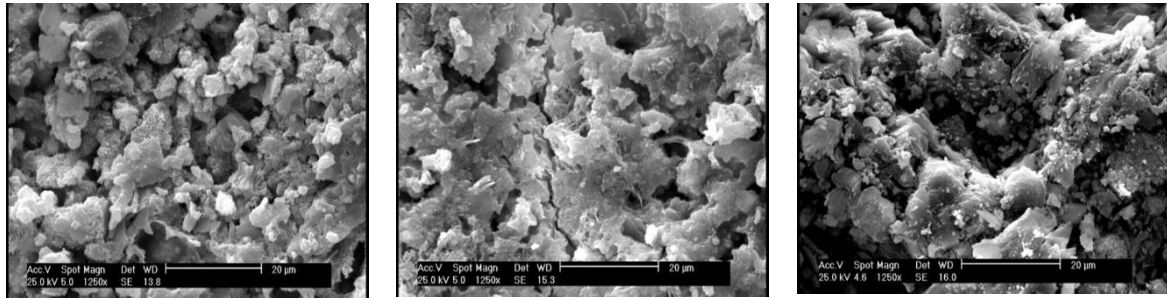
شکل ۱۳. مقایسه بین نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای با استاندارد BS

Fig. 13. Comparison between the results of " Cylindrical chamber " test with BS standard



شکل ۱۴. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی حاوی افزودنی.

Fig. 14. Microstructure images of concrete samples containing additives



(الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح  
(ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز  
پ: تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز

شکل ۱۵. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی

Fig. 15. Microstructure images of 28-day concrete sample without additives

داشته است اما کاهش مقاومت سطحی بتن‌های حاوی مواد کاهنده حدود ۲۰ درصد می‌باشد.

– رابطه معکوسی میان مقاومت سطحی با نرخ نفوذپذیری وجود دارد به گونه‌ای که نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" با مقادیر آزمایش "پیچش" نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده نفوذ دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد می‌باشد که در نتیجه با افزایش مقدار نرخ نفوذپذیری و افزایش فضاهای خالی و خروج رطوبت از بتن مقدار مقاومت سطحی بتن کاهش پیدا می‌کند. این رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری دارای ضریب ۹۰ درصد می‌باشد.

#### ۵- فهرست علائم

$A$	مساحت، $m^2$
$D$	قطر صفحه زیرسری، $m$
$h$	قرائت میکروکتر، $mm$
$J$	ممان اینرسی قطبی، $m^4$
$Q$	نرخ نفوذ، $mm/min$
$r$	شعاع صفحه‌های فلزی، $m$
$T$	لنگر پیچشی، $N.m$
$t$	زمان، $min$
$V$	حجم نفوذ، $ml$

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\tau$	تنش برشی، $N/m^2$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به تأثیر شرایط حاد محیطی شامل چرخه‌های مختلف تغییرات دمایی روی بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ پرداخته شده و همچنین ارتباط مقاومت‌های فشاری و سطحی بتن با نرخ نفوذ آب به داخل بتن توسط آزمون‌های نوین بررسی شده است. نتایج بدست آمده عبارتند از:

– با ترسیم نمودارهای سه بعدی در نرم افزار متلب مشاهده گردید که ارتباط مقاومت‌های سطحی، فشاری و نرخ نفوذپذیری به هم نزدیک بوده و این ارتباط به لحاظ فرمول‌بندی با معادله صفحه درجه یک با ضریب همبستگی ۰/۹۰ برقرار است.

– نتایج حاصل از نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی مواد کاهنده تحت چرخه‌های تغییرات دمایی نشان می‌دهد که مقدار نرخ نفوذ در نمونه‌های بتنی تا چرخه تغییرات دما به میزان ۱۰۰ سیکل با شیب تند افزایش یافته و پس از آن به سمت ۱۵۰ سیکل، شیب ملایم‌تر می‌شود.

– در بتن معمولی، نفوذپذیری نمونه‌ها تحت ۱۵۰ سیکل چرخه‌ای دمایی با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای بیشتر از ۵ برابر شده است. اما در بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ سوپرزل و مزوکریت مقدار نرخ نفوذپذیری بتن در ۱۵۰ چرخه کامل به ترتیب ۳۴۳ و ۲۸۰ درصد افزایش یافته که به مراتب کمتر از بتن‌های فاقد مواد افزودنی می‌باشد.

– تأثیر چرخه‌های دمایی بر مقاومت سطحی حاصل از آزمون پیچش در نمونه‌های معمولی بیشتر از نمونه‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ می‌باشد. با اعمال ۱۵۰ سیکل، مقاومت سطحی بتن معمولی حدود ۲۹ درصد کاهش



- [10] E. Jahanbakhti, N. Fanaie, and A. Rezaeian, Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection, *Journal of Constructional Steel Research*, 137 (2017) 180-191.
- [11] M. Dashtibadfarid, and M. Afrasiabi, Low-permeability concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs, *Int. J. Innov. Eng. Sci*, 2 (2017) 20-24.
- [12] P. Halamickova, R.J. Detwiler, D.P. Bentz, and 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.
- [13] L. Kong, and Y. Ge, Mechanism study of effect of coarse aggregate size on permeability of concrete, *ACI Materials Journal*, 112(6) (2015) 767.
- [14] H. Liu, G. Luo, H. Wei, and 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.
- [15] I.G. Amadi, and 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.
- [16] Y. Yuan, and Y. Chi, Water permeability of concrete under uniaxial tension, *Structural Concrete*, 15(2) (2014) 191-201.
- [17] M.B.A. Houaria, M. Abdelkader, C. Marta, and K. Abdelhafid, Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, *Energy Procedia*, 139 (2017) 725-730.
- [18] M. Naderi, New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete, *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6) (2007) 602-608.
- [19] A.S. Varzaneh, and M. Naderi, Study Of Bond Strength Between Fiber-Reinforcedmortar/Steel and Their Mechanical Properties Using Push-Out, Twist-Off And Pull-Off Methods, *Revista Romana de Materiale*, 51(2) (2021) 228-238.
- [20] M. Naderi, and R. Shibani, New Method for
- [1] X. Li, Q. Xu, and S. Chen, An experimental and numerical study on water permeability of concrete, *Construction and building materials*, 105(3) (2016) 503-510.
- [2] S.C. Kou, C.S. Poon, and M. Etxeberria, Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 53 (2014) 73-82.
- [3] Y. Sakai, Y. Yokoyama, and T. Kishi, 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.
- [4] B.S. EN, Testing hardened concrete–Part 3: Compressive strength of test specimens, British Standard Institution, London, UK, (2009).
- [5] 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).
- [6] M. Naderi, A. Kaboudan, and K. Kargarfard, 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) (2021) 25-43.
- [7] M. Naderi, A. Kaboudan, and A. Akhavan Sadighi, Comparative study on water permeability of concrete using cylindrical chamber method and British standard and its relation with compressive strength, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1) (2018) 116-131.
- [8] A. Kaboudan, and M. Keshtkar, Studying the permeability and strength of concretes containing silica fume, zeolite and fly ash using “Cylindrical chamber” method and British standard, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3) (2020) 92-113.
- [9] N. Fanaie, S. Aghajani, and 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.

- Conshohocken, PA, (2012).
- [29] G.R. Mass, Proportioning Mass Concrete a Incorporating Pozzolans Using ACI 211. 1, Concrete International, 4(8) (1982) 48-55.
- [30] ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Annual book of ASTM standards, 4(7) (2012).
- [31] ASTM C494, Standard specification for chemical admixtures for concrete, in, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2005).
- [32] ASTM E119, Standard test methods for fire tests of building construction and materials, ASTM International, Philadelphia, (2012).
- [33] B.E. 12390-3, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, (2009).
- [34] A.S. Varzaneh, and M. Naderi, Determination of Compressive and Flexural Strengths of In-situ Pozzolanic Concrete Containing Polypropylene and Glass Fibers Using "Twist-off", Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J), 20(5) (2020) 117-129.
- [35] S. Walidin, A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi, The Influence of Ambient Temperature Conditions on the Permeability and Surface Strength of Concrete through Insitu Tests, Journal of Structural and Construction Engineering, (2023).
- [36] M. Naderi, A. Kaboodan, and A. Akhavan, Comparative study on water permeability of concrete using cylindrical chamber method and British standard and its relation with compressive strength, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 6(1) (2018) 116-131.
- [37] BS EN 12390-8, Testing hardened concrete part 8: depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, London, (2009).
- Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, Aust, J. Basic Appl. Sci, 7(2) (2013) 438-447.
- [21] A. Mardani-Aghabaglou, A. Nematzadeh, and 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.
- [22] R. Ramkrishnan, B. Abilash, M. Trivedi, P. Varsha, P. Varun, and S. Vishanth, Effect of mineral admixtures on pervious concrete, Materials Today: Proceedings, 5(11) (2018) 24014-24023.
- [23] B.B. Jindal, D. Singhal, S. Sharma, and J. Parveen, Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture, Computers and concrete, 21(3) (2018) 345-353.
- [24] S. Kate, and 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.
- [25] X. Cui, J. Zhang, D. Huang, Z. Liu, F. Hou, S. Cui, L. Zhang, and Z. Wang, Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(11) (2017) 04017217.
- [26] ASTM C139-06, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2006).
- [27] ASTM C127, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2012).
- [28] ASTM C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Mahmood Naderi, Ali Saberi Vaezaneh, Majid Parhizkari, The effect of different temperature cycles on permeability and surface resistance of concretes containing permeability-reducing materials, Amirkabir J. Civil Eng., 55(9) (2023) 1845-1862.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22079.7897

