

The effect of short and long-term temperature cycles on the volume of water penetration and the surface layer of concrete using modern tests of cylindrical chamber and friction transfer

Mahmood Naderi^{1*}, Ali Saberi Varzaneh², Sardar Wali Din³

1- Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Ph.D. Structural, Head of Research Group of Natural Disaster Research Institute Tehran, Iran.

3- Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

The penetration of water into concrete can reduce the durability and reliability of concrete. Especially, successive increase and decrease in temperature causes negative changes on the physical and chemical characteristics of concrete, and this issue can reduce the performance of concrete against water penetration. Therefore, it is necessary to investigate the effects of temperature cycles on the surface resistance of concrete and the amount of penetration volume and depth of water penetration into concrete. Also, considering that according to international standards, to measure the permeability of concrete, a concrete sample must be broken, so a new test is needed to measure the volume of water penetration into concrete without breaking the sample. Before starting the test; First, the concrete samples were placed in the oven for a certain time and temperature, and then they were taken out of the oven and kept at room temperature for 16 hours. In this method, a cycle of temperature changes is completed. With the completion of the desired number of cycles, the samples are removed from this process and subjected to permeability and friction transfer tests, and finally, the sample is divided in two halves by a compression jack and its wetted surface is measured to obtain the depth of penetration. has been According to the results, by comparing the volume of water infiltration into concrete in normal samples with the samples placed in different temperature cycles, it is observed that the cycles of 20, 40, 140 and 160 respectively increase the volume of water infiltration. It has been increased to concrete by 2.2, 4.3, 14.9 and 16.8. In addition, by applying the above cycles, the strength obtained from the friction transfer test at the age of 120 days has decreased by 2.4, 6, 65, and 79 percent, respectively, compared to normal concrete. Also, according to the obtained correlation coefficients, it is possible to measure the depth of water penetration and the compressive strength of concrete using the cylindrical chamber test and friction transfer with the provided equations and with high accuracy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 April 2023

Revise Date: 04 July 2023

Accept Date: 15 July 2023

Keywords:

Permeability

Concrete

Temperature

In situ test

Penetration Depth

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392852.3095>

*Corresponding author: Mahmood Naderi.

Email address: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

تاثیر سیکل‌های دمایی کوتاه و بلندمدت بر حجم نفوذ آب و لایه سطحی بتن با استفاده از آزمون‌های نوین محفظه استوانه‌ای و انتقال اصطکاک

محمود نادری^{۱*}، علی صابری ورزنده^۲، سردارولی دین^۳

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

چکیده

نفوذ آب به داخل بتن می‌تواند باعث کاهش دوام و پایداری بتن گردد. مخصوصاً افزایش و کاهش دما به صورت پی‌درپی سبب تغییرات منفی بر مشخصات فیزیکی و شیمیایی بتن شده و همین موضوع می‌تواند باعث کاهش کارکرد بتن در برابر نفوذ آب گردد. لذا نیاز می‌باشد که تاثیرات سیکل‌های دمایی بر مقاومت سطحی بتن و مقدار حجم نفوذ و عمق نفوذ آب به بتن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه طبق استانداردهای بین‌المللی، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن باید آزمون‌های بتنی شکسته شود، لذا نیاز به آزمون جدیدی است که بدون شکست آزمون، حجم نفوذ آب به بتن اندازه‌گیری شود. قبل از شروع آزمایش؛ نخست آزمون‌های بتنی در گرم‌کن برای مدت و دمای مشخص قرار گرفته و سپس از گرم‌کن خارج و در دمای محیط برای ۱۶ ساعت نگهداری شده‌اند. به این ترتیب یک سیکل دمایی کامل گردید. با تکمیل شدن تعداد سیکل‌های مورد نظر، آزمون‌ها از این روند خارج و تحت آزمایش‌های نفوذپذیری و انتقال اصطکاک قرار گرفته و در نهایت آزمون بتنی توسط جک فشاری به دو قسمت تقسیم شده و سطح خیس شده آن برای دریافت عمق نفوذ، اندازه‌گیری شد. طبق نتایج حاصله، با مقایسه حجم نفوذ آب به بتن در آزمون‌های عادی با آزمون‌های قرارگرفته در سیکل‌های مختلف دمایی مشاهده می‌شود که سیکل‌های ۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ چرخه به ترتیب باعث افزایش حجم نفوذ آب به بتن به مقدار ۲/۲، ۴/۳، ۱۴/۹ و ۱۶/۸ برابر شده است. در ضمن با اعمال سیکل‌های فوق مقاومت حاصل از آزمون انتقال اصطکاک در سن ۱۲۰ روزه، به ترتیب باعث کاهش ۲/۴، ۶، ۶۵ و ۷۹ درصدی نسبت به بتن عادی گردیده است. همچنین با توجه به ضرایب همبستگی به‌دست آمده، می‌توان با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای و انتقال اصطکاک، عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن را با معادلات ارائه‌شده و با دقت بالایی اندازه‌گیری نمود.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، بتن، دما، آزمون درجا، عمق نفوذ.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392852.3095	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۴/۲۴	۱۴۰۲/۰۴/۲۴	۱۴۰۲/۰۴/۱۳	۱۴۰۲/۰۲/۰۳
محمود نادری			*نویسنده مسئول:		
Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir			پست الکترونیکی:		

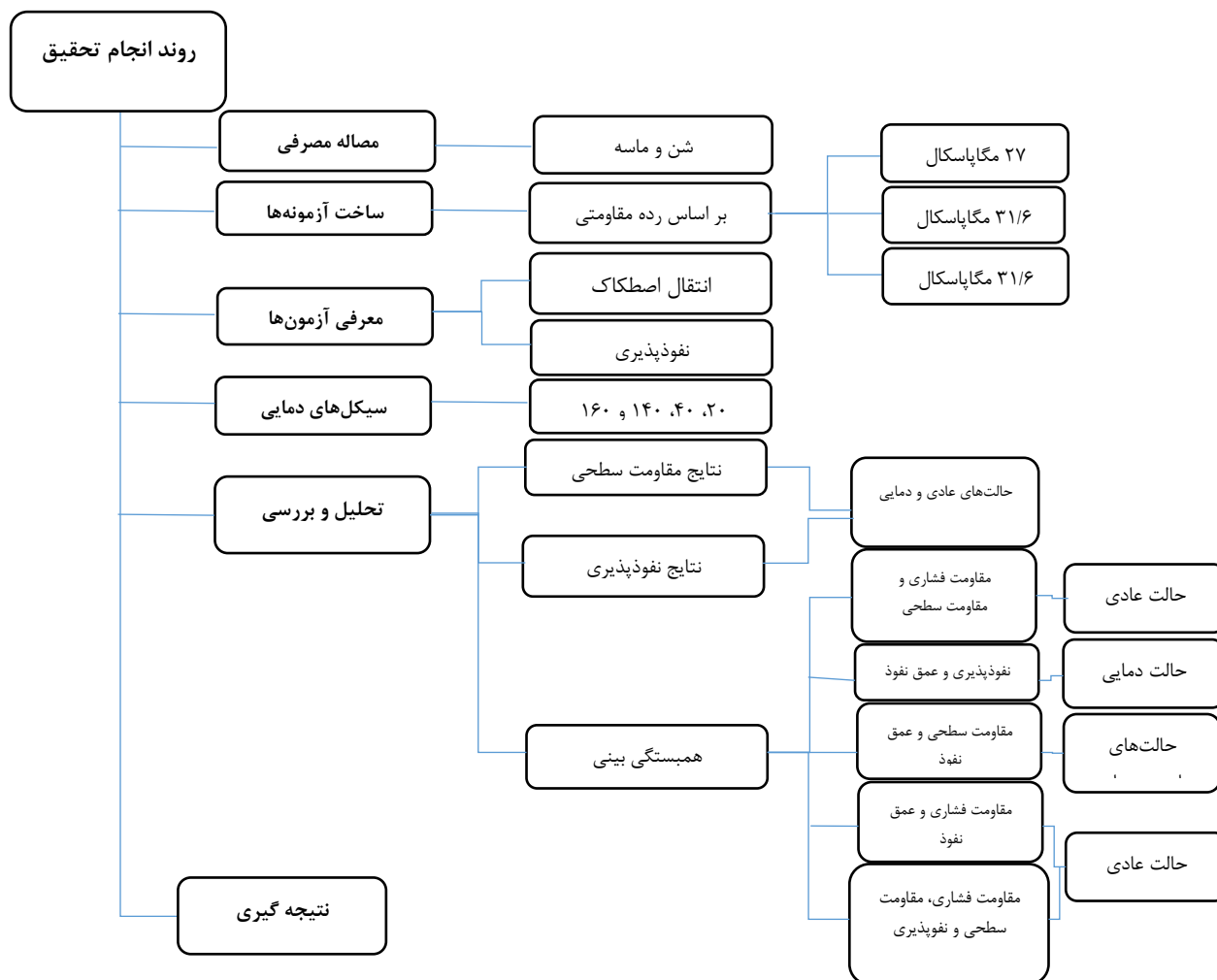
۱- مقدمه

دمای محیط به طور متناوب و به دلایل مختلف از جمله شرایط جوی مانند آفتاب و باد در نوسان است. سیکل‌های مختلف دمایی باعث ایجاد تغییراتی مانند انقباض و انبساط حرارتی و تنش حرارتی در مواد سیمانی می‌شود. به خصوص در مناطق گرمسیر یا بیابانی، تغییر سریع دمای خارجی می‌تواند اختلاف دمای داخلی و خارجی را در بتن افزایش دهد که از این رو باعث ایجاد تنش حرارتی می‌شود. سازه‌های بتنی به دلیل افزایش و کاهش دما، تحت سیکل‌های حرارتی قرار گرفته که به عنوان نوعی بار دینامیکی بر روی سازه‌ها عمل می‌کند. برای استفاده از سازه‌های بتنی در محیط‌های متأثر از سیکل دمایی می‌بایست میدان حرارتی غیریکنواخت ناشی از افزایش درجه حرارت، تغییرات فیزیکی یا شیمیایی در بتن، کرنش حرارتی و تغییر شکل بتن مورد بررسی قرار گیرد [۱-۲]. مطالعات نشان داده که سیکل‌های مختلف دمایی دارای تأثیر منفی روی خواص مکانیکی بتن بوده و با افزایش تعداد سیکل‌ها، عملکرد بتن کاهش می‌یابد [۳-۴]. در کل، خواص بتن به طور قابل توجهی با تغییرات دما دچار تغییر شده و در ضمن ویژگی‌های مخلوط بتن به شرایط محیطی وابستگی زیادی دارد [۵-۷]. در تحقیقی روی تأثیر سیکل‌های مختلف دمایی بر مقاومت بتن مشاهده شد که سیکل‌های دمایی در محدوده ۳۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش مقاومت فشاری و مقاومت برشی بتن به ترتیب به اندازه ۴/۹ و ۱۷/۴ درصد گردید [۸]. افزودنی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت بتن در دماهای مختلف دارد؛ زیرا نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از ۷ درصد دوده سیلیسی باعث افزایش ۱۲۸ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود [۹] و نیز دریافت شده که مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی حاوی ۰/۲ درصد فنرهای بازیافتی، سه برابر بیشتر از آزمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف فولادی یا پلی‌پروپیلن می‌باشد [۱۰-۱۱].

علاوه بر مشخصات مکانیکی بتن، مقدار نفوذپذیری نیز یکی از عوامل تأثیرگذار روی دوام بتن می‌باشد. نفوذ املاح معدنی به همراه آب به داخل بتن منجر به کاهش دوام و پایداری بتن می‌گردد [۱۲]. وقتی که بتن در برابر سیکل‌های مختلف دمایی قرار می‌گیرد، ساختار فیزیکی و ترکیبات شیمیایی آن دچار تغییرات می‌شود از جمله انقباض در اثر کاهش رطوبت، دهیدراته شدن خمیر سیمان و ایجاد ترک‌های ریز در سطح بتن. با افزایش دما، بر اثر خارج شدن رطوبت از ترکیبات سیلیکات کلسیم دهیدراته شده، فرایند شیمیایی تجزیه در خمیر سیمان آغاز می‌شود. با تکرار سیکل‌های تغییرات دمایی منجر به ایجاد تنش داخلی در بتن و به وجود آمدن ترک‌های ریز شده و باعث افزایش منافذ نفوذپذیر در بتن خواهد شد [۱۳-۱۴]. همچنین هنگامی که ناحیه مرزی انتقال، در معرض اختلاف دما قرار می‌گیرد، عرض ریزترک‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته و منجر به کاهش مقاومت و چسبندگی در بتن می‌شود [۱۵]. موارد فوق در سازه‌هایی که برای نگهداری آب استفاده می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا افزایش منافذ و ترک خوردگی بتن باعث افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام سازه می‌گردد [۱۶]. در کل، برخی عوامل تأثیرگذار روی نفوذپذیری بتن عبارت‌اند از نوع افزودنی‌ها [۱۷]، نوع عمل‌آوری [۱۸]، مشخصات ریزساختاری [۱۹] و مقاومت فشاری بتن [۲۰-۲۱]. علاوه بر در نظر گرفتن شرایط مختلف محیطی و دمایی بر مقاومت و دوام بتن، روش‌های اندازه‌گیری این آیتم‌ها نیز دارای اهمیت بوده و می‌تواند در نتایج تأثیرگذار باشد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن طبق استاندارد Din 1048-5 [۲۲]، آب با فشار ثابت و زمان معین به بتن وارد شده و سپس با شکستن نمونه، مقدار عمق نفوذ آب تعیین می‌گردد. در استاندارد BS EN 12390-8 [۲۳] نیز برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، نمونه بتنی تحت فشار آب برابر با ۵ بار قرار گرفته و سپس با شکستن نمونه باید حداکثر عمق نفوذ آب اندازه‌گیری گردد. همچنین در استاندارد ISO 7031 [۲۴] برای اندازه‌گیری عمق نفوذ، م-ی-بایست آزمونه به دو قسمت تقسیم شود. در تحقیقاتی نیز با ارائه توابع خطی یا توانی، مقدار عمق نفوذ آب را بر اساس تکنیک‌های جریبان ثابت آب یا فشار اعمالی تخمین زده‌اند [۸]، [۲۵-۲۸].

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن به‌صورت درجا نیز روش‌های زیادی ارائه گردیده است. همچنین تحقیقات زیادی در مورد تعیین مقاومت بتن با استفاده از روش‌های غیر مخرب انجام شده است. به‌عنوان مثال روش چکش اشمیت [۲۹] آزمون‌های غیر مخرب می‌باشند که به‌صورت غیرمستقیم قابلیت ارزیابی مقاومت فشاری بتن را دارا می‌باشند. اما وجود آرماتور، ترک یا حفره می‌تواند تاثيرات منفی بر نتایج داشته باشد. آزمون‌های مخرب نیز مانند روش مغزه‌گیری [۳۰]، روش بیرون کشیدن [۳۱] یا بارگذاری المان بتنی موجود می‌باشد که البته دارای معایبی هستند. از جمله صرف هزینه‌های بالا، تعطیلی بهره‌برداری از سازه در هنگام انجام آزمایش، قابلیت تکرار محدود و خسارت زیاد به المان سازه‌ای. در تحقیقی نیز مشاهده شده است که نتایج به‌دست آمده از آزمایش مغزه‌گیری، کمتر از مقاومت فشاری واقعی هست [۳۲].

در تحقیقات انجام شده‌ی پیشین، مقوله‌ی بررسی مقاومت سطح بتن تحت تأثیر سیکل‌های دمایی و رابطه‌ی آن بر دوام بتن مورد مطالعه قرار نگرفته است؛ همچنین آزمون‌های درجایی که قابلیت اندازه‌گیری مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن به‌صورت مستقیم و در هر مکانی، با هر شرایط دمایی، بدون تخریب نمونه و به‌صورت درجا داشته باشند، مورد نیاز می‌باشند. با توجه به توضیحات ارائه شده، لازم است تا مکانیسم تأثیر ماندگار سیکل‌های حرارتی بر دوام و مقاومت بتن مورد مطالعه قرار گیرد. لذا در این تحقیق از دو آزمون نوین و ابداعی با عنوان آزمون انتقال اصطکاک [۳۳] و آزمون محفظه استوانه‌ای [۳۴] برای اندازه‌گیری مستقیم مقاومت سطحی و عمق نفوذ بتن بدون شکستن نمونه و در شرایط عادی و حاد استفاده شده است. در تحقیقات قبلی، آزمون‌های فوق با آزمون‌های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج حاصله بیانگر دقت بالای این روش‌ها می‌باشد [۳۵-۴۲] نمونه‌های بتنی آزمایش شده در این تحقیق تحت سیکل‌های مختلف دمایی (۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ چرخه) و در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای رابطه‌ی بین حجم نفوذ آب با عمق نفوذ تعیین شده و توسط آزمون انتقال اصطکاک نیز رابطه‌ی بین مقاومت فشاری با مقاومت سطحی بتن به‌دست آمده است. خلاصه‌ی روند تحقیق حاضر در شکل ۱ قابل مشاهده است.

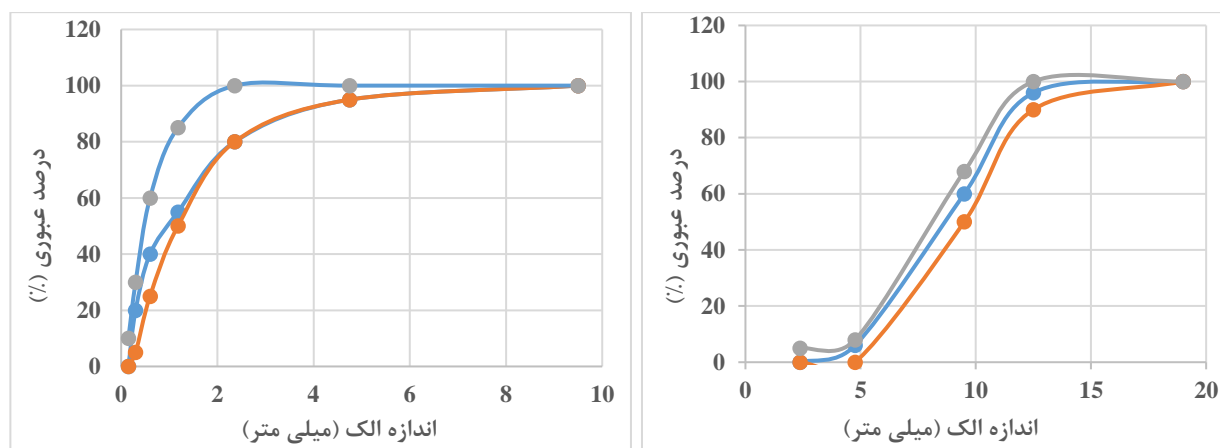


شکل ۱: خلاصه‌ی روند تحقیق انجام شده

۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح استفاده شده

در پژوهش حاضر برای تهیه‌ی آزمون‌های بتنی از سیمان پرتلند تیپ دو استفاده شده است. دانه‌بندی مصالح مصرفی (شن و ماسه) طبق استاندارد ASTM C136 انجام گرفت [۴۳] چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار جذب آب مصالح مصرفی (شن و ماسه) به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۲/۶ درصد به دست آمد، [۴۴-۴۵] منحنی-های دانه‌بندی درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌ها به همراه محدوده مجاز مشخص شده بر اساس استانداردهای یادشده در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. مدول نرمی ماسه به کاررفته در این پژوهش برابر با ۲/۸۱ است.



شکل ۲: نمودار دانه بندی ریزدانه ها

شکل ۳: نمودار دانه بندی درشت دانه ها

چسب مورد استفاده برای چسباندن صفحه فولادی به بتن در آزمون محفظه استوانه‌ای، از نوع رزین اپوکسی می‌باشد. چسب دومؤلفه‌ای رزین اپوکسی به کاررفته دارای نسبت اختلاط یک‌به‌یک می‌باشد. مدت زمان خشک شدن بعد از استفاده برابر ۴ ساعت بوده و دارای مقاومت فشاری و برشی به ترتیب برابر ۷۰ و ۱۵ مگا پاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته‌ی چسب مذکور نیز برابر ۱۲۷۵۰ مگاپاسکال می‌باشد.

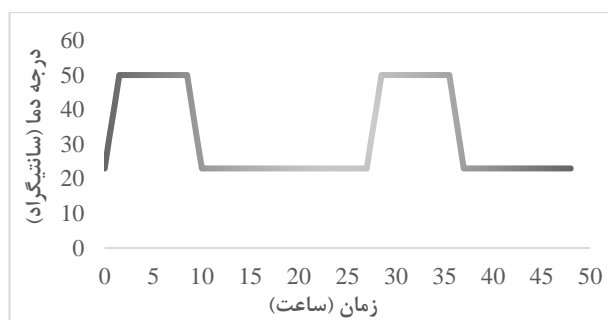
۲-۲- ساخت آزمون‌ها

طرح اختلاط بتن استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌های محفظه استوانه‌ای و انتقال اصطکاک اقدام به ساخت حدود ۲۰۰ آزمون مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر شد. آزمون‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱: طرح اختلاط بتن (کیلوگرم بر مترمکعب)

مقاومت					نسبت				
(مگاپاسکال)					آب				
سیمان					سیمان				
۳۰	۰/۵	۴۱۵/۹۲	۶۸۶/۸۳	۸۶۳/۶۳	۲۰۶				
									آب

برای بررسی تأثیر سیکل‌های دمایی بر نتایج آزمایش‌ها، آزمون‌ها تحت ۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ سیکل قرار گرفتند. روند اعمال سیکل‌های تغییرات دمایی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. نخست نمونه‌های بتنی در گرم‌کن برای مدت ۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس نگهداری شده و سپس از گرم‌کن خارج و در دمای محیط که حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد برای مدت ۱۶ ساعت نگهداری شدند. به این ترتیب یک چرخه تغییرات دمایی کامل می‌گردد.



شکل ۴: دو چرخه‌ی متوالی تغییرات دمایی

۲-۳- معرفی آزمون‌ها

نحوه انجام آزمایش انتقال اصطکاک

آزمون انتقال اصطکاک برای اندازه‌گیری مقاومت درجای بتن توسط نادری اختراع گردیده است [۳۳]. در آزمایش انتقال اصطکاک ابتدا باید مغزه‌ای جزئی با قطر ۵۰ میلی‌متر و عمق ۲۵ میلی‌متر روی سطح بتن تعبیه نمود. پس از تعبیه مغزه جزئی، مطابق شکل ۵-الف دستگاه فلزی انتقال اصطکاک بر روی مغزه جزئی قرار داده شده و با استفاده از پیچ‌های موجود در کناره‌ی دستگاه، تثبیت می‌شود. سپس مطابق شکل ۵-ب با استفاده از یک پیچش سنج دستی معمولی، به دستگاه فلزی، لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا مغزه جزئی دچار شکست گردد. مغزه شکسته شده در آزمون انتقال اصطکاک در شکل ۵-ج نشان داده شده است. در این آزمایش، در اثر لنگر پیچشی ایجاد شده، تنش‌های برشی به صورت عمود بر شعاع دایره ظاهر می‌شوند. تنش‌های برشی متناسب با فاصله از مرکز دایره بوده و بیشترین تنش برشی روی محیط دایره که بیشترین فاصله از مرکز را دارد رخ می‌دهد.



ب: اعمال لنگر پیچشی



الف: تثبیت دستگاه روی آزمون



ج: استوانه شکسته شده

شکل ۵- آزمون انتقال اصطکاک

در این حالت مقدار حداکثر تنش برشی ایجاد شده تحت اثر پیچش عبارت است از (رابطه ۱):

$$\tau_{E-\max} = \frac{Tr}{J}, J = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau_{E-\max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1)$$

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

روش محفظه استوانه‌ای

در پژوهش حاضر برای اندازه‌گیری نفوذپذیری آزمونه‌های بتنی از آزمایش "محفظة استوانه‌ای" که روشی جدیدی است به کار گرفته شده است. این روش که توسط نادری ابداع شده [۳۴]، روشی دقیق با کاربردی گسترده در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن و دیگر مصالح، چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل کار است. دستگاه آزمایش "محفظة استوانه‌ای" در شکل ۶-الف نشان داده شده است. برای استفاده از این دستگاه در ابتدا یک صفحه فلزی برای نصب دستگاه، به کمک چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده شده و چسب اضافه در اطراف صفحه فلزی برداشته می‌شود. بعد قسمت بالایی دستگاه که متشکل از محفظه فشار و میکرومتر است، بر روی صفحه فلزی به کمک پیچاندن دست نصب می‌شود. سپس محفظه با آب پر می‌شود. برای خروج هوای احتمالی موجود در دستگاه یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تهیه شده است. با پیچاندن دسته تنظیم فشار، فشار به اندازه مورد نیاز (۵ بار) تنظیم می‌گردد. به دلیل وجود اصطکاک داخلی با منافذ بتن، با گذشت زمان و افت فشار اعمالی، فشار دستگاه را می‌توان دوباره با پیچاندن دسته تنظیم فشار، دوباره به اندازه مورد نظر تنظیم نمود. با حرکت دادن دسته تنظیم فشار، پیستون فشار به طرف پایین حرکت کرده که حرکت پیستون به طرف پایین، توسط میکرومتر قابل قرائت است. عدد میکرومتر در زمان‌های مقرر از ابتدای آزمایش تا مدت ۵ ساعت خوانده می‌شود. با ثبت ارقام خوانده شده توسط میکرومتر و سطح اعمال فشار، حجم آب نفوذ کرده به بتن و نرخ نفوذ آب در زمان‌های مشخص با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید.

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

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

که در آن V حجم آب نفوذ کرده به بتن (ml)، h قرائت میکرومتر (mm)، A سطح مقطع آزمون عمل فشار (mm²)، Q نرخ نفوذ آب (ml/s) و t مدت زمان (s) است. پس اندازه گیری مقدار نفوذ پذیری بتن، آزمون بتنی توسط جک فشاری نصف شده (شکل ۶-ب) و سطح خیس شده توسط کولیس اندازه گیری می شود (شکل ۶-ج).



ج: اندازه گیری عمق نفوذ

ب: حالت دومین شدن آزمون

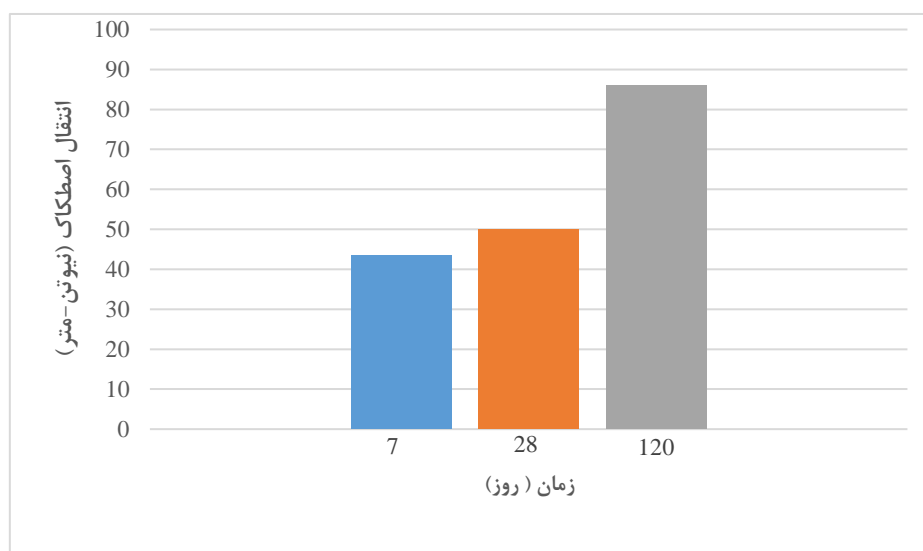
الف: اعمال فشار قرائت و ثبت داده ها

شکل ۶- آزمون محفظه استوانه ای

۳- تحلیل و بررسی نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک"

نتایج آزمون "انتقال اصطکاک" حاصل از آزمونهای بتنی عادی با عمل آوری در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه و باردهای مقاومتی فشاری ۴۳/۵، ۵۰ و ۸۶ نیوتن-متر در شکل ۷ نشان داده شده است.

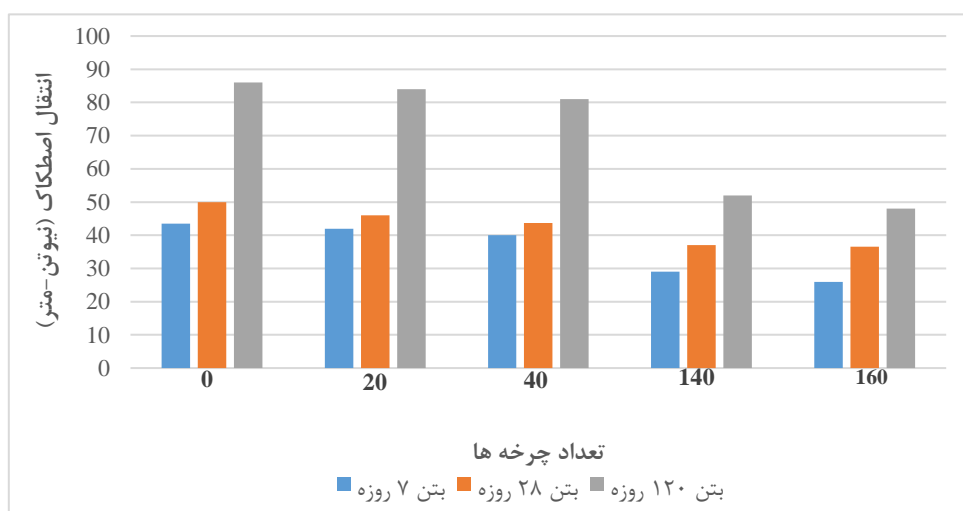


شکل ۷- نتایج حاصل از آزمون "انتقال اصطکاک" در سنین مختلف عمل آوری

با توجه به نتایج به دست آمده در سنهای مختلف، با افزایش سن آزمونها، نتایج انتقال اصطکاک نیز افزایش داشته که این افزایش در آزمونهای ۲۸ روزه نسبت به آزمونهای ۷ روزه برابر ۱۴ درصد و در آزمونهای ۱۲۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه برابر ۴۲ درصد می باشد. دلیل این افزایش، پیشرفت پروسه هیدراسیون سیمان می باشد که منجر به یک ساختار متراکم تر و تکامل یافته تر می باشد. توسعه-

ی مقاومت به شدت به نوع و حجم محصولات هیدراسیون تشکیل شده بستگی دارد و بنا براین به واکنش‌های بین ترکیبات جامد و مایع وابسته است [۴۶].

با اعمال سیکل‌های دمایی و عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، نتایج آزمایش انتقال اصطکاک در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، در مقاومت آزمون‌ها، کاهش ۶۷ و ۳۶/۶ درصدی نسبت به بتن عادی به دست آمده است. با افزایش تعداد سیکل‌ها (۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰) در مقاومت آزمون‌های بتنی در سن ۱۲۰ روزه، به ترتیب کاهش ۲/۴، ۶، ۶۵ و ۷۹ درصدی نسبت به بتن عادی به دست آمده است.

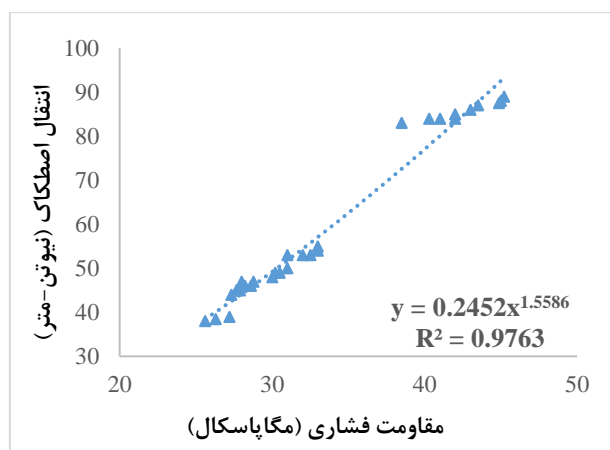


شکل ۸- نتایج روش انتقال اصطکاک در اثر دما در سنین مختلف

علت کاهش نتایج آزمون انتقال اصطکاک هنگامی که بتن تحت سیکل‌های مختلف دمایی قرار می‌گیرد به این دلیل است که سیکل‌های مختلف دمایی، تأثیر منفی روی خواص مکانیکی بتن دارد و با افزایش تعداد سیکل‌ها، عملکرد بتن کاهش می‌یابد [۳-۴]. در کل، خواص بتن به‌طور قابل توجهی با تغییرات دما دچار تغییر شده و در ضمن ویژگی‌های مخلوط بتن به شرایط محیطی وابستگی زیادی دارد [۵-۶]. در تحقیقی روی تأثیر سیکل‌های مختلف دمایی بر مقاومت بتن مشاهده شد که سیکل‌های دمایی در محدوده ۳۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش مقاومت فشاری و مقاومت برشی بتن به ترتیب به اندازه ۴/۹ و ۱۷/۴ درصد گردید [۸]. در کل اعمال سیکل‌های تغییرات دمایی باعث ایجاد تنش‌هایی در بتن شود. 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 وجود آمدن چنین فضاهای خالی‌ای در بتن و سطح آن، باعث ایجاد ترک‌های ریز شده و همین امر سبب کاهش مقاومت سطحی بتن می‌شود.

سیکل‌های دمایی اعمال شده در تحقیق حاضر بیشتر بر سطح بتن اثر گذار بوده است، به همین دلیل در آزمایش‌های انجام شده مقاومت فشاری آزمون‌ها در سیکل‌های مورد نظر تغییر قابل توجهی نکرده است، در حالی که در مقاومت سطحی آزمون‌ها تغییرات زیادی دیده شده است که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، سطح بتن را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تضعیف آن شده است.

در شکل ۹ نمودار کالیبراسیون توانی میان نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک با مقاومت فشاری بتن‌های آزمایش‌شده در حالت عادی در این تحلیل قابل مشاهده است.

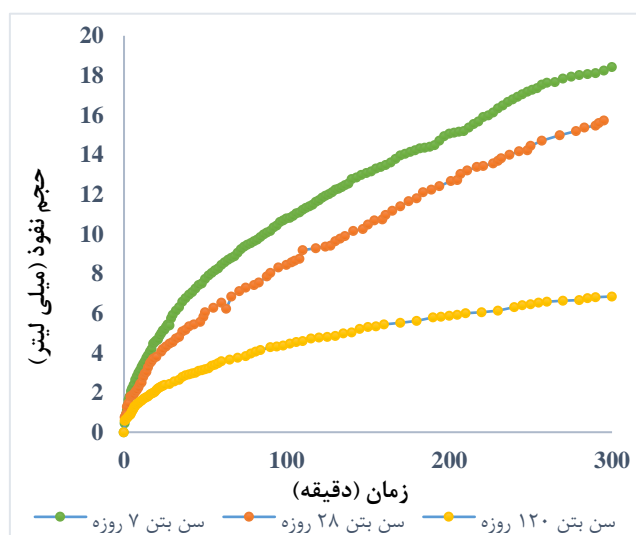


شکل ۹- همبستگی بین مقاومت فشاری و آزمون انتقال اصطکاک در حالت عادی

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که همبستگی با شدت ۹۸/۸ درصد بین مقاومت فشاری بتن‌ها با نتایج به دست آمده از آزمون انتقال اصطکاک وجود دارد. بنابراین با به کارگیری آزمون انتقال اصطکاک و استفاده از معادله $y=0.245x^{1.6}$ می‌توان مقاومت فشاری بتن‌ها را در حالت عادی به صورت مستقیم و بدون شکستن نمونه و بادقت بالا تخمین نمود. در تحقیقات دیگری که با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌ها [۳۹-۴۰] و بتن‌های الیافی [۳۷] بارده‌های مقاومتی مختلف انجام شده است نیز ضریب همبستگی بالای ۹۵ درصد به دست آمده است که نشان از دقت آزمون فوق می‌باشد.

۳-۲- بررسی نتایج آزمایش نفوذپذیری و عمق نفوذ

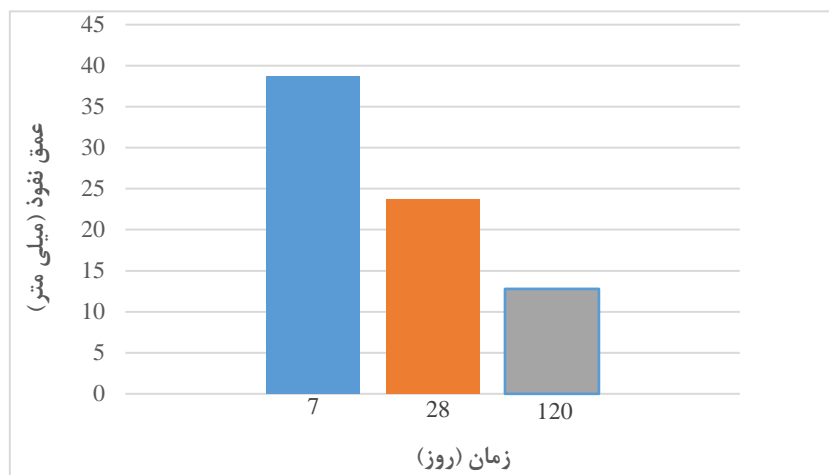
با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" حجم نفوذ آب در آزمون‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز بررسی گردیده و نمودار آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- مقدار حجم نفوذ آب در بتن با عمل آوری مختلف

مقدار حجم نفوذ آب به بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز به ترتیب برابر ۱۸/۴، ۱۵/۷۳ و ۶/۹ میلی‌لیتر می‌باشد. از ارزیابی شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در بتن نفوذ می‌کند و با گذشت زمان، به دلیل پر شدن منافذ و حفره‌های خالی از آب، از سرعت نفوذ کم می‌شود. در شکل ۱۱ نیز مقدار عمق نفوذ آب به بتن قابل مشاهده است. مقدار عمق نفوذ آب در سنین ۷،

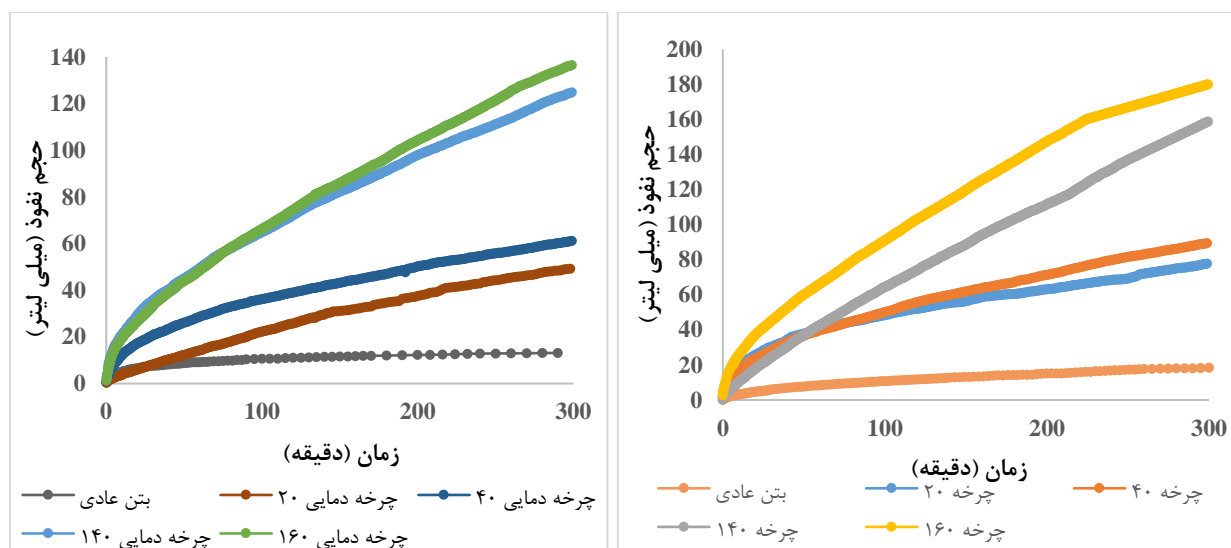
۲۸ و ۱۲۰ روزه ترتیب برابر با ۳۸/۷، ۲۳/۷ و ۱۲/۸ میلی متر می باشد. مشاهده می شود که رابطه مستقیمی بین حجم نفوذ آب و عمق نفوذ وجود دارد به گونه ای که با کاهش مقدار حجم نفوذ، عمق نفوذ نیز کاهش داشته است. دلیل این کاهش، پیشرفت فرایند هیدراسیون در بتن بوده که باعث کاهش منافذ و قطع کانال های موئینه گردیده است. همچنین هر چه فرایند هیدراسیون ادامه پیدا می کند مقاومت پیوند ذرات در خمیره سیمان افزایش یافته و خلل و فرج بین ذرات در خمیره سیمان کاهش می یابد. لذا فضاهای موجود در خمیره سیمان که از همان ابتدا مملو از آب شده است به کمک فرآورده های ناشی از فعل و انفعالات هیدراسیون سیمان، اشغال شده و پر می شوند [۴۷].



شکل ۱۱- کاهش عمق نفوذ با افزایش مدت زمان عمل آوری

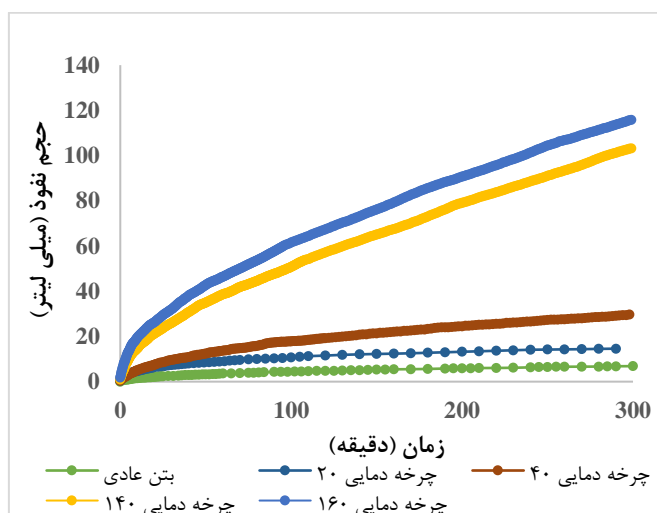
در پژوهش های دیگر نیز به نتایج تقریباً مشابهی دست یافته اند. در تحقیقی مقدار حجم نفوذ آب به بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز برابر ۲۴/۵، ۱۶/۸ و ۱۳/۲ میلی لیتر به دست آمده است که مشابهت زیادی با نتایج این مقاله که برابر ۱۸/۴، ۱۵/۷ و ۶/۹ میلی لیتر می باشد، دارد [۲۱]، [۴۶-۴۷]. تفاوت نتایج به دلیل این می باشد که بتن استفاده شده در تحقیق مذکور دارای مقاومت فشاری کمتر از بتن استفاده شده در این تحقیق می باشد.

در شکل ۱۲ نتایج به دست آمده از حجم نفوذ آب در بتن در سیکل های مختلف دمایی (۲۰، ۴۰، ۱۴۰، ۱۶۰) نشان داده شده است. با افزایش تعداد سیکل های تغییرات دمایی، حجم نفوذ آب به بتن دچار افزایش چشمگیری شده است. با مقایسه حجم نفوذ آب به بتن در آزمون های عادی با آزمون های قرار گرفته در سیکل های مختلف دمایی مشاهده می شود که سیکل های ۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ چرخه به ترتیب باعث افزایش حجم نفوذ آب به بتن در سن ۷ روز مقدار ۴، ۴/۸، ۸/۶ و ۹/۸ برابر شده است (شکل ۱۲-الف). همچنین برای بتن ۲۸ روزه به مقدار ۳/۱۳، ۳/۹، ۷/۹ و ۸/۷ برابر (شکل ۱۲-ب) و برای بتن ۱۲۰ روزه به مقدار ۲/۲، ۴/۳، ۱۴/۹ و ۱۶/۸ برابر شده است (شکل ۱۲-ج).



ب: ۲۸ روزه

الف: ۷ روزه



ج: ۱۲۰ روزه

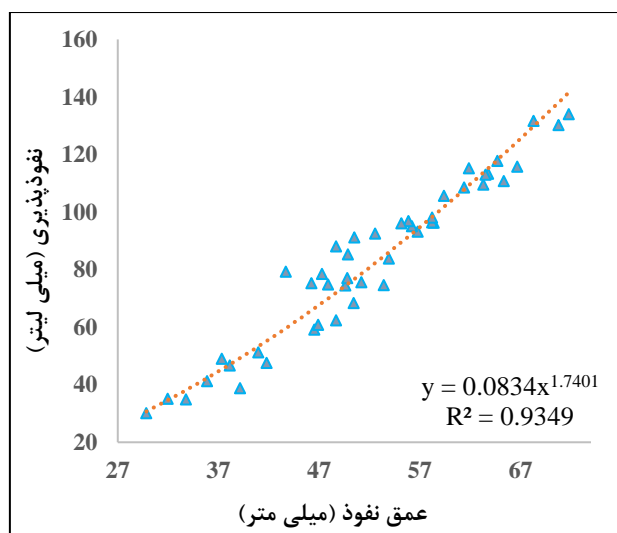
شکل ۱۲- حجم نفوذ آب در بتن در سیکل‌های مختلف دمایی

در نمودارهای شکل ۱۲ دیده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های دمایی، در حجم نفوذ آب، افزایش مشاهده شده است. در بتن، آب آزاد وجود دارد و تحت تأثیر سیکل‌های دمایی، آب آزاد از سطح بتن شروع به تبخیر نموده و با افزایش تعداد سیکل‌های دمایی از لایه‌های داخلی نیز به شکل تدریجی تبخیر می‌شود. هر چه به تعداد سیکل‌ها اضافه شود در نفوذپذیری و عمق نفوذ، افزایش دیده می‌شود و در این صورت می‌توان گفت که تعداد سیکل‌های دمایی، نفوذپذیری و عمق نفوذ را هم‌زمان افزایش می‌دهد. با در نظر گرفتن این نتیجه، می‌توان بیان کرد که بین نفوذپذیری و عمق نفوذ رابطه مستقیم وجود دارد که با افزایش یا کاهش هر یک از آن‌ها، دیگری نیز افزایش یا کاهش می‌یابد.

با توجه به تحقیقات انجام شده، علت افزایش نفوذپذیری بتن تحت شرایط سیکل‌های دمایی بدین علت است که سیکل‌های تغییرات دما، اثر مخربی بر خواص مکانیکی بتن دارد [۴۸]. هنگامی 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 سیمن، انقباض در اثر کاهش رطوبت، ایجاد ترک‌های ریز در سطح بتن و انبساط و انقباض سنگ‌دانه‌ها [۲-۳].

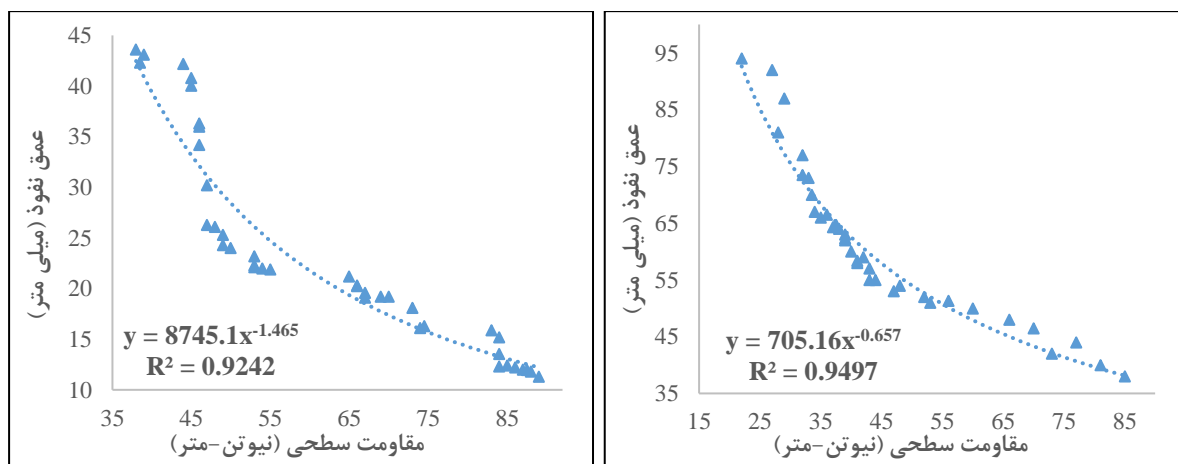
۳-۳- تحلیل رابطه بین نفوذپذیری و عمق نفوذ آزمون‌ها

با توجه به تحلیل رگرسیون انجام شده در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که رابطه خطی با ضریب همبستگی $96/6\%$ درصد بین حجم نفوذ آب حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای و عمق نفوذ آن‌ها وجود دارد. با توجه به ضریب همبستگی به‌دست آمده از تحلیل رگرسیون می‌توان گفت که یک همبستگی بادقت بالا بین حجم نفوذ آب و عمق نفوذ وجود دارد. لذا در صورت استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" و با محاسبه حجم نفوذ آب به آزمون‌های بتنی می‌توان با استفاده از معادله $y=0.08x^{1.74}$ مقدار عمق نفوذ همان آزمون را بدون نیاز به شکستن بتن اندازه‌گیری نمود.



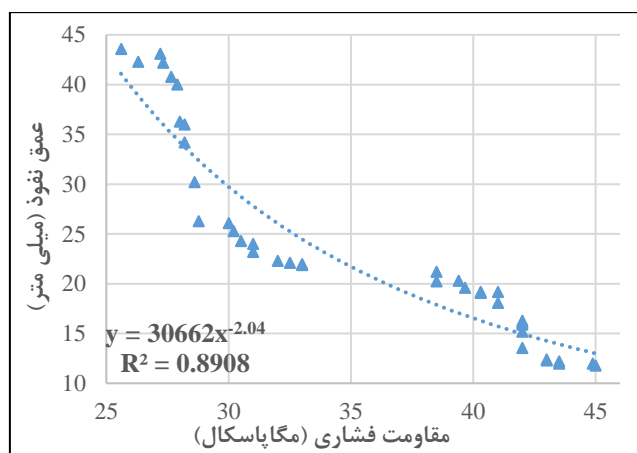
شکل ۱۳- همبستگی بین نفوذپذیری و عمق نفوذ در سیکل‌های مختلف دمایی

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ دیده می‌شود؛ که مقدار شدت همبستگی 96% درصد و ضریب تعیین برابر 92% درصد محاسبه شده است. در صورت استفاده از نتایج سیکل‌های دمایی مقدار شدت همبستگی 97% درصد و ضریب تعیین برابر 95% درصد حساب شده و در شکل ۱۶ رابطه بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ نیز بررسی شده که ضریب شدت آن 94% درصد و ضریب تعیین 89% درصد به‌دست آمده است.



شکل ۱۴- رابطه بین مقاومت سطحی و عمق نفوذ در حالت عادی

شکل ۱۵- رابطه بین مقاومت سطحی و عمق نفوذ در حالت دمایی



شکل ۱۶- رابطه بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ در حالت عادی

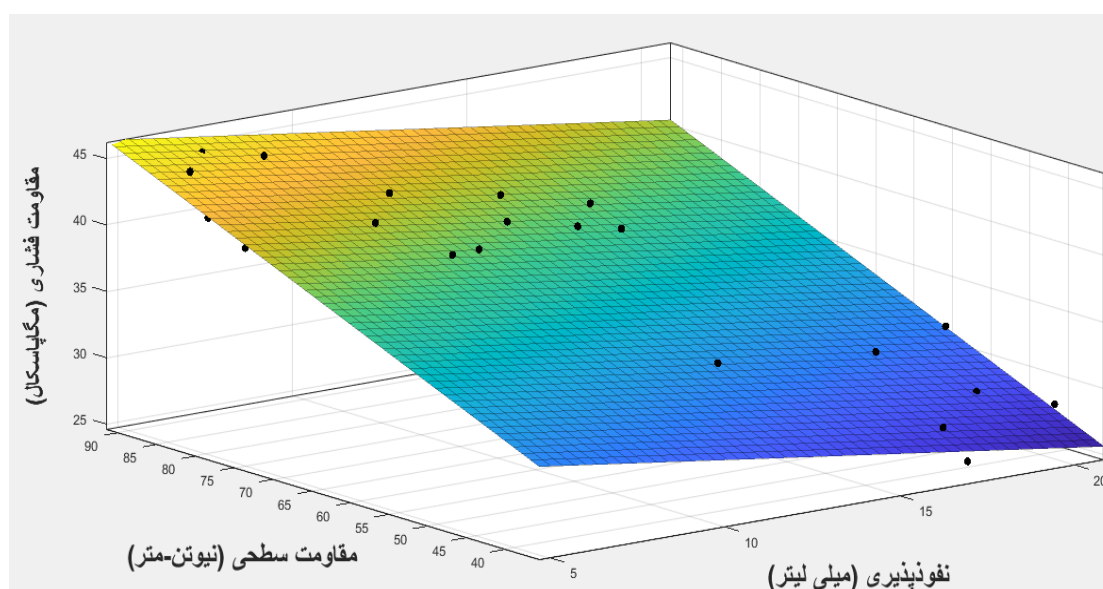
۳-۴- رابطه مقاومت سطحی با مقاومت فشاری و نفوذپذیری در فضای سه بعدی

در برنامه نویسی متلب با ورود اطلاعات مربوط به نتایج مقاومت فشاری، مقاومت سطحی و نفوذپذیری ارتباط سه مؤلفه به شکل همزمان در بتن عادی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به شکل ۱۷ معادله ۴ به صورت یک صفحه به دست آمده است.

$$Z = f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y \quad (۴)$$

$$p_{00} = 24.13 \quad R\text{-square} : 0.86, \quad p_{01} = 0.26, \quad p_{10} = -0.37,$$

در معادله ۴ X نفوذپذیری، Y مقاومت سطحی حاصل از روش انتقال اصطکاک و Z مقاومت فشاری آزمونها بوده و p_{00} ، p_{10} ، p_{01} ضرایب ثابت صفحه درجه یک می باشند. با توجه به شکل ۱۷ دیده می شود که در بین مقاومت فشاری و مقاومت سطحی یک رابطه مستقیم برقرار است، به دلیل این که با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت سطحی هم دارای افزایش هست در حالی که با در نظر گرفتن بعد سوم که نفوذپذیری است با مقاومت فشاری و مقاومت سطحی یک رابطه معکوس دارد.



شکل ۱۷- رابطه بین نفوذپذیری، مقاومت سطحی و مقاومت فشاری در حالت دمایی

۴- نتیجه گیری

- ۱- با مقایسه حجم نفوذ آب به بتن در آزمون‌های عادی با آزمون‌های قرارگرفته در سیکل‌های مختلف دمایی مشاهده می‌شود که سیکل‌های ۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ چرخه به ترتیب باعث افزایش حجم نفوذ آب به بتن به مقدار ۲/۲، ۴/۳، ۱۴/۹ و ۱۶/۸ برابر شده است.
- ۲- طبق استانداردهای بین‌المللی (ISO 7031, BS EN 12390-8M DIN 1048-5) برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب به بتن، باید نمونه را شکست و یا از عضو بتنی مورد نظر مغزه گرفته شود، درحالی‌که با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای می‌توان عمق نفوذ بتن را بدون نیاز به شکستن و یا مغزه‌گیری با استفاده از معادله $y=8745.1x^{-1.465}$ برای بتن معمولی و معادله $y=705.16x^{-0.657}$ برای بتن قرار گرفته در شرایط حاد تغییرات دمایی، بادقت بالایی اندازه‌گیری نمود.
- ۳- در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در بتن نفوذ می‌کند و باگذشت زمان، به دلیل پر شدن منافذ و حفره‌های خالی از آب، از سرعت نفوذ کم می‌شود. دلیل افزایش سرعت نفوذ در شروع آزمایش، روند بیشتر تبخیر آب آزاد موجود در لایه سطحی بتن نسبت به لایه‌های داخلی آن است. بنابراین با تبخیر آب آزاد در این لایه، تعداد منافذ افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش نفوذپذیری ابتدایی می‌گردد.
- ۴- با توجه به درصد همبستگی بالا (۹۸/۸ درصد) بین آزمون انتقال اصطکاک و مقاومت فشاری بتن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با به‌کارگیری این آزمون و استفاده از معادله $y=0.2452x^{1.6}$ ، مقاومت فشاری بتن را به صورت مستقیم و بدون شکستن نمونه و بادقت بالا در حالت عادی تخمین نمود.
- ۵- با افزایش تعداد سیکل‌ها (۲۰، ۴۰، ۱۴۰ و ۱۶۰) در مقاومت سطحی آزمون‌های بتنی در سن ۱۲۰ روزه، به ترتیب کاهش ۲/۴، ۶، ۶۵ و ۷۹ درصدی نسبت به بتن عادی به‌دست آمده است.

مراجع

- [1] Guo, Z., & Shi, X. (2011). Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. Elsevier.
- [2] Shah, S. N. R., Akashah, F. W., & Shafiqh, P. (2019). Performance of high strength concrete subjected to elevated temperatures: a review. *Fire Technology*, 55, 1571-1597.
- [3] Ye, Z., Guo, G., Su, L., & Jiang, Y. (2021, July). Experimental study on mechanical properties of concrete under sub-high temperature cycles. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1978, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- [4] Zeng, Q. (2018). Experiment and analysis of concrete after thermal cycles. Guangzhou South China University of Technology.
- [5] Sajid, H. U., & Kiran, R. (2019). Post-fire mechanical behavior of ASTM A572 steels subjected to high stress triaxialities. *Engineering Structures*, 191, 323-342.
- [6] Zhang, Y., Chen, Q., Ju, J. W., & Bauchy, M. (2021). Effects of high temperature on the mechanical behavior of calcium silicate hydrate under uniaxial tension and compression. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(7), 987-1011.
- [7] Khan, M. S., Almutairi, S., & Abbas, H. (2022). Mechanical properties of concrete subjected to cyclic thermal loading. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(7), 2855-2868.
- [8] Shokrieh, M. M., Heidari-Rarani, M., Shakouri, M., & Kashizadeh, E. (2011). Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3540-3549.
- [9] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*.
- [10] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(1), 3-16.
- [11] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2021). An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, 22(1), 550-565.

- [12] Li, X. Xu, Q. & Chen, S. (2016); an experimental and numerical study on water permeability of concrete. *Construction and building materials*, 105, 503-510.
- [13] Chang, Y. F., Chen, Y. H., Sheu, M. S., & Yao, G. C. (2006). Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cement and concrete research*, 36(10), 1999-2005.
- [14] Kaboudan, A., & Keshtkar, M. (2020). 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), 92-113.
- [15] She, A. M., Shui, Z. H., & Wang, S. H. (2008). Study on interfacial transition zone of concrete in dry climate and wide temperature change. *Journal of Building Materials*, 11, 485-488.
- [16] Kou, S. C., Poon, C. S., & Etxeberria, M. (2014). Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 53, 73-82.
- [17] Amadi, I. G., & Amadi-Oparaeli, K. I. (2018). Effect of admixtures on strength and permeability of concrete. *The International Journal of Engineering and Science*, 7(7), 1-7.
- [18] Sakai, Y. Yokoyama, Y., & Kishi, T. (2017). 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), 595-602.
- [19] Liu, H., Luo, G., Wei, H., & Yu, H. (2018). Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios. *Applied Sciences*, 8(8), 1217.
- [20] Dashtibadfarid, M., & Afrasiabi, M. (2017). Low-permeability concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs. *Int. J. Innov. Eng. Sci*, 2, 20-24.
- [21] Naderi, M., Maleki, B., & F Amini, A. (2017). ASSESSING THE PERMEABILITY OF THE OIL AND ITS COMPONENTS INTO POROUS CONCRETE USING NEW CYLINDRICAL CHAMBER METHOD. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(1.1), 89-93.
- [22] DIN 1048 part 5: (1991). Test methods for concrete, Deutsches Institut für Normung, Germany.
- [23] BSI (British Standards Institution). (2019). Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure. *British Standards Institution*, BS EN 12390-8.
- [24] ISO. (2021). Concrete hardened. Determination of the depth of penetration of water under pressure,. International Organization for Standardization.
- [25] Khatri, R. P., & Sirivivatnanon, V. (1997). Methods for the determination of water permeability of concrete. *Materials Journal*, 94(3), 257-261.
- [26] Yoo, J. H., Lee, H. S., & Ismail, M. A. (2011). An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure. *Construction and Building Materials*, 25(1), 99-108.
- [27] Murata, J., Ogihara, Y., Koshikawa, S., & Itoh, Y. (2004). Study on watertightness of concrete. *Materials Journal*, 101(2), 107-116.
- [28] Jin, Z. Q., Zhao, T. J., Gao, S., & Hou, B. R. (2013). Chloride ion penetration into concrete under hydraulic pressure. *Journal of Central South University*, 20(12), 3723-3728.
- [29] ASTM C805/C805M-18. (ASTM 2018); Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ACI COMMITTEE 214 (2003). Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, . American Concrete Institute.
- [31] ASTM C900-19. (ASTM 2019); Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [32] Masi, A., Santarsiero, G., & Digriolo, A. (2013). Experimental evaluation of drilling damage on the strength of cores extracted from RC buildings. In *Proc. of the International Conference on Earthquake and Structural Engineering (ICESE 2013)*.

- [33] Naderi, M. (2005). Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 19(6), 454-459.
- [34] Naderi, M. (2010); 'Determination of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method', *Registration of patent in Companies and industrial property Office*, Reg. N. 67726, Iran.
- [35] Kaboudan, A., Naderi, M., & Afshar, M. A. (2021). The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete. *Journal of Building Engineering*, 34, 102012.
- [36] Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, 101928.
- [37] Saberi Varzaneh, A., & Naderi, M. (2021). 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*, 8(1), 171-184.
- [38] Naderi, M., & Ghodousian, O. (2012). Adhesion of self-compacting overlays applied to different concrete substrates and its prediction by fuzzy logic. *The Journal of Adhesion*, 88(10), 848-865.
- [39] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2021). 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, 2377-2395.
- [40] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2020). Numerical and experimental study of semi-destructive tests to evaluate the compressive and flexural strength of polymer-modified mortars and their adhesion to the concrete substrate. *Revista Romana de Materiale*, 50(4), 537-544.
- [41] Naderi, M., Kaboudan, A., & Akhavan Sadighi, A. (2018). 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), 116-131.
- [42] KABOUDAN, A. (2020). Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using "Cylindrical chamber" method. . Ph.D. Student. , Imam Khomeini International University.
- [43] ASTM C136. (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM West Conshohocken, PA.
- [44] ASTM, C127. (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM West Conshohocken, PA.
- [45] ASTM, C128. (2015). Standard Test Method for Density, Relative density (Specific gravity) and Absorption of Fine Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [46] TERIQET., A. (2019). Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. . Sharif. J. of Civil Eng. , 34(4.2) 82-57.
- [47] ASTM C1679 .(2021). Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry.
- [48] B. VIDYA. (2019). Effect of Thermal Cycles On Concrete: An Overview, . *International Journal for Research in Engineering Application & Management.*, 2454-9150.