

# اندازه‌گیری حجم نفوذ آب به بتن و مقاومت فشاری تحت شرایط حاد دمایی بدون نیاز به شکستن نمونه با استفاده از آزمون‌های درجای نوین

محمود نادری<sup>۱\*</sup>، علی صابری ورزنده<sup>۲</sup>، سردارولی دین<sup>۳</sup>

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

۲- دکترای سازه، مدیر گروه پژوهشی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- [profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir)

۲- [ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir)

۳- [walidin@edu.ikiu.ac.ir](mailto:walidin@edu.ikiu.ac.ir)

## چکیده:

برای اندازه‌گیری مستقیم مقاومت و نفوذپذیری بتن می‌بایست مغزه‌ای از بتن جدا نمود و سپس در آزمایشگاه با روش‌های مخرب، آزمایش نمود. بعنوان مثال برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن توسط استانداردهای موجود، باید بتن را شکسته و به دو نیم تقسیم نمود. همچنین شرایط حاد از جمله چرخه‌های دمایی که بتن در تابستان با آن روبرو می‌شود می‌تواند تأثیرات منفی بر مشخصات بتن داشته باشد. لذا در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های ابداعی محفظه استوانه‌ای (غیر مخرب) و انتقال اصطکاک (با خرابی جزئی)، علاوه بر بررسی تأثیر چرخه‌های دمایی (۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه) روی نفوذپذیری و مقاومت درجای بتن در سنین مختلف، اقدام به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن، بدون نیاز به شکستن آن در زیر جک شده است. مطابق نتایج حاصله، با استفاده از نمودارهای کالیبراسیون و معادلات بدست آمده می‌توان مقدار عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن را بدون نیاز به شکستن بتن و با ضریب همبستگی بالای ۹۶ درصد بدست آورد. همچنین مشاهده شد که تعداد ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه باعث افزایش نفوذپذیری به مقدار ۴/۱، ۸/۷، ۱۲/۷ و ۱۶/۵ برابر شده است.

## واژگان کلیدی:

آب و هوای تابستانی، مقاومت، نفوذپذیری، تحلیل رگرسیون.

# Measuring the volume of water penetration into concrete and compressive strength under acute conditions without breakage the sample using new tests

Mahmood Naderi<sup>\*</sup>, Ali Saberi Varzaneh<sup>†</sup>, Sardar Wali Din<sup>‡</sup>

<sup>∧</sup>- Professor, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

<sup>†</sup>- PhD, Head of Research Group, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran

<sup>‡</sup>- Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty. Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

## Abstract:

To directly measure the strength and permeability of concrete, a core should be separated from the concrete and then tested in the laboratory with destructive methods. For example, to measure the permeability of concrete by existing standards, concrete must be broken and divided into half. Also, acute conditions such as temperature cycles that concrete faces in summer can have negative effects on concrete characteristics. Therefore, in this research, by using innovative tests, in addition to investigating the effect of temperature cycles (40, 80, 120 and 160 cycles) on the permeability and surface resistance of concrete at different ages, measuring the depth of water penetration and resistance Concrete is compressed without breaking it. According to the results, by using the calibration charts and the equations obtained from the methods of cylindrical chamber and friction transfer, it is possible to obtain the depth of water penetration and the compressive strength of concrete without the need to break the concrete and with a correlation coefficient of over 96%. It was also observed that the cycles of temperature changes have negative effects on the durability and surface resistance of concrete in such a way that the number of 40, 80, 120 and 160 cycles of temperature changes increases the permeability of concrete by 4.1, 8.7, and 9.12, 0 and 16, 0 have been equaled. Also, the acute conditions of temperature changes have negative effects on the surface resistance of concrete in such a way that the surface layer resistance of concrete has decreased by more than 44% under 160 cycles of temperature changes. Considering that the surface layer of concrete has a direct relationship with the penetration of harmful substances into the concrete, it was observed that with the increase in the strength of the surface layer of concrete, the volume of water penetration into concrete has decreased. By increasing the resistance of the surface layer by 10%, the volume of water infiltration into the concrete has decreased by about 14.0%.

**Keywords:** Summer weather, resistance, permeability, regression analysis.

از مقایسه نتایج آزمون محفظه استوانه‌ای با استاندارد بریتانیا مشخص گردید که ضریب همبستگی بالایی بین روش‌های فوق وجود دارد که نشان از دقت بالای آزمون محفظه استوانه‌ای است [۸]. همچنین در یک تحقیق دیگر در خصوص مقایسه روش جدید محفظه استوانه‌ای با استاندارد بریتانیا (BS EN-1۲۳۹-۱) یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۹۵ بین نتایج حاصل از روش‌های فوق مشاهده شده است [۹].

در خصوص اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن بصورت مستقیم و درجا نیز روش‌های زیادی وجود ندارد. روش‌های موجود نیز مانند آزمون "کشیدن از سطح" [۱۰] دارای دستگاه گران‌قیمتی می‌باشد. البته تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که این روش برای ارزیابی مقاومت بتن در محل سازه دارای نتایج مناسبی است [۱۱]. آزمون انتقال اصطکاک، از آزمون‌های نوین و درجا می‌باشد که توسط نادری اختراع شده است [۱۲]. آزمون فوق در گروه آزمون‌های نیمه مخرب (با خرابی جزئی) به حساب می‌آید و می‌توان برای تعیین مقاومت فشاری مواد و مصالح مصرفی در صنعت راه و ساختمان و سازه‌ها استفاده نمود. همچنین علاوه بر شرایط آزمایشگاهی، این آزمون در محل بهره‌برداری ساختمان‌ها و سازه‌ها نیز قابل انجام است. در آزمون انتقال اصطکاک تمامی وسایل استفاده شده به شکل مکانیکی است به همین دلیل قابل استفاده در هر نوع شرایط محیطی و دمایی، هم خشکی و هم در آب می‌باشد [۱۳].

در تحقیقات گذشته، موارد متعددی از آزمون انتقال اصطکاک برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن، ملات، سنگ و آجر و همچنین چسبندگی بین لایه‌ها استفاده شده است. در تحقیقاتی در خصوص استفاده از آزمون فوق برای ارزیابی مقاومت بتن مشخص گردید که ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد بین نتایج این آزمون با آزمون استاندارد وجود دارد [۱۴]. در تحقیقات دیگری با مقایسه نتایج آزمون انتقال اصطکاک با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس مشخص گردید که نتایج حاصله دارای دقت بالایی می‌باشد [۱۵-۱۶]. همچنین از این آزمون برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌ها و ملات‌های ییافی [۱۷]، چسبندگی بین بتن و لایه‌های تعمیر [۲۰-۱۸]، مقاومت صخره سنگ‌ها [۲۱] و رویه آسفالتی [۲۲] نیز استفاده شده است که در تمامی آن‌ها نتایج حاصل از این آزمون دارای دقت بالایی بوده است.

توانایی بتن برای مقاومت در برابر حملات شیمیایی، عوامل هوازدگی، سایش و یا هر فرآیندی که موجب آسیب دیدگی می‌شود، دوام نام دارد و یکی از عوامل مهم و مؤثر برای تعیین عمر مفید سازه‌های بتنی می‌باشد. بطور کلی دوام سازه‌های بتنی یک مسئله مهم و اقتصادی می‌باشد. به شرطی یک سازه بتنی می‌تواند وظایفی را که برای آن طراحی شده است بخوبی انجام دهد، که دارای مشخصات مکانیکی مناسب و دوام کافی باشد، تا در مقابل بارهای وارده و عوامل آسیب‌رسان، عملکرد مناسبی از خود نشان دهد. محققان همواره در میان عوامل مذکور، به تعیین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن توجه بسیاری داشته و مطالعات گسترده-ای در این خصوص انجام داده‌اند [۱-۳].

برای اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری بتن در برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان، آزمایش نفوذپذیری آب تحت فشار، در زمان مشخص با بررسی اندازه عمق نفوذ بتن انجام می‌گردد [۴]. در این روش نمونه بتنی تحت فشار معینی قرار گرفته و متوسط عمق نفوذ آب بعد از شکستن نمونه بعنوان معیاری برای اندازه‌گیری عمق نفوذ در نظر گرفته می‌شود. در استاندارد بریتانیا نمونه بتنی تحت فشار آب برابر با ۵ بار قرار گرفته و بعد از شکستن نمونه، حداکثر عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود و از این روش، برای تعیین نفوذپذیری بتن استفاده می‌گردد [۵]. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش‌های مرسوم نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات مختلف می‌باشد. همچنین به دلیل زمانبر بودن انجام این آزمایش‌ها، هزینه انجام آن‌ها نیز زیاد است. از طرفی اکثر آزمایش‌های موجود تنها در شرایط آزمایشگاهی قابل اعمال بوده و قابلیت انجام بصورت درجا را ندارند و می‌بایست پس از انجام آزمایش، نمونه را شکست تا بتوان مقدار عمق نفوذ آب به داخل بتن را اندازه‌گیری نمود. لذا نیاز به ابداع روش‌هایی که بتواند بدون شکستن بتن مقدار نفوذپذیری و مقاومت فشاری آنرا بررسی نمود مورد نیاز است.

در تحقیق حاضر از روش نوین محفظه استوانه‌ای که توسط نادری در سال ۲۰۱۰ ابداع شد، برای اندازه‌گیری حجم و عمق نفوذ آب در نمونه بتنی استفاده شده است [۶]. روش فوق‌الذکر روشی دقیق با کاربرد گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمانی چه در محیط کار و چه در محل سازه است [۷].

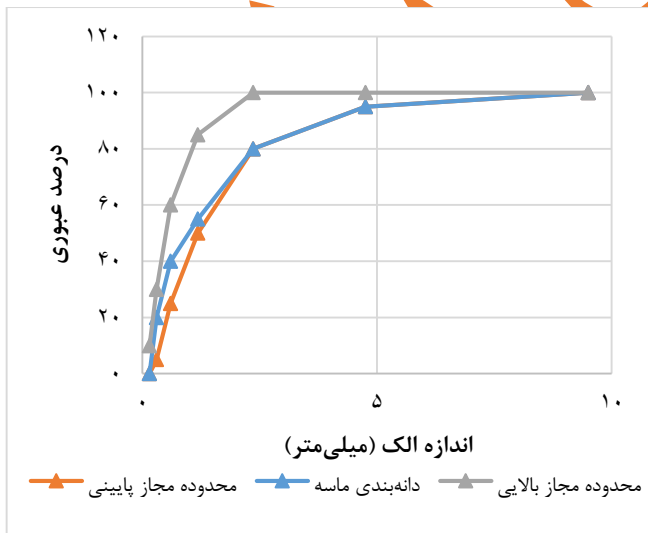
تیتانیوم می‌توان خلل و فرجی که در ابعاد نان متر است را پر کنند که این مورد از مزایای نانو ذرات است. این روش باعث ایجاد ساختاری متراکم‌تر در ملات و خمیر سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت‌های مکانیکی به ویژه مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری می‌شود [۳۳-۳۴].

در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های "انتقال اصطکاک" و "محفظه استوانه‌ای"، علاوه بر بررسی تاثیر چرخه‌های مختلف دمایی (۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه) روی نفوذپذیری و مقاومت در جای بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه، اقدام به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن بدون نیاز به شکستن آن شده است.

## ۲- کارهای آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد *ASTM-C136* انجام پذیرفته است [۳۵]. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن‌ها نیز به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد بدست آمده است [۳۶] و [۳۷]. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به همراه محدوده مجاز در شکل (۱) نشان داده شده است.



الف: ریزدانه

میزان مقاومت بتن در برابر چرخه‌های تغییرات دمایی به عوامل زیادی مانند خصوصیات مصالح مصرفی، سرعت سرد و گرم شدن، طرح اختلاط بتن، حداکثر و حداقل دما، نرخ افزایش دما و انواع افزودنی‌های شیمیایی در بتن بستگی دارد [۲۳]. وقتی که بتن در برابر تغییرات دما قرار می‌گیرد با افزایش دما ساختار فیزیکی و ترکیبات شیمیایی آن دچار تغییرات می‌شود از جمله: دهیدراته شدن خمیر سیمان، انقباض در اثر کاهش رطوبت، ایجاد ترک‌های ریز در سطح بتن و انبساط و انقباض سنگدانه‌ها [۲۴]. دماهای بالا در بتن باعث گسترش منافذ و ترک خوردگی می‌گردد که این موارد باعث افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام سازه می‌شود، این موضوع در سدها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی بتنی از اهمیت بیشتری برخوردار است [۲۵]. با توجه به یافته‌های تحقیق دیگری می‌توان توضیح داد که پس از قرار گرفتن بتن سبک دانه در معرض دماهای بالا (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ سانتیگراد)، نسبت به بتن معمولی کاهش جرم بیشتری و خواص مکانیکی باقیمانده بالاتری از خود نشان داد [۲۶].

در دماهای نسبتاً پایین (حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد) چرخه‌های حرارتی، می‌تواند تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن داشته باشد [۲۷]. در تحقیقی مشخص گردید که چرخه‌های حرارتی باعث ایجاد ریزترک‌هایی در داخل بتن می‌گردد که می‌تواند باعث تأثیر منفی روی مشخصات بتن شود [۲۸]. در تحقیقی دیگر، با استفاده از چرخه‌های حرارتی در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری و مقاومت برشی بتن بطور قابل توجهی کاهش یافت که به ترتیب برابر با ۴/۹ و ۱۷/۴ درصد است [۲۹]. در چرخه‌های مختلف دمایی، تبخیر آب آزاد در بتن باعث ایجاد منافذ ریز و ترک‌های میکروسکوپی و کاهش وزن بتن می‌شود [۳۰-۳۱].

تأثیر چرخه‌های عمل انجماد نمک، نشان می‌دهد که مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول دینامیکی نسبی نمونه‌های بتنی بطوری کلی روند کاهشی را نشان می‌دهند و خواص مکانیکی بتن به تدریج با افزایش غلظت محلول سولفات کاهش می‌یابد [۳۲].

افزودنی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت و نفوذپذیری بتن دارد؛ زیرا نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از نانودی اکسید تیتانیوم و الیاف فلزی باعث بهبود خواص مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردد و حتی نانودی اکسید

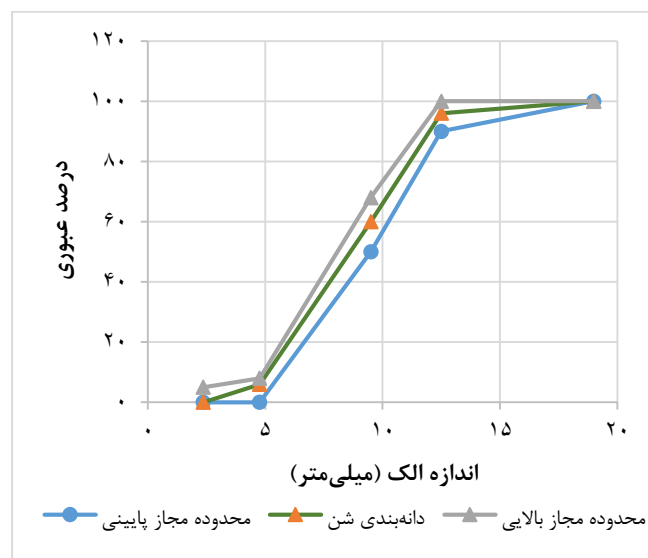
مقدار نفوذ آب در بتن را می‌توان از طریق میکرومتر نصب شده در قسمت بالای دستگاه و در زمان‌های مختلف ثبت نمود.



الف : چسباندن رینگ فلزی روی نمونه



ب: اعمال فشار، قرائت و ثبت داده‌ها



ب: درشت دانه

شکل ۱: دانه بندی سنگدانه‌ها

چسب استفاده شده در آزمایش‌ها، چسب دومولفه‌ای از نوع رزین اپوکسی است که دارای رنگ طوسی می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات چسب اپوکسی

| مدول الاستیسیته | مقاومت فشاری ۷ روزه | مقاومت برشی ۱۵ مگاپاسکال | زمان گیرش |        |
|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------|
|                 |                     |                          | ۲۵ °C     | ۳۵ °C  |
| ۱۲۷۵۰ مگاپاسکال | ۷۰ مگاپاسکال        | ۱۵ مگاپاسکال             | ۱۰ ساعت   | ۴ ساعت |

## ۲-۲- معرفی آزمون‌ها

### "روش محفظه استوانه‌ای"

برای انجام آزمایش ابتدا سطح بتن کاملاً خشک‌شده و آلودگی‌های موجود در سطح بتن زدوده می‌شود. سپس رینگ فلزی توسط چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۲-الف). پس از سخت شدن چسب، دستگاه نفوذپذیری روی صفحه فلزی نصب می‌شود (شکل ۲-ب). سپس دستگاه محفظه استوانه‌ای را کاملاً با آب پر کرده و جهت خروج هوای احتمالی موجود، یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تعبیه شده است. پس از پر شدن دستگاه، شیر تخلیه هوا بسته شده و با چرخاندن اهرم دستی، فشار مورد نظر به آب داخل دستگاه اعمال می‌شود که مقدار آن با استفاده از گیج تعبیه شده روی دستگاه قابل قرائت است (شکل ۲-ج). همچنین





الف: نمونه‌ی زیر جک



ج: دستگاه محفظه استوانه‌ای  
شکل ۲: آزمون محفظه استوانه‌ای



ب: اندازه‌گیری ارتفاع آب نفوذ کرده  
شکل ۳: بررسی مقدار عمق نفوذ

البته در پژوهش‌های گذشته، برای ارزیابی صحت سنجی آزمون محفظه استوانه‌ای، مقادیر حاصل از این آزمون با نتایج بدست آمده از روش BS EN ۱۲۳۹۰-۸ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصله بیانگر دقت بالای این آزمون در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن می‌باشد [۸].

در جدول (۲) مقایسه‌ای بین قابلیت‌های آزمون محفظه استوانه‌ای با استاندارد بریتانیا نشان داده شده است.

مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن در زمان‌های مختلف، با انجام حاصل ضرب مقدار ثبت شده از میکرومتر در سطح مقطعی که فشار به آن وارد می‌شود توسط معادله (۱) قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ کرده در بتن و زمان نفوذ آب، نرخ نفوذ آب به داخل نمونه بتنی را می‌توان از معادله (۲) محاسبه نمود.

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

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

که در آن  $V$  حجم آب نفوذ کرده به نمونه  $h$  (mm)، مقدار میکرومتر  $A$  (mm<sup>2</sup>)، سطح مقطع اعمال فشار  $Q$  (mm<sup>2</sup>)، نرخ نفوذ آب  $t$  (ml/s) و مدت زمان  $s$  است.

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب به بتن، ابتدا طبق شکل ۳- الف نمونه به دو نیم تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از کولیس و بصورت دقیق مقدار آن ثبت می‌گردد (شکل ۳-ب).

جدول ۲: مقایسه‌ی قابلیت‌های آزمون محفظه استوانه‌ای با استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰-۸

| مزیت آزمون درجا   | روش محفظه استوانه‌ای | روش BS | در خصوص BS EN ۱۲۳۹۰-۸   |
|---|----------------------|--------|---|
| قابلیت در انجام درجای آزمایش                                | ✓                    | ×      | تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ بوده و قابل حمل نیست.                   |
| هزینه اندک دستگاه   | ✓                    | ×      | آزمون BS دارای تجهیزات گرانی است.                                   |
| قابلیت در تکرار نمودن آزمون                                 | ✓                    | ×      | نمونه باید شکسته شود تا عمق نفوذ بر اساس آزمون BS اندازه گیری گردد. |
| سبک بودن و قابل حمل بودن                                    | ✓                    | ×      | تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ بوده و قابل حمل نیست.                   |
| آزمونی غیر مخرب   | ✓                    | ×      | نمونه باید شکسته شود تا عمق نفوذ بر اساس آزمون BS اندازه گیری گردد. |
| عدم محدودیت در ابعاد نمونه‌ی بتنی                           | ✓                    | ×      | بتن باید بر اساس آزمون BS در یک قالب با ابعاد مشخص قرار داده شود    |
| قابلیت انجام آزمون در مکان‌هایی که نمونه گیری ممکن نمی‌باشد | ✓                    | ×      | تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ می‌باشد                                 |
| قابلیت انجام آزمون روی هر سطح شیب‌دار                       | ✓                    | ×      | تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ می‌باشد                                 |



ب: سطح نمونه‌ی مغزه‌گیری شده



ج: دستگاه انتقال اصطکاک

سپس مطابق شکل ۴-د، دستگاه انتقال اصطکاک روی مغزه قرار گرفته و با استفاده از پیچ‌های کناری، روی مغزه تثبیت می‌شود. در ادامه به وسیله یک پیچش سنج معمولی به آن لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا مغزه دچار شکست گردد (شکل ۴-ه).

### روش "انتقال اصطکاک"

در آزمون "انتقال اصطکاک"، نخست با استفاده از دستگاه مغزه‌گیری، یک مغزه جزئی با قطر ۵۰ میلی‌متر و عمق ۲۵ میلی‌متر روی سطح بتن تعبیه می‌شود (شکل ۴-الف).



الف: تعبیه مغزه روی نمونه

در شکل ۴-ب، سطح نمونه‌ی مغزه‌گیری شده قابل مشاهده است. در شکل ۴-ج نیز دستگاه انتقال اصطکاک نشان داده شده است.

همچنین برای اعمال چرخه‌های تغییرات دمایی روی نمونه‌ها، از گرم‌کن استفاده شده است. نخست نمونه‌های بتنی در گرم‌کن برای مدت ۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و بعد، نمونه‌ها را از گرم‌کن خارج و در فضای آزاد در دمای محیط برای مدت ۱۶ ساعت نگهداری شده‌اند [۳۸]. با انجام این روند، یک چرخه تغییرات دمایی کامل می‌گردد.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن (کیلوگرم بر مترمکعب)

| مقاومت<br>(مگاپاسکال) | نسبت |        | سیمان  | شن     | ماسه | آب |
|-----------------------|------|--------|--------|--------|------|----|
|                       | آب   | سیمان  |        |        |      |    |
| ۳۰                    | ۰/۵  | ۴۱۵/۹۲ | ۶۸۶/۸۳ | ۸۶۳/۶۳ | ۲۰۶  |    |

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده

#### ۳-۱- نفوذپذیری بتن در سنین مختلف

در شکل (۵) مقدار حجم نفوذ آب به داخل نمونه‌های بتنی عادی در زمان‌های ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز قابل مشاهده است. مطابق شکل (۵)، در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در نمونه‌ها نفوذ می‌کند و با گذشت زمان، به دلیل پر شدن منافذ و حفره‌های خالی توسط آب، از مقدار سرعت نفوذ کاسته می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش سن بتن، مقدار نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش پیدا نموده است. مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز به ترتیب برابر ۱۸/۳۷، ۱۶/۹۹ و ۶/۸۸ میلی‌لیتر است. دلیل این کاهش، پیشرفت فرآیند هیدراسیون سیمان است که منجر به کاهش منافذ و قطع کانال‌های موئینه گردیده است.



د: تثبیت دستگاه روی نمونه



ه: اعمال لنگر پیچشی

شکل ۴: آزمون انتقال اصطکاک

در این حالت مقدار حداکثر تنش برشی ایجاد شده تحت اثر پیچش عبارت است از رابطه (۳):

$$(\tau_{E-\max}) = \frac{T r}{J}, J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau_{E-\max} = \frac{2T}{\pi r^3}$$

که در آن  $r$  شعاع مغزه جزئی و  $J$  ممان اینرسی پیچشی است.

#### ۳-۲- ساخت نمونه‌ها

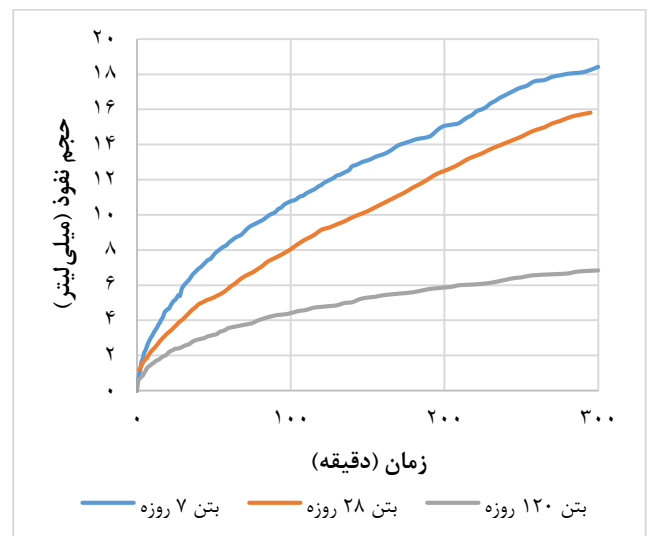
برای انجام آزمایش‌های محفظه استوانه‌ای و انتقال اصطکاک اقدام به ساخت نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر شد. نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر چرخه‌های دمایی بر نتایج آزمایش‌ها نیز، نمونه‌ها تحت چرخه‌های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه قرار گرفتند. طرح اختلاط بتن استفاده شده در این تحقیق در جدول (۳) نشان داده شده است (مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال). در کل در این تحقیق به تعداد ۱۱۰ نمونه با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شده است.



### ۳-۲- نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد محیطی در سنین مختلف

در شکل (۶) مقدار حج نفوذ آب در بتن تحت چرخه-های مختلف دمایی قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که نفوذپذیری نمونه‌ها تحت تأثیر چرخه‌های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دوره در بتن ۷ روزه به ترتیب برابر ۸۹/۵، ۱۲۰، ۱۴۷ و ۱۸۰ میلی‌لیتر است. این مقدار برای بتن ۲۸ روزه برابر ۶۱، ۸۹، ۱۱۶ و ۱۳۶ میلی‌لیتر و برای ۱۲۰ روزه برابر ۲۹/۶، ۶۱، ۹۰ و ۱۱۶ میلی‌لیتر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد چرخه‌های تغییرات دما، نفوذپذیری نمونه‌ها نیز افزایش قابل ملاحظه داشته است. همچنین با مقایسه نمونه‌های عادی با نمونه‌های قرارگرفته در چرخه‌های مختلف مشاهده می‌شود که تعداد ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه باعث افزایش نفوذپذیری بتن ۷ روزه به مقدار ۴/۸، ۶/۵، ۷/۹ و ۹/۸ برابر افزایش یافته است. همچنین برای بتن ۲۸ روزه به مقدار ۳/۶، ۵/۳، ۶/۸ و ۸ برابر و برای بتن ۱۲۰ روزه به مقدار ۴/۱، ۸/۷، ۱۲/۷ و ۱۶/۵ برابر شده است.

در نمودارهای شکل ۶ دیده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های دمایی در حجم نفوذ آب (توسط آزمایش محفظه استوانه‌ای دریافت شده) افزایش دیده شده است. در بتن، آب آزاد وجود دارد و تحت تأثیر چرخه‌های دمایی، آب آزاد از سطحی بتن شروع به تبخیر می‌کند و با افزایش تعداد چرخه‌های دمایی از لایه‌های داخلی نیز به شکل تدریجی تبخیر می‌شود. هر چه به تعداد چرخه‌ها اضافه شود در نفوذپذیری بتن، افزایش بیشتری دیده می‌شود. دلیل افزایش نفوذپذیری این است که تبخیر آب آزاد منجر به بیشتر شدن اندازه خلل و فرج در بتن می‌گردد و این روند مقدار آب نفوذ کرده در بتن را افزایش می‌دهد.

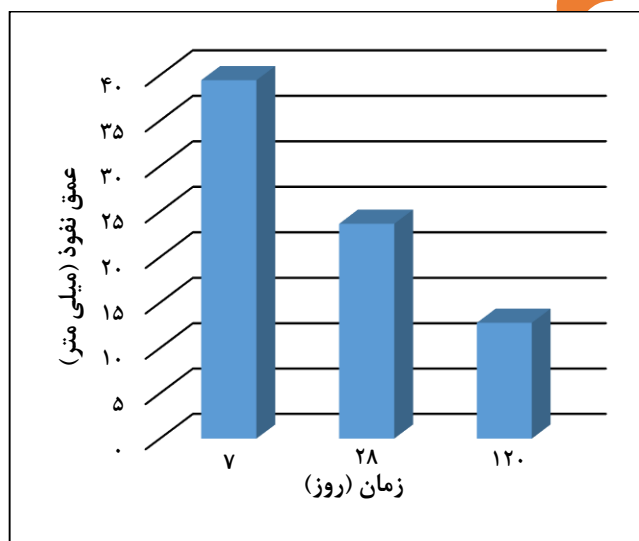


شکل ۵: تغییرات حجم نفوذ نمونه‌های بتن عادی

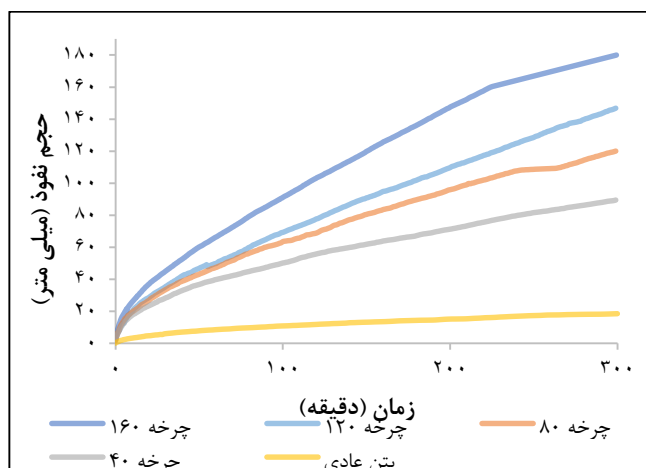
با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌ها و با پیشرفت واکنش هیدراسیون، موجب پر شدن فضاهای خالی و منافذ با محصولات این واکنش شده و لذا باعث کاهش مقدار نفوذپذیری بتن می‌گردد. همچنین که فرایند هیدراسیون ادامه پیدا می‌کند، مقاومت پیوند ذرات در خمیره سیمان افزایش یافته و خلل و فرج بین ذرات در خمیره سیمان کاهش می‌یابد. فضاهای موجود در خمیره سیمان تازه که از همان ابتدا مملو از آب شده است به کمک فرآورده‌های ناشی از فعل و انفعالات هیدراسیون سیمان، اشغال شده و پر می‌شوند و لذا سبب کاهش مقدار نفوذپذیری بتن می‌شود [۳۹]. در تحقیقات دیگر که با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای انجام شده است نیز نتایج تقریباً مشابهی بدست آمده است. در تحقیقی مقدار حجم نفوذ آب به بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز برابر ۲۴/۵، ۱۶/۷۴ و ۱۳/۱۶ میلی‌لیتر به دست آمده که مشابهت زیادی با نتایج حاصل از این تحقیق که برابر ۱۸/۴، ۱۶ و ۶/۸ میلی‌لیتر می‌باشد دارد [۸]. همچنین مقدار تفاوت بین نتایج به این دلیل است که بتن بکار گرفته شده در تحقیق مذکور دارای مقاومت فشاری کمتر از بتن استفاده شده در این تحقیق دارد. در تحقیقی دیگر بیان شده است که با افزایش مقاومت فشاری و طول دوره عمل‌آوری، نفوذپذیری بتن دچار کاهش می‌گردد [۴۰].

### ۳-۳- عمق نفوذ بتن در سنین و شرایط مختلف

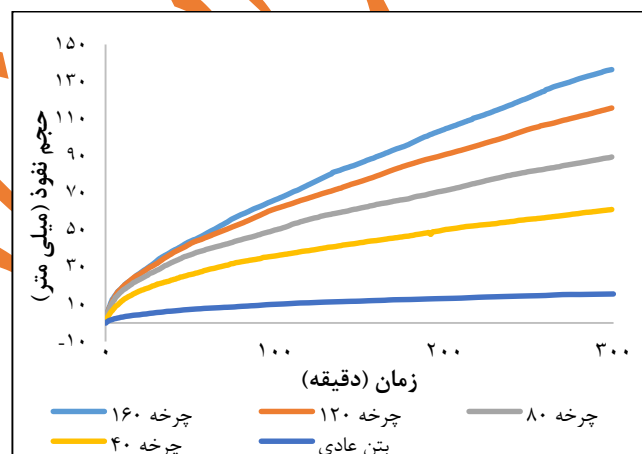
با شکستن بتن‌ها و اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ آب به بتن، مقدار عمق نفوذ آن‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار عمق نفوذ آب در بتن‌های با سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز به ترتیب برابر  $۳۹/۵$ ،  $۲۳/۷$  و  $۱۲/۸$  میلی متر به دست آمده است. به عبارتی با گذشت ۱۲۰ روز، مقدار عمق نفوذ نمونه‌ها حدود ۶۸ درصد کاهش داشته است. در این شکل عمق نفوذ نمونه‌های قرار گرفته در شرایط عادی نشان داده شده است. طبق نتایج حاصله، نمونه‌های که تحت تاثیر چرخه‌های دمایی قرار گرفته، در مقدار عمق نفوذ آنها افزایش فراوان مشاهده شده است. این افزایش بدین علت است، زمان که آب آزاد تحت تاثیر دما از لایه‌های بتن تبخیر می‌شود در مقدار منافذ افزایش پیدا می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌ها، این روند نیز افزایش می‌یابد و در مقابل در آزمایش نفوذپذیری، مقدار زیادی از آب تحت فشاری دستگاه استوانه‌ای داخل بتن می‌گردد و عمق نفوذ را افزایش می‌دهد. روند فوق در شکل (۸) نیز قابل مشاهده است.



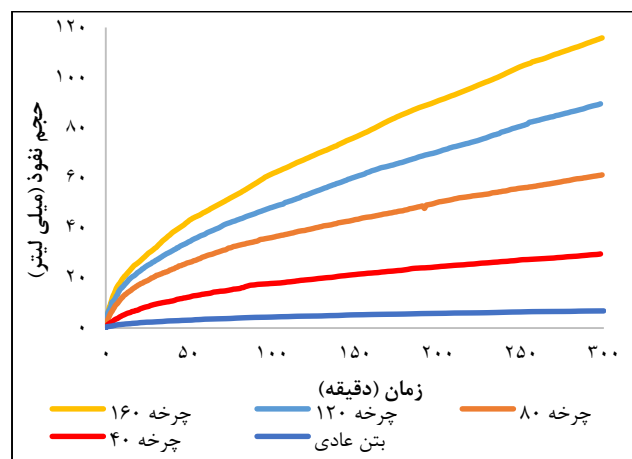
شکل ۷: عمق نفوذ نمونه‌ها در شرایط عادی



الف: نفوذپذیری بتن ۷ روزه

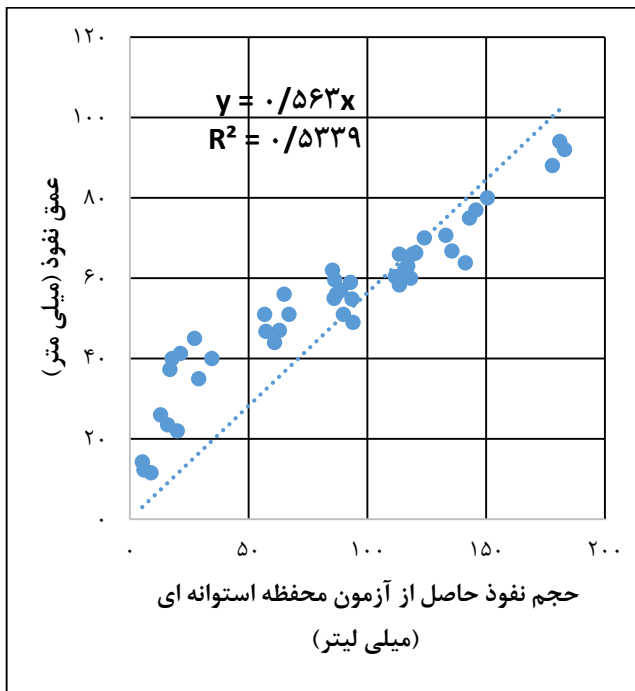


ب: نفوذپذیری بتن ۲۸ روزه



ج: نفوذپذیری بتن با عمل‌آوری ۱۲۰ روزه

شکل ۶: نفوذپذیری نمونه‌ها تحت چرخه‌های دمایی

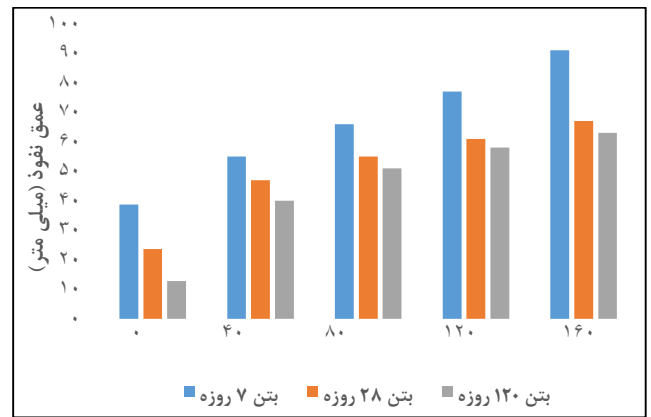


شکل ۹: نمودار کالیبراسیون تبدیل حجم نفوذ به عمق نفوذ

### ۳-۵ - اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن در شرایط عادی و حاد بدون شکستن نمونه

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن بصورت مستقیم می‌بایست از المان بتنی مغزه‌گیری انجام شود و سپس مغزه‌ی آزمایشی در زیر جک بتن شکن قرار گرفته و دچار شکست گردد. اما با آزمون انتقال اصطکاک بدون شکست نمونه و بدون نیاز به بردن بتن به آزمایشگاه می‌توان مقدار مقاومت فشاری بتن را با دقت بالا و بصورت مستقیم و در هر شرایط و مکانی اندازه‌گیری نمود. این آزمون دارای خرابی بسیار جزئی می‌باشد که آسیبی جدی به سازه اعمال نمی‌نماید.

در شکل (۱۰) نتایج آزمون "انتقال اصطکاک" حاصل از نمونه‌های بتنی در شرایط عادی و شرایط حاد و در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در سن‌های مختلف، با افزایش سن نمونه‌ها در نتایج انتقال اصطکاک نیز افزایش دیده شده است. این افزایش در نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه به ۱۴ درصد و در نمونه‌های ۱۲۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه ۴۲ درصد می‌رسد. علت افزایش مقاومت درجای بتن با گذشت زمان، تشکیل بیشتر محصولات هیدراسیون



شکل ۸: عمق نفوذ نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف دمایی

### ۳-۴ - رابطه‌ی عمق نفوذ با حجم نفوذ

همانطور که ذکر گردید، طبق استانداردهای آلمانی و بریتانیایی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری (عمق نفوذ) نمونه‌ها می‌بایست پس از انجام آزمایش، بتن به دو نیم تقسیم شود. در تحقیق حاضر با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای بدون شکست نمونه مقدار حجم نفوذ بدست آمده است. سپس مطابق شکل (۹) با رسم نمودار کالیبراسیون می‌توان بدون شکستن نمونه، مقدار عمق نفوذ آب به بتن را با دقت بالا اندازه‌گیری نمود.

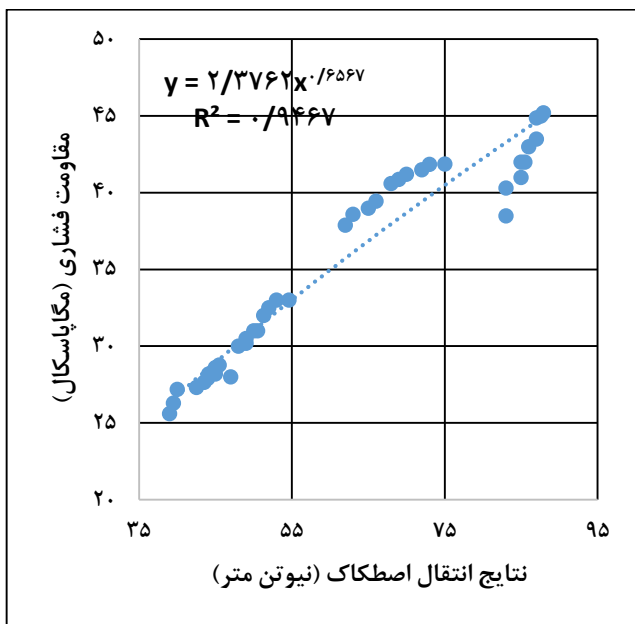
مطابق نمودار کالیبراسیون شکل (۹) می‌توان با استفاده از معادله (۴) و با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای به جای عبارت  $X$  مقدار عمق نفوذ آب به بتن را با ضریب تعیین حدود ۹۵ درصد و بدون شکستن آن اندازه‌گیری نمود.

با توجه به نموداری شکل (۹) دیده می‌شود که در بین نفوذپذیری و عمق نفوذ یک رابطه‌ی مستقیم برقرار است، به دلیل این که با افزایش حجم نفوذ، در عمق نفوذ نیز افزایش مشاهده شده است.

$$y = 0.56x \quad (4)$$

عبارت  $X$  مقدار مقاومت فشاری بتن را با ضریب همبستگی  $۹۶/۶$  درصد و بدون شکستن آن اندازه‌گیری نمود. قابل ذکر است که از تحلیل نمودار فوق مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری با مقاومت سطحی رابطه‌ی مستقیمی دارد.

$$y = ۲,۳۸x^{۰,۶۶} \quad (۵)$$



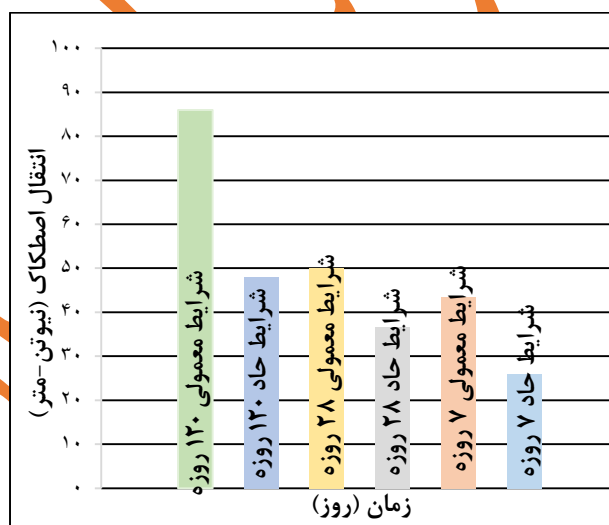
شکل ۱۱: نمودار تبدیل نتایج انتقال اصطکاک به مقاومت فشاری

#### ۴ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های درجای ابداعی، علاوه بر بررسی تاثیر چرخه‌های مختلف دمایی (۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه) روی نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن در سنین مختلف، اقدام به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن بدون نیاز به شکستن آن شده است. با توجه به نتایج حاصله: مطابق نمودار کالیبراسیون بدست آمده می‌توان با استفاده از معادله  $y = ۰,۵۶x$  و با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای به جای عبارت  $x$ ، مقدار عمق نفوذ آب به بتن در شرایط عادی و حاد را با ضریب تعیین حدود ۹۵ درصد و بدون شکستن آن اندازه‌گیری نمود.

می‌باشد که سبب یک ساختار متراکم‌تر شده و باعث افزایش مقاومت می‌شود [۴۱].

با توجه به شکل (۱۰)، مقاومت درجای بتن در سن ۷ روزه تحت چرخه ۱۶۰ سیکل برابر ۲۶ نیوتن متر می‌باشد در صورتیکه برای نمونه معمولی برابر ۴۳ نیوتن متر می‌باشد. این مورد در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه نیز برای بتن‌های تحت شرایط حاد به ترتیب برابر ۳۶/۶ و ۴۸ نیوتن متر می‌باشد در صورتیکه برای بتن‌های معمولی برابر ۵۰ و ۸۶ نیوتن متر بدست آمده است.



شکل ۱۰: نتایج روش انتقال اصطکاک تحت اثر شرایط عادی و حاد

در شکل (۱۱) نمودار حاصل از نتایج آزمون انتقال اصطکاک با آزمون مقاومت فشاری بتن‌ها در سنین مختلف و تحت شرایط عادی و حاد نشان داده شده است.

در نتیجه اعمال چرخه‌های تغییرات دمایی باعث ایجاد تنش‌ها در بتن می‌شود. چنانچه مقاومت کششی بتن کمتر از مقدار تنش‌های مذکور باشد باعث ایجاد ترک در بتن می‌گردد. تغییرات دما، به تدریج باعث کاهش رطوبت داخل بتن و تبخیر آب از منافذ آن می‌شود. با وجد آمدن چنین فضاهای خالی‌ای در بتن و سطح آن، باعث ایجاد ترک‌های ریز شده و همین امر سبب کاهش مقاومت درجای بتن می‌شود.

مطابق نمودار کالیبراسیون شکل (۱۲) می‌توان با استفاده از معادله (۵) و با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک به جای

- [۶] Naderi, M. "Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method. Registration of Patent in Companies and industrial property Office, ۲۰۱۰.
- [۷] Naderi, Mahmood, Alireza Kaboudan, and Kimiya 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* ۸, no. ۲, ۲۵-۴۳, ۲۰۲۱.
- [۸] Naderi, Mahmood, Alireza Kaboudan, and Amin 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* ۶, no. ۱, ۱۱۶-۱۲۱, ۲۰۱۸.
- [۹] Naderi, M., Kaboudan, A., & Amin, A. M. Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using "Cylindrical chamber" method. Thesis of, Kaboudan, A., Ph.D. Student. Imam Khomeini International University, Civil Department, ۲۰۲۰.
- [۱۰] Standard, A. S. T. M. "Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers (ASTM D4۵۴۱)." ASTM International: West Conshohocken, PA ۲۰۲۲.
- [۱۱] Kakooei, Saeid, Hazizan Md Akil, Morteza Jamshidi, and Jalal Rouhi. "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures." *Construction and Building Materials* ۲۷, no. ۱: ۷۳-۷۷, ۲۰۱۲.
- [۱۲] Naderi, Mahmood. "Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials." *Construction and Building Materials* ۱۹, no. ۶: ۴۵۴-۴۵۹, ۲۰۰۵.
- [۱۳] Naderi, M. and Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., "Curing and Shrinkage Effect on the PMM/Concrete Bond, Using "Friction-transfer" and "Pull-off" Methods". *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, ۳۳(۱), ۸۵-۱۰۰, ۲۰۲۰.
- [۱۴] Naderi, M. "New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete." *Journal of Testing and Evaluation* ۳۵, no. ۶: ۶۰۲-۶۰۸, ۲۰۰۷.

- مطابق نمودار کالیبراسیون بدست آمده می‌توان با استفاده از معادله  $y = 2,38x^{0,66}$  و با جایگذاری نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک به جای عبارت  $x$ ، مقدار مقاومت فشاری بتن را با ضریب همبستگی ۹۶/۶ درصد و بدون شکستن آن اندازه‌گیری نمود.

- با افزایش مقاومت درجای بتن مقدار حجم نفوذ آب به بتن کاهش پیدا نموده است. با افزایش مقدار مقاومت درجای بتن به میزان ۱۵ درصد، مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن حدود ۱۴۰ درصد کاهش داشته است.

- با مقایسه نمونه‌های عادی با نمونه‌های قرار گرفته در چرخه‌های مختلف تغییرات دمایی، مشاهده می‌شود که تعداد ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ چرخه باعث افزایش نفوذپذیری بتن به مقدار ۴/۱، ۸/۷، ۱۲/۷ و ۱۶/۵ برابر شده است.

- شرایط حاد تغییرات دمایی، دارای تاثیرات منفی روی مقاومت درجای بتن می‌باشد به گونه‌ای که مقاومت بتن تحت ۱۶۰ چرخه تغییرات دمایی بیش از ۴۴ درصد کاهش پیدا نموده است.

## منابع

- [۱] Zareei, Seyed Alireza, Farshad Ameri, Farzan Dorostkar, and Mojtaba Ahmadi. "Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties." *Case studies in construction materials* ۷, ۷۳-۸۱, ۲۰۱۷.
- [۲] Mardani-Aghabaglou, Ali, Murat Tuyan, and Kambiz Ramyar. "Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates." *Materials and Structures* ۴۸, ۲۶۲۹-۲۶۴۰, ۲۰۱۵.
- [۳] Afroughsabet, Vahid, and Togay Ozbakkaloglu. "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers." *Construction and building materials* ۹۴ (۲۰۱۵): ۷۳-۸۲.
- [۴] DIN. Test methods for concrete, Deutsches Institut für Normung, Germany. ۱۰۴۸-۵, ۱۹۹۱.
- [۵] British Standards Institution. Testing Hardened Concrete: Depth of Penetration of Water Under Pressure. BSI, ۲۰۰۹.



- [۲۵] Kou, Shi Cong, Chi Sun Poon, and Miren Etxeberria. "Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures." *Cement and Concrete Composites* ۵۳, ۷۳-۸۲, ۲۰۱۴.
- [۲۶] Kim W, Choi H, Lee T. Residual Compressive Strength Prediction Model for Concrete Subject to High Temperatures Using Ultrasonic Pulse Velocity. *Materials*. ۲۰۲۳ Jan ۵;۱۶(۲):۵۱۵.
- [۲۷] B. Vidya, K. Srinivasa R. ۲۰۱۹. Effect of Thermal Cycles On Concrete: An Overview, *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. ۵(۳), ۶-۱۴, ۲۰۱۹.
- [۲۸] An, Mingzhe, Hanfeng Huang, Yue Wang, and Guanyuan Zhao. "Effect of thermal cycling on the properties of high-performance concrete: Microstructure and mechanism." *Construction and Building Materials* ۲۴۳, ۱۱۸۳۱۰, ۲۰۲۰.
- [۲۹] Huang, Hanfeng, Mingzhe An, Yue Wang, Ziruo Yu, and Wenyu Ji. "Effect of environmental thermal fatigue on concrete performance based on mesostructural and microstructural analyses." *Construction and Building Materials* ۲۰۷, ۴۵۰-۴۶۲, ۲۰۱۹.
- [۳۰] Khan, M. S., Saud Almutairi, and H. Abbas. "Mechanical properties of concrete subjected to cyclic thermal loading." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* ۲۶, no. ۷, ۲۸۵۵-۲۸۶۸, ۲۰۲۲.
- [۳۱] Ye, Zhongzhi, Guanqun Guo, Longlong Su, and Yongsheng Jiang. "Experimental study on mechanical properties of concrete under sub-high temperature cycles." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. ۱۹۷۸, no. ۱, p. ۰۱۲۰۰۷. IOP Publishing, ۲۰۲۱.
- [۳۲] Gan L, Xu W, Shen Z, Xu L, Zhang W, Zhang H, Abbas MA, Chen G. Experimental and numerical investigations on damage evolution of concrete under sulfate attack and freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*. ۲۰۲۳ Jul ۱۵;۷۱:۱۰۶۴۶۹.
- [۳۳] Esmaeili H, Hajiani Boushehrian A. Effect of Nano Titanium Dioxide on the Permeability and Compression Strength of Concrete. *Concrete Research*. ۲۰۱۹ Dec ۲۲;۱۲(۴):۱۱۱-۲۲.
- [۱۵] Naderi, M., and R. Shibani. "New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, Aust." *J. Basic Appl. Sci* ۷, no. ۲: ۴۳۸-۴۴۷, ۲۰۱۳.
- [۱۶] Saberi Varzaneh, Ali, and Mahmood Naderi. "Study of bond strength between polymer-modified mortars/concrete and their mechanical properties using "friction-transfer" and "pull-off" methods." *Mechanics Of Advanced Composite Structures* ۸, no. ۱: ۱۷۱-۱۸۴, ۲۰۲۱.
- [۱۷] Varzaneh, A. Saberi, and 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* ۱۰, ۲۰۲۱.
- [۱۸] Saberi Varzaneh, Ali, and Mahmood Naderi. "Bond Strength of Fiber-Reinforced Mortar and Concrete Interface under Pre-Stress." *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* ۱۱, no. ۲, ۲۰۲۳.
- [۱۹] Naderi, Mahmood, and Oveys Ghodousian. "Adhesion of self-compacting overlays applied to different concrete substrates and its prediction by fuzzy logic." *The Journal of Adhesion* ۸۸, no. ۱۰: ۸۴۸-۸۶۵, ۲۰۱۲.
- [۲۰] Naderi, Mahmood. "Effects of cyclic loading, freeze-thaw and temperature changes on shear bond strengths of different concrete repair systems." *The Journal of Adhesion* ۸۴, no. ۹: ۷۴۳-۷۶۲, ۲۰۰۸.
- [۲۱] Naderi, Mahmood. "An alternative method for in situ determination of rock strength." *Canadian geotechnical journal* ۴۸, no: ۱۹۰۱-۱۹۰۵, ۲۰۱۱.
- [۲۲] Naderi, M. "Evaluating in situ shear strength of bituminous pavements." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials* ۱۵۹, no. ۲, ۶۱-۶۵, ۲۰۰۶.
- [۲۳] Phan, Long T., and Nicholas J. Carino. "Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature." *Journal of Materials in Civil Engineering* ۱۰, no. ۱, ۵۸-۶۵, ۱۹۹۸.
- [۲۴] Chang, Yun-Fei, Yih-Houng Chen, Maw-Shyong Sheu, and George C. Yao. "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures." *Cement and concrete research* ۳۶, no. ۱۰: ۱۹۹۹-۲۰۰۵, ۲۰۰۶.

[۳۴] Golestan A, Hajiani Boushehrian A. Investigation the Application of the Steel Fiber in Special Steel Fiber Concrete and its Effect on Concrete Permeability and Compression Strength Parameters. Concrete Research. ۲۰۱۷ Jan ۲۰;۹(۲):۱۱۱-۲۱.

[۳۵] ASTM C۱۳۶-۱۹. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, ۲۰۱۹.

[۳۶] ASTM, ASTM. "Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate." ASTM West Conshohocken, PA .۲۰۱۵.

[۳۷] ASTM. Standard C۱۲۷. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ۲۰۱۵.

[۳۸] ASTM. Standard D۶۹۴۴. Standard Practice for Resistance of Cured Coatings to Thermal Cycling, ۲۰۲۰.

[۳۹] ASTM C۱۶۷۹-۱۸. Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry, ۲۰۱۸.

[۴۰] Naderi, M., B. Maleki, and A. F Amini. "ASSESSING THE PERMEABILITY OF THE OIL AND ITS COMPONENTS INTO POROUS CONCRETE USING NEW CYLINDRICAL CHAMBER METHOD." Sharif Journal of Civil Engineering ۳۳, no. ۱, ۱, ۸۹-۹۳, ۲۰۱۷.

[۴۱] Teriqet, A., Mohammadi., M., & Medras Y. Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. Sharif. J. of Civil Eng, ۳۴(۴), ۸۲-۵۷, ۲۰۱۹.

نشریه