

The Influence of Ambient Temperature Conditions on the Permeability and Surface Strength of Concrete through Insitu Tests

Sardar Wali Din¹, Ali Saberi Varzaneh², Mahmood Naderi^{3*}

1- P.h.D. Student, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

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

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

ABSTRACT

The concrete surface is the most significant part as it is in direct contact with the outside world. Therefore, increasing the surface strength of concrete could reduce the absorption of harmful substances into the concrete. Permeability and surface strength can be regarded as factors that affect the durability and service life of a concrete structure. As a result, a concrete structure with the desired surface strength and low permeability is of paramount importance. Hence, this study attempted to measure the surface strength and permeability of concrete through "twist-off" and "Cylindrical Chamber" tests under temperature cycling. Relations between the surface strength and permeability of concrete samples were obtained. In addition, a linear function was used to estimate the relation between penetration depth and volume with high precision. According to the twist-off test results, extending the curing age of plain concrete would increase the surface strength; the surface strength at the age of 120 days exceeds that of 7 days by approximately 42%. However, when temperature cycling was performed on the samples, the surface strength of the concrete caused by the twist-off Test decreased. Further, results from the permeability tests using a cylindrical chamber indicate that temperature changes have a negative influence on the permeability and penetration depth in concrete samples. The permeability and penetration depth of concrete under temperature cycling caused an 8-fold and 3-fold increase after 120 days, respectively. According to the results of the study, moderate temperature cycles significantly affect permeability and penetration depth.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 October 2022

Revise Date: 10 January 2023

Accept Date: 19 March 2023

Keywords:

Permeability
Insitu method
Temperature
Concrete
Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi:

*Corresponding author: Mahmood Naderi

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

تأثیر شرایط دمایی محیطی بر نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن با به کارگیری آزمون - های درجا

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

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

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

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

چکیده

سطح بتن مهم‌ترین قسمتی است که بصورت مستقیم با محیط بیرون در ارتباط است. لذا افزایش مقاومت سطحی بتن می‌تواند باعث کاهش نفوذ مقدار مواد زیان‌آور به داخل بتن گردد. می‌توان گفت که نفوذپذیری و مقاومت سطحی عواملی هستند که دوام و زمان بهره‌دهی سازه‌ی بتنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به همین دلیل ساخت بتنی که مقاومت سطحی مورد نظر را تأمین نموده و نفوذپذیری کمتری نیز داشته باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در این تحقیق با به کارگیری آزمون‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش"، اقدام به اندازه‌گیری مقاومت سطحی و نفوذپذیری بتن، تحت چرخه‌های تغییرات دمایی شده است. در این خصوص روابط موجود بین مقاومت سطحی و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی بدست آمد. همچنین با استفاده از تابع خطی، رابطه‌ی بین عمق با حجم نفوذ، با دقت بالا تخمین زده شد. نتایج حاصل از آزمون پیچش نشان می‌دهد که با افزایش سن عمل‌آوری بتن معمولی، مقاومت سطحی نیز افزایش یافته است به گونه‌ای که مقاومت سطحی در سن ۱۲۰ روز حدود ۴۲ درصد بیشتر از مقاومت سطحی در سن ۷ روز هست؛ اما با قرار گرفتن نمونه‌ها در چرخه‌های تغییرات دمایی، دچار کاهش مقاومت سطحی بتن حاصل از آزمون پیچش شده است. همچنین نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری با دستگاه محفظه استوانه‌ای نشان می‌دهد که تغییرات دمایی دارای تأثیر منفی روی نفوذپذیری و عمق نفوذ در نمونه‌های بتنی می‌باشد. نفوذپذیری و عمق نفوذ بتن تحت چرخه‌های تغییرات دمایی پس از ۱۲۰ روز به ترتیب بیش از ۸ و ۳ برابر افزایش داشته است. با توجه به نتایج تحقیق می‌توان گفت که چرخه‌های دمایی معتدل، بر نفوذپذیری و عمق نفوذ تأثیر قابل توجهی دارد.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، آزمون درجا، دما، بتن، مقاومت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.364403.2943	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.364403.2943	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۲/۲۸	۱۴۰۱/۱۲/۲۸	۱۴۰۱/۱۰/۲۰	۱۴۰۱/۰۷/۲۲
محمود نادری Profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

طراحی سازه‌های بتنی باید به گونه‌ای انجام گردد که هم از مقاومت مشخصه برخوردار باشد و هم دارای نفوذپذیری کمی باشد. دوام بتن بطور عمده به توانایی سازه بتنی برای مقابله بانفوذ عوامل آسیب‌رسان مرتبط است [۱]. ویژگی اصلی که توسط آن دوام سازه بتنی ارزیابی می‌شود، مقاومت سطحی و نفوذپذیری آن می‌باشد. قابل ذکر است که آب بعنوان عاملی برای نفوذ عوامل آسیب‌رسان به سازه‌های بتنی عمل نموده و سبب کاهش زمان بهره‌دهی سازه می‌گردد [۲]. نفوذپذیری به شکل جریان سیال (مایع یا گاز) در محیط متخلخل بتن، تحت اثر فشار اعمال شده تعریف می‌شود. همچنین بر اساس تعریف موسسه بتن آمریکا، نفوذپذیری یعنی قابلیت بتن برای عبور مواد مایع یا گاز از داخل آن می‌باشد [۳]. در مخازن مایعات که دارای فشار هیدرواستاتیکی زیادی هستند، نفوذپذیری از اهمیت خاصی برخوردار است. شایان ذکر است که قرارگیری بتن در معرض دمای بالا باعث گسترش منافذ و ایجاد ترک خوردگی می‌شود که منجر به افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام سازه می‌شود، این موضوع در سدهای بزرگ بتنی دارای اهمیت بسیاری است [۴]. با توجه به توضیحات فوق، نفوذپذیری به عنوان معیاری غیر مستقیم برای ارزیابی دوام بتن قابل استفاده است [۵]. عواملی که باعث کاهش دوام سازه‌های بتن آرمه می‌شود به ۳ دسته‌ی عوامل فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی طبقه بندی می‌شوند که نفوذپذیری دارای رابطه مستقیم عوامل ذکر شده می‌باشد. نفوذپذیری از چند جنبه برای بتن مضر است: اول با نفوذ مایعات و یخ بستن بتن باعث ازدیاد حجم شده و به گسترده شدن ترک‌ها کمک می‌کند. در ثانی امکان نفوذ مایعات مضر شامل سولفات‌ها و کلریدها به بتن را فراهم می‌کند و در نهایت باعث خوردگی آرماتورها می‌شوند [۶].

برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در برخی کشورها، آزمایش نفوذ آب، تحت تأثیر فشار در مدت زمانی مشخص و با اندازه‌گیری عمق نفوذ بتن انجام می‌گردد [۷]. در این روش نمونه بتنی تحت فشار معینی قرار گرفته و متوسط عمق نفوذ آب بعد از شکست نمونه بعنوان معیاری برای اندازه‌گیری عمق نفوذ در نظر گرفته می‌شود. در استاندارد بریتانیا [۸] نمونه بتنی تحت فشار آب برابر با ۵ بار قرار گرفته و سپس بیشینه عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود و از آن برای تعیین نفوذپذیری بتن استفاده می‌گردد. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری حجم و عمق نفوذ آب به داخل نمونه بتنی از روش محفظه استوانه‌ای [۹] استفاده شده است. روش مذکور آزمونی دقیق با کاربرد گسترده در تعیین مقدار نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمانی چه در محیط آزمایشگاهی و چه در محل پروژه می‌باشد [۱۰]. تحقیقات مختلفی با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای انجام پذیرفته است. در گذشته برای ارزیابی دقت آزمون محفظه استوانه‌ای، اقدام به مقایسه نتایج این آزمون با استاندارد بریتانیا شده است که نتایج نشان دهنده ضریب همبستگی بالایی بین مقدار نفوذپذیری بدست آمده از آزمون محفظه استوانه‌ای با استاندارد بریتانیا می‌باشد [۱۱]. همچنین در تحقیقی دیگر مشخص گردید که یک رابطه‌ی خطی بین عمق نفوذ آب حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای با نتایج حاصل از استاندارد بریتانیا وجود دارد [۱۲]. در تحقیقی دیگر مشاهده گردید که با افزایش مقاومت فشاری و همچنین طول دوره عمل‌آوری، نفوذپذیری کاهش یافته است [۱۳-۱۴]. در یک پژوهش در خصوص تاثیر جهت بتن ریزی بر نفوذپذیری با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای مشاهده شد که نفوذپذیری در جهت بتن‌ریزی به دلیل انجام عمل تراکم لایه‌های بتن‌ریزی، کمتر از جهت عمود بر آن است [۱۵].

یکی از عواملی که می‌تواند تاثیر منفی روی مشخصات بتن داشته باشد، چرخه‌های دمایی می‌باشد. چرخه‌های دمایی مختلف و تبخیر آب آزاد در بتن، باعث ایجاد منافذ ریز و ترک‌های میکروسکوپی، کاهش مقاومت فشاری، مدول الاستیک، ضریب پواسون و افزایش کرنش می‌شود [۱۶]. چرخه تغییرات دما، در دماهای بین صفر تا ۶۰ درجه سلسیوس با گذشت مدت زمان طولانی می‌تواند اثر مخربی بر خواص مکانیکی بتن داشته باشد [۱۷]. هنگامیکه 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 [۱۸]. در تحقیق دیگری نیز مشاهده شده که با استفاده از چرخه حرارتی در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری و مقاومت برشی بتن به طور قابل توجهی به میزان ۴/۹ و ۱۷/۴ درصد کاهش یافته است که این کاهش به دلیل ایجاد و انتشار ریز ترک‌های ناشی از اختلاف انبساط حرارتی بین ماتریس سیمان و سنگدانه‌های می‌باشد [۱۹]. همچنین 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 [۲۰].

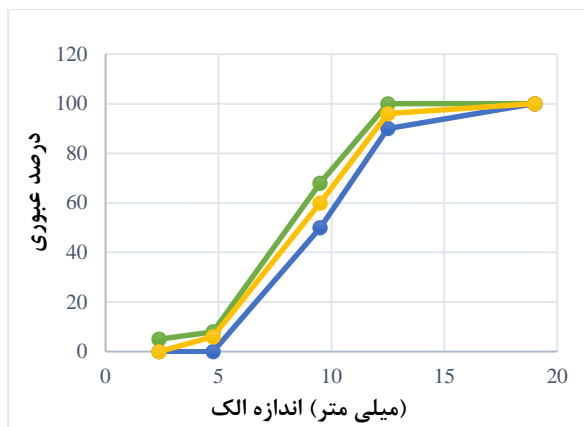
علاوه بر نفوذپذیری، مقاومت فشاری نیز از مهمترین مشخصه‌های بتن می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت بتن بصورت درجا وجود دارد که عبارت‌اند از مغزه‌گیری از محل موردنظر [۲۱]، روش "بیرون کشیدن" [۲۲]، آزمایش‌های "اولتراسونیک" و "چکش اشمیت" [۲۳-۲۴] که البته میزان حفره و ترک می‌تواند در نتایج حاصل از این روش‌ها تأثیرگذار باشد. روش "کشیدن از سطح" [۲۵] که تحقیقات بیانگر این است که این روش برای تشخیص مقاومت بتن در محل مناسب می‌باشد [۲۶]. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی از روش "پیچش" استفاده شده است. روش مذکور از روش‌های درجای نیمه مخرب محسوب می‌شود که توسط نادری اختراع گردیده است [۲۶]. آزمون "پیچش" یک روش کاربردی در تعیین مقاومت فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در آزمایشگاه و چه در محل می‌باشد. دقت بالا، هزینه اندک با خرابی ناچیز و سرعت عمل بالا، امکان کاربرد آن در حالت‌های افقی و قائم از مزایای این روش می‌باشد [۲۷]. برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی انواع بتن و ملات با استفاده از آزمون "پیچش" تحقیقات فراوانی انجام پذیرفته است. در تحقیقی با استفاده از آزمون پیچش روی ملات‌های سیمانی، همبستگی بالایی بین نتایج آزمایش "پیچش" با مقاومت فشاری و آزمون استاندارد کشیدن از سطح بدست آمد [۲۸]. در تحقیق دیگری با استفاده از سیمان تیپ ۲ تحت شرایط مختلف عمل‌آوری، ضریب همبستگی ۹۴ درصد بین نتایج حاصل از آزمون پیچش و مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی بدست آمده است [۲۹]. برای تعیین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی تیر بتنی پوزولانی نیز با بکارگیری آزمون پیچش، از معادله کالیبراسیون مربوطه در محدوده اطمینان ۹۷ درصد می‌توان استفاده نمود [۳۰].

بنا بر اهمیت موضوع، در تحقیق حاضر نفوذپذیری، عمق نفوذ و مقاومت سطحی نمونه‌ها، تحت تأثیر چرخه‌های مختلف تغییرات دمایی با استفاده از روش‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش" بررسی گردیده است. همچنین تحلیل تأثیر چرخه‌های مختلف تغییرات دمایی در سنن مختلف و مقایسه آن با بتن عادی انجام شده است. سپس با استفاده از تابع خطی، رابطه‌ی بین حجم نفوذ و عمق نفوذ نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است که در این صورت با محاسبه حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن با استفاده از تابع خطی، نیاز به شکستن نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ نمی‌باشد. شایان ذکر است که نمونه‌های بتنی استفاده شده، در آزمایش‌های مورد نظر در سنن ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه عمل‌آوری و بعد تحت آزمایش قرار گرفته‌اند.

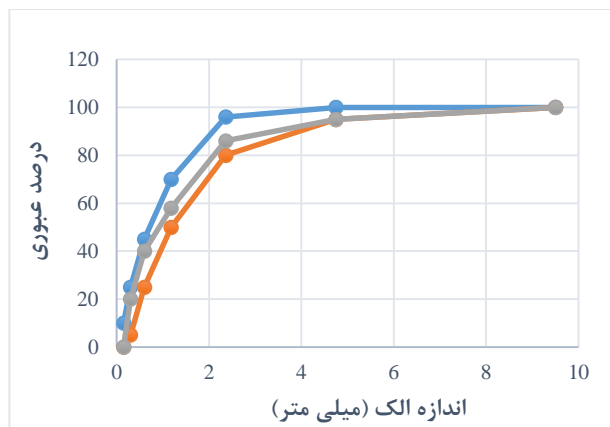
۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای تهیه‌ی نمونه‌های بتنی از شن و ماسه‌ی بدست آمده از معادن حومه‌ای استان قزوین و سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه آبیگ استفاده شده است. دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM C ۱۳۶ [۳۱] انجام گرفت. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار جذب آب شن و ماسه نیز به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد به دست آمد [۳۲-۳۳]. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. مدول نرمی ریزدانه‌های بکار رفته در این تحقیق برابر با ۲/۸۱ است.



ب: منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه‌ها



الف: منحنی دانه‌بندی ریزدانه‌ها

شکل ۱: منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

برای چسباندن صفحات فلزی به نمونه‌های بتنی برای انجام آزمایش‌های "محفظه استوانه‌ای" و "پیچش"، از چسب دو مؤلفه‌ای رزین اپوکسی استفاده شد. نسبت اختلاط چسب استفاده شده بصورت حجمی و با نسبت یک به یک می‌باشد.

۲-۲- آزمایش "پیچش"

روش "پیچش" که توسط نادری ابداع شده است [۲۷]، یک روش کاربردی در تعیین مقاومت فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در آزمایشگاه و چه در محل است. استفاده از آزمایش "پیچش" بر این اساس استوار است که استوانه فلزی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، با استفاده از چسب رزین اپوکسی، به سطح محل انجام آزمایش چسبانده می‌شود (شکل ۲-الف). بعد از چسباندن استوانه یاد شده، مطابق شکل ۲-ب با استفاده از یک پیچش سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا جسم مورد نظر دچار شکست گردد (شکل ۲-ج). رابطه بین مقاومت برشی و لنگر پیچشی مطابق رابطه ۱ پیدا می‌شود.

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

که در آن τ تنش برشی (مگاپاسکال)، T گشتاور پیچشی (نیوتن میلی‌متر)، r شعاع استوانه فلزی (میلی‌متر) و J ممان قطبی دوم سطح (m^4) می‌باشد. همچنین برای انجام آزمون پیچش در این تحقیق از یک ترکمتر با بازوی ۷۵ سانتی‌متر استفاده شده است.



ج: نتیجه آزمایش



ب: اعمال لنگر پیچشی



الف: چسباندن استوانه فولادی

شکل ۲: آزمایش "پیچش"

به طور کلی در آزمون پیچش، هدف ارزیابی مقاومت فشاری بتن با ربط دادن آن به مقاومت سطحی می باشد. مقاومت سطحی یعنی مقاومتی که بر اساس اندازه گیری مقاومت لایه ی رویی بتن بدست می آید. برای این کار می بایست تعدادی نمونه بتنی را زیر جک فشاری بتن شکن قرار داده و مقاومت فشاری آن ها را تعیین نمود. سپس تعدادی نمونه ی دیگر را تحت آزمون پیچش قرار داده و مقاومت سطحی را اندازه گیری نمود. در انتها با رسم نمودار کالیبراسیون می توان با استفاده از آزمون پیچش، مقدار مقاومت فشاری بتن را ارزیابی نمود.

۳-۲- آزمایش "محفظه استوانه ای"

این روش که توسط نادری ابداع شده است [۹]، روشی دقیق با کاربردی وسیع برای تعیین نفوذپذیری بتن و دیگر مصالح ساختمانی، چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل پروژه است. برای انجام آزمایش ابتدا سطح بتن کاملاً خشک و تمیز می گردد. سپس مطابق شکل ۳-الف یک صفحه فلزی به کمک چسب اپوکسی روی سطح بتن چسبانده می شود. سپس قسمت فوقانی که شامل محفظه فشار به همراه گیج اندازه گیری فشار است بر روی صفحه فلزی محکم می شود و طبق شکل ۳-ب درون محفظه کاملاً با آب پر می گردد. همزمان با پیچاندن دسته تنظیم فشار بمنظور رسیدن به فشار مورد نظر، به کمک میکرومتر متصل به دستگاه، میزان حرکت آب به سمت پایین پیستون در زمان های مقرر قرائت می شود (شکل ۳-ج).



ب: قرائت میکرومتر



ب: پر کردن دستگاه با آب



الف: صفحه فلزی چسبیده به نمونه

شکل ۳: آزمایش "محفظه استوانه ای"

با چرخاندن دسته فشار، پیستون فشار به سمت پایین حرکت می کند. حرکت پیستون به سمت پایین توسط میکرومتر قابل قرائت است. در زمان های مختلف از شروع آزمایش عدد میکرومتر قرائت می شود. با داشتن قرائت میکرومتر و سطح اعمال فشار، مقدار آب نفوذ کرده به بتن و نرخ نفوذ آب در زمان قرائت میکرومتر را می توان توسط معادلات ۲ و ۳ تعیین نمود.

$$V = h \times A \quad (۲)$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad (۳)$$

که در آن V حجم آب نفوذ کرده به بتن (میلی لیتر)، h قرائت میکرومتر (میلی متر)، A سطح مقطع نمونه اعمال فشار (میلی متر مربع)، Q نرخ نفوذ آب (میلی لیتر بر ثانیه) و t زمان (ثانیه) است. پس از انجام آزمایش نفوذپذیری، نمونه بتنی توسط جک فشاری به دو نیم تقسیم شده و از عمق نفوذ خیس شده عکس گرفته می شود (شکل ۴).



ب: اندازه‌گیری مقدار خیس شدگی



الف: نمونه‌ی دو نیم شده

شکل ۴: اندازه‌گیری عمق نفوذ

۲-۴- ساخت نمونه‌ها

برای انجام آزمایشات در این تحقیق کلا از ۱۹۸ نمونه استفاده گردید که در ادامه با جزئیات شرح داده می‌شود. مطابق جدول ۱ آزمایش‌های مورد نظر برای بتن تحت شرایط معمولی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روز انجام شده است. تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای آزمایشات در شرایط معمولی برابر ۹۰ نمونه می‌باشد که ۶۰ نمونه برای تست پیچش و ۳۰ نمونه برای تست‌های نفوذپذیری و عمق نفوذ استفاده شده است.

جدول ۱: تعداد نمونه‌ها برای آزمایش بتن تحت شرایط معمولی

عمل آوری	پیچش	نفوذپذیری و عمق نفوذ
۷ روزه	۲۰	۱۰
۲۸ روزه	۲۰	۱۰
۱۲۰ روزه	۲۰	۱۰
تعداد کل	۶۰	۳۰

همچنین مطابق جدول ۲، تعداد کل نمونه‌های استفاده شده برای آزمایش روی بتن تحت شرایط تغییرات دمایی برابر ۱۰۸ عدد می‌باشد که ۷۲ نمونه برای تست پیچش و ۳۶ نمونه برای تست‌های نفوذپذیری و عمق نفوذ استفاده شده است.

جدول ۲: تعداد آزمونه‌ها برای آزمایش بتن تحت شرایط تغییرات دمایی

عمل آوری	تعداد چرخه	پیچش	نفوذپذیری و عمق نفوذ
۷ روزه	۲۰	۶	۳
	۴۰	۶	۳
	۶۰	۶	۳
	۸۰	۶	۳
۲۸ روزه	۲۰	۶	۳
	۴۰	۶	۳
	۶۰	۶	۳
	۸۰	۶	۳
۱۲۰ روزه	۲۰	۶	۳
	۴۰	۶	۳
	۶۰	۶	۳
	۸۰	۶	۳
جمع		۷۲	۳۶

طرح مخلوط نمونه‌های بتنی استفاده شده در تحقیق حاضر نیز در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (Kg/m³)

آب Kg/m ³	ماسه Kg/m ³	شن Kg/m ³	سیمان Kg/m ³	نسبت آب سیمان	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۲۰۶	۸۶۳/۶۳	۶۸۶/۸۳	۴۱۵/۹۲	۰/۵	۳۰

روند تغییرات دمایی شبیه تاثیرات محیطی تابستانی بر بتن در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵-الف نخست نمونه‌های بتنی در گرم‌کن برای مدت ۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس نگهداری شده و سپس از گرم‌کن خارج و مطابق شکل ۵-ب در دمای محیط که برابر حدود ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد برای مدت ۱۶ ساعت نگهداری شدند. به این ترتیب یک چرخه تغییرات دمایی کامل می‌گردد.



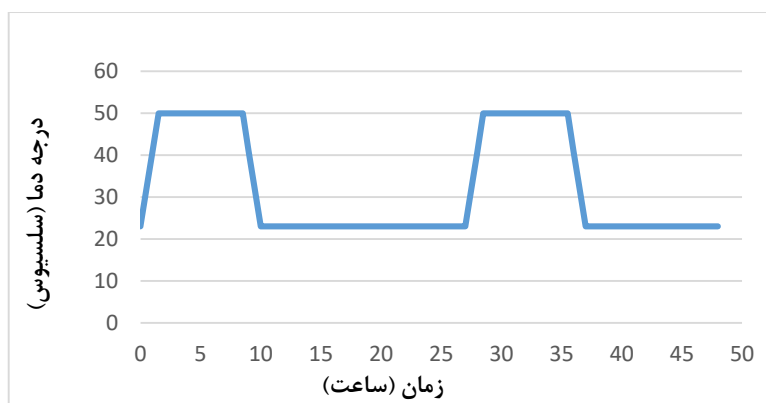
ب: نمونه‌های قرار داده شده در فضای آزاد



الف: نمونه‌های قرار داده شده در گرم‌کن

شکل ۵: چرخه تغییرات دمایی

روند انجام دو چرخه‌ی متوالی دمایی نیز در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است.

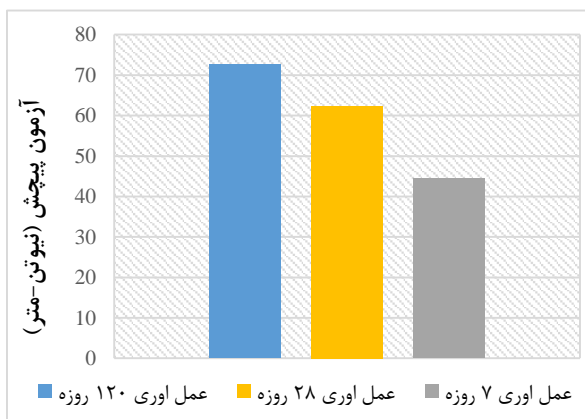


شکل ۶: دو چرخه متوالی تغییرات دمایی

۳- نتایج بدست آمده و تحلیل آن‌ها

۳-۱- نتایج آزمون "پیچش" نمونه‌ها عادی

نتایج حاصل از آزمون پیچش برای تعیین مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه) در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ افزایش مقاومت سطحی در نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه برابر ۲۷ درصد و در نمونه‌های ۱۲۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه برابر ۱۵ درصد می‌باشد. زیرا با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌ها، به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و پر شدن فضاهای خالی و منافذ با محصولات این واکنش، مقاومت سطحی افزایش پیدا می‌نماید. همچنین مقدار انحراف از معیار نتایج حاصل از آزمون پیچش برای نمونه‌های قرار گرفته در شرایط معمولی حدوداً برابر ۷ درصد می‌باشد. در خصوص دقت آزمون پیچش، برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی انواع بتن و ملات با استفاده از آزمون "پیچش" تحقیقات فراوانی انجام پذیرفته است. در تحقیقی با استفاده از آزمون پیچش روی ملات‌های سیمانی، همبستگی بالایی بین نتایج آزمایش "پیچش" با مقاومت فشاری و آزمون استاندارد کشیدن از سطح بدست آمد [۲۸]. در تحقیق دیگری با استفاده از سیمان تپ ۲ تحت شرایط مختلف عمل‌آوری، ضریب همبستگی ۹۴ درصد بین نتایج حاصل از آزمون پیچش و مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی بدست آمده است [۲۹]. برای تعیین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی تیر بتنی پوزولانی نیز با بکارگیری آزمون پیچش، از معادله کالبراسیون مربوطه در محدوده اطمینان ۹۷ درصد می‌توان استفاده نمود [۳۰].

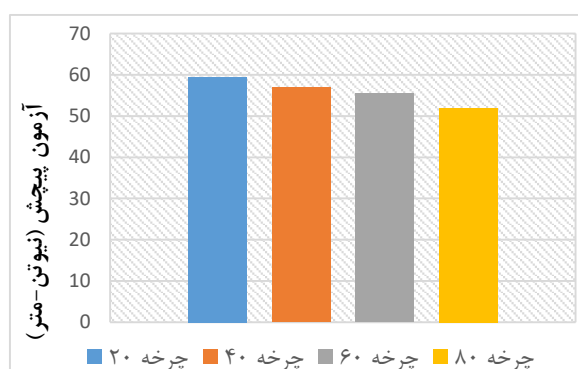


شکل ۷: نتایج مقاومت سطحی بتن تحت شرایط معمولی

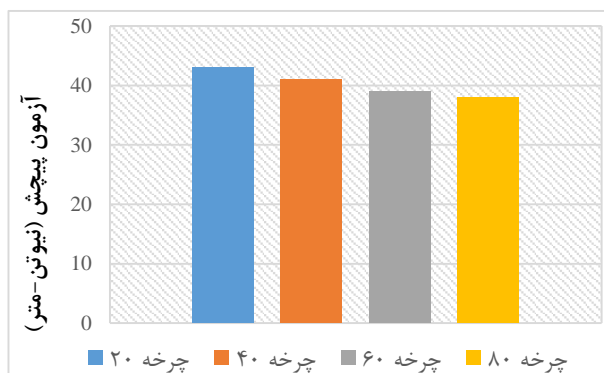
۳-۲- نتایج آزمون "پیچش" نمونه‌های تحت تأثیر تغییرات دمایی

نتایج حاصل از آزمایش "پیچش" روی نمونه‌های بتنی تحت تأثیر تغییرات دمایی در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-الف مشاهده می‌گردد که مقاومت سطحی بتن معمولی در سن ۱۲۰ روز برابر ۷۳ نیوتن متر می‌باشد در صورتیکه مقاومت سطحی نمونه-

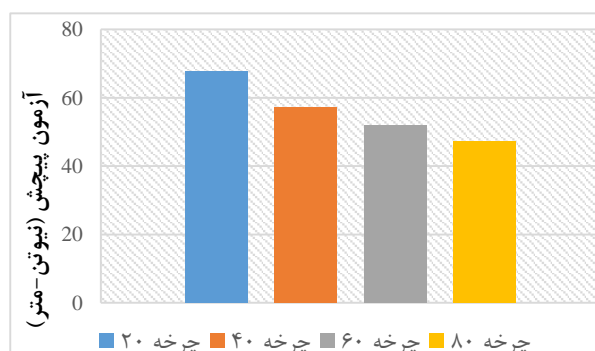
های بتنی تحت چرخه‌های دمایی با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سیکل به ترتیب برابر ۶۷/۸، ۵۷/۳، ۵۲ و ۴۷/۳ نیوتن متر شده است. برای بتن در سن ۲۸ روز نیز مقاومت سطحی برابر ۶۲ نیوتن متر است در صورتیکه مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی تحت چرخه‌های دمایی با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سیکل به ترتیب برابر ۵۹/۵، ۵۷، ۵۵/۵ و ۵۲ نیوتن متر شده است. برای بتن ۷ روزه نیز مقاومت سطحی برابر ۴۵ نیوتن متر است در صورتیکه مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی تحت چرخه‌های دمایی با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سیکل به ترتیب برابر ۴۳، ۴۱، ۵۵/۵ و ۵۲ نیوتن متر شده است. به عنوان مثال برای بتن در سن ۱۲۰ روزه مقدار کاهش مقاومت سطحی تحت تاثیر چرخه‌های دمایی فوق به ترتیب برابر ۷/۷، ۲۷/۴، ۴۰/۴ و ۵۴/۳ درصد می‌باشد که ملاحظه می‌گردد تغییرات دمایی دارای تاثیر زیادی روی مقاومت سطحی بتن می‌باشد. علت کاهش مقدار مقاومت سطحی تحت شرایط تغییرات دمایی به دلیل ایجاد منافذ ریز و ترک‌های میکروسکوپی روی بتن می‌باشد [۱۶]. در تحقیق دیگری تحت چرخه تغییرات دما در دماهای بین صفر تا ۶۰ درجه سلسیوس با گذشت مدت زمان طولانی نتیجه گرفتند که تغییرات دما می‌تواند اثر مخربی بر خواص مکانیکی بتن داشته باشد [۱۷]. همچنین هنگامیکه 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 [۱۸]. در تحقیق دیگری نیز مشاهده شده که با استفاده از چرخه حرارتی در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری و مقاومت برشی بتن به طور قابل توجهی کاهش یافته است [۱۹]. در ضمن مقدار انحراف از معیار نتایج حاصل از آزمون پیچش برای نمونه‌های قرار گرفته در شرایط تغییرات دمایی حدوداً برابر ۴/۵ درصد می‌باشد.



ب: عمل آوری ۲۸ روزه



الف: عمل آوری ۷ روزه



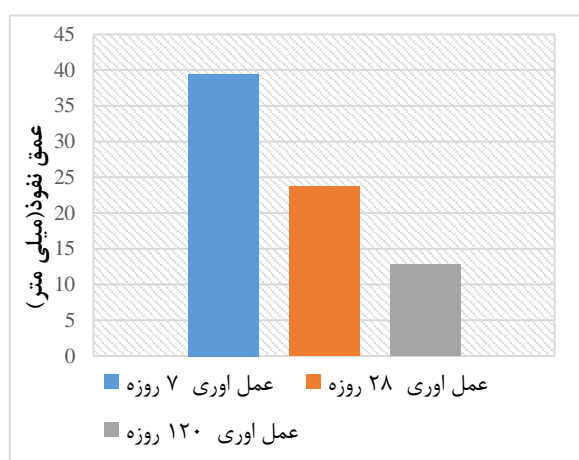
ج: عمل آوری ۱۲۰ روزه

شکل ۸: مقاومت سطحی بتن تحت تاثیر چرخه‌های تغییرات دمایی

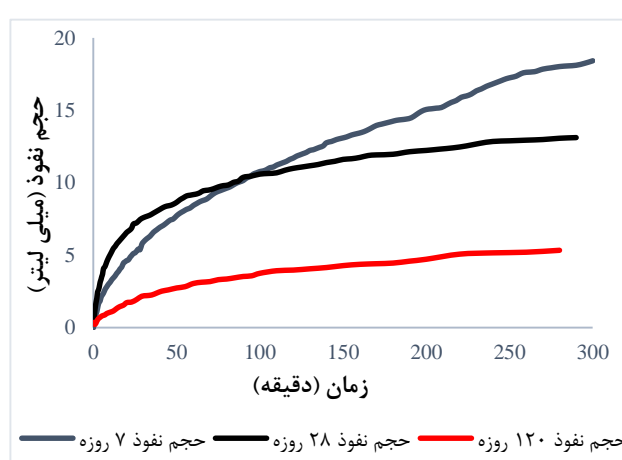
۳-۳- نتایج آزمون "محفظه استوانه‌ای" بتن عادی

در شکل ۹ مقدار نفوذپذیری و عمق نفوذ آب برای نمونه‌های با عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه با استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" قابل مشاهده است. مطابق شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که مقدار نفوذپذیری بتن در سن ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روزه به ترتیب برابر

۱۸/۳۷، ۱۶/۹۹ و ۶/۸۸ میلی لیتر می باشد. مشاهده می شود که در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در نمونه ها نفوذ می کند و با گذشت زمان، به دلیل پر شدن منافذ و حفره های خالی از آب، از سرعت نفوذ کاسته می شود. همچنین طبق شکل ۹-ب عمق نفوذ آب در سنین فوق به ترتیب برابر است با ۳۹/۴۵، ۲۳/۶۷ و ۱۲/۷۹ میلی متر. مشاهده می شود که رابطه مستقیمی بین نفوذپذیری و عمق نفوذ وجود دارد به گونه ای که با کاهش نفوذپذیری، مقدار عمق نفوذ نیز کاهش داشته است. کاهش نفوذپذیری با افزایش سن بتن به دلیل این می باشد که با افزایش سن، فرآیند هیدراسیون بتن بیشتر صورت پذیرفته و لذا سبب کاهش منافذ و قطع کانال های موئینه در بتن شده است. در پژوهش های دیگر نیز به نتایج تقریباً مشابهی دست یافته اند. در تحقیقی مقدار نفوذپذیری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز برابر ۲۴/۵، ۱۶/۷۴ و ۱۳/۱۶ میلی لیتر به دست آمده است که مشابهت زیادی با نتایج این مقاله که برابر ۱۸/۴، ۱۷ و ۶/۸۸ میلی لیتر می باشد دارد [۱۳-۳۴]. مقدار 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. همچنین مقدار انحراف از معیار نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری برای نمونه های قرار گرفته در شرایط معمولی حدوداً برابر ۱/۳ درصد می باشد.



ب: عمق نفوذ آب



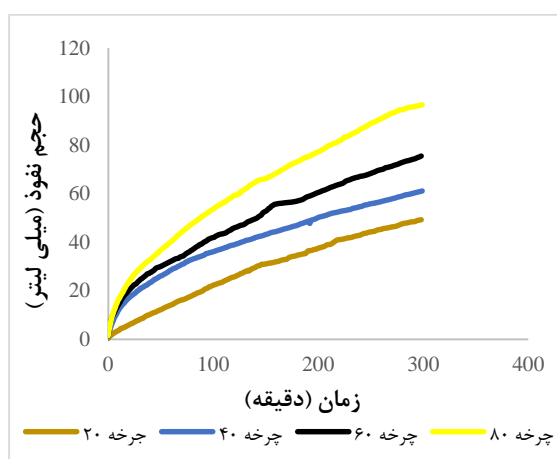
الف: حجم نفوذ آب

شکل ۹: نفوذپذیری نمونه های تحت شرایط معمولی

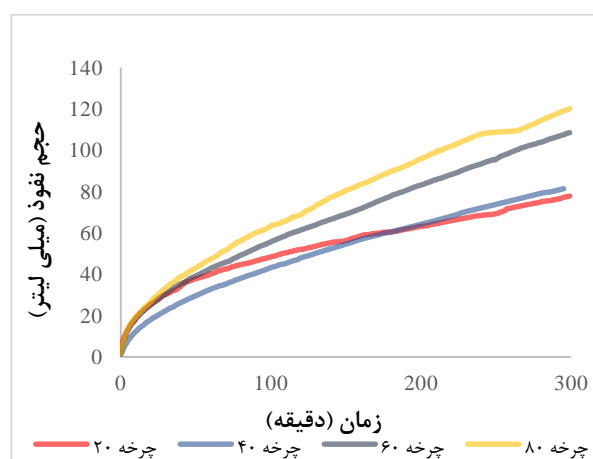
۳-۴- تأثیر چرخه های تغییرات دمایی بر نفوذپذیری بتن

در شکل ۱۰ نمودارهای نفوذپذیری نمونه ها تحت تغییرات دما در چرخه های مختلف قابل مشاهده است. نتایج حاصله نشان می دهد که با افزایش تعداد چرخه های تغییرات دما، نفوذپذیری نمونه ها نیز دچار افزایش چشمگیر شده اند. مطابق شکل ۱۰-الف مقدار نفوذپذیری بتن تحت سیکل های تغییرات دمایی ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ چرخه با ۷ روز عمل آوری به ترتیب برابر است با ۷۷/۸، ۹۳/۷، ۱۰۸ و ۱۱۵/۶ میلی لیتر می باشد. موارد فوق برای بتنی که به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری قرار گرفته است برابر است با ۴۹/۳، ۶۱/۱، ۷۵/۶ و ۹۶ میلی لیتر و برای بتنی که تحت ۱۲۰ روز عمل آوری قرار گرفته است نیز برابر است با ۳۳/۵، ۴۲، ۷۲ و ۸۵ میلی لیتر. مشاهده می شود که با افزایش تعداد چرخه های تغییرات دمایی، مقدار نفوذپذیری نیز افزایش یافته است. به عنوان مثال مقدار نفوذپذیری بتنی که ۱۲۰ روز تحت عمل آوری بوده است در چرخه ی ۸۰ به مقدار ۲/۵ برابر بتنی است که تحت ۲۰ چرخه قرار گرفته است. با مقایسه نتایج ملاحظه می شود که چرخه های تغییرات دمایی، نفوذپذیری نمونه ها را نسبت به نمونه هایی که در معرض تغییرات دما قرار نگرفته اند بطور قابل ملاحظه ای افزایش داده است. مقدار افزایش نفوذپذیری در چرخه های فوق نسبت به بتن معمولی به ترتیب با عمل آوری ۷ روزه، ۴۲۴، ۵۱۰، ۵۸۸ و ۶۲۶ درصد، در بتن با عمل آوری ۲۸ روزه، ۲۹۰، ۳۵۹، ۴۴۴ و ۵۶۵ درصد و در بتن با عمل آوری ۱۲۰ روزه، ۴۸۹، ۶۱۳، ۱۰۵۲ و ۱۲۴۵ درصد می باشد.

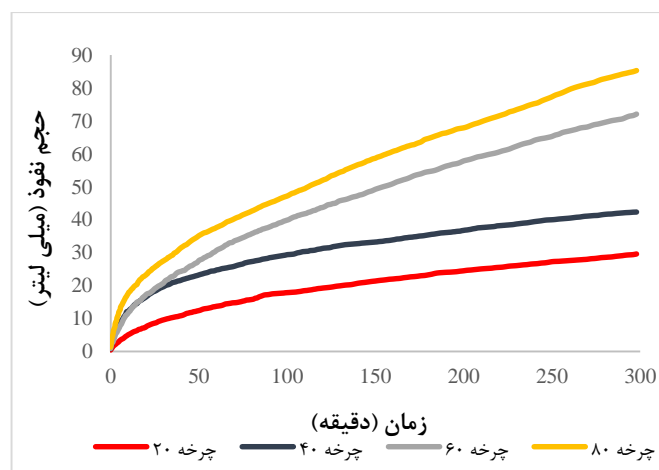
علت افزایش نفوذپذیری بتن تحت شرایط تغییرات دمایی بدین علت است که چرخه‌های دمایی مختلف باعث تبخیر آب آزاد در بتن شده و باعث ایجاد منافذ ریز و ترک‌های میکروسکوپی می‌گردد [۱۶]. همچنین چرخه تغییرات دما، در دماهای بین صفر تا ۶۰ درجه سلسیوس با گذشت مدت زمان طولانی می‌تواند اثر مخربی بر خواص مکانیکی بتن داشته باشد [۱۷]. هنگامیکه 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 [۱۸]. همچنین مقدار انحراف از معیار نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری برای نمونه‌های قرار گرفته در شرایط تغییرات دمایی حدوداً برابر ۱۵ درصد می‌باشد. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل برای بتن‌های قرار گرفته تحت شرایط تغییرات دمایی دارای انحراف از معیار بیشتری نسبت به بتن‌های قرار گرفته در شرایط معمولی می‌باشند.



ب: سن ۲۸ روزه



الف: سن ۷ روزه

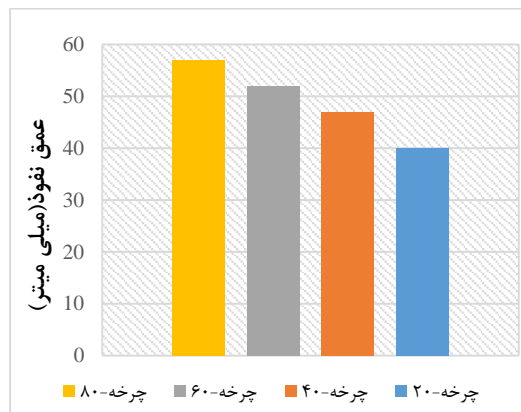


ج: سن ۱۲۰ روزه

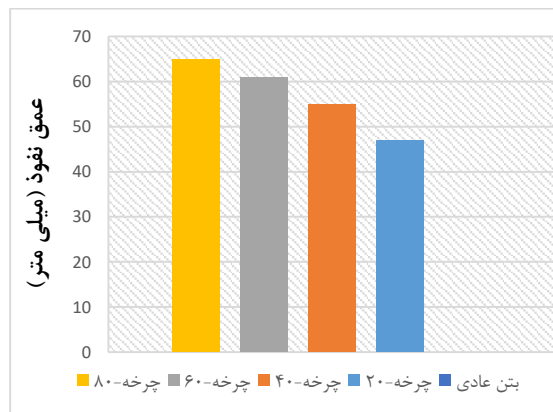
شکل ۱۰: حجم نفوذ آب در نمونه‌های تحت شرایط تغییرات دمایی

پس از آزمایش نفوذپذیری، بلافاصله نمونه زیر جک فشاری قرار گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شود. سپس عمق نفوذ یا قسمت خیس داخل نمونه اندازه‌گیری می‌شود. با بررسی عمق نفوذ نمونه‌های مختلف در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌ها، عمق نفوذ دچار افزایش چشمگیری شده است. مقدار عمق نفوذ در بتنی با عمل‌آوری ۷ روزه ۱۱۹، ۱۳۹، ۱۵۵ و ۱۶۵ برابر افزایش داشته

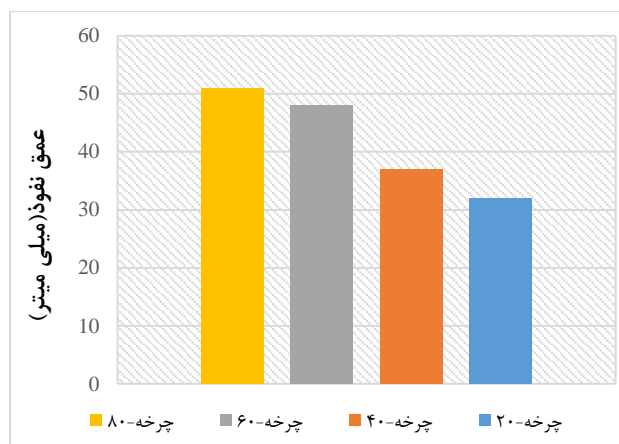
است. همچنین در بتنی با عمل‌آوری ۲۸ روزه ۱۶۹، ۲۲۰ و ۲۴۱ برابر و در بتنی با عمل‌آوری ۱۲۰ روزه ۲۵۸، ۳۱۲، ۳۵۹ و ۳۹۸ برابر شده است.



ب: سن ۲۸ روزه



الف: سن ۷ روزه

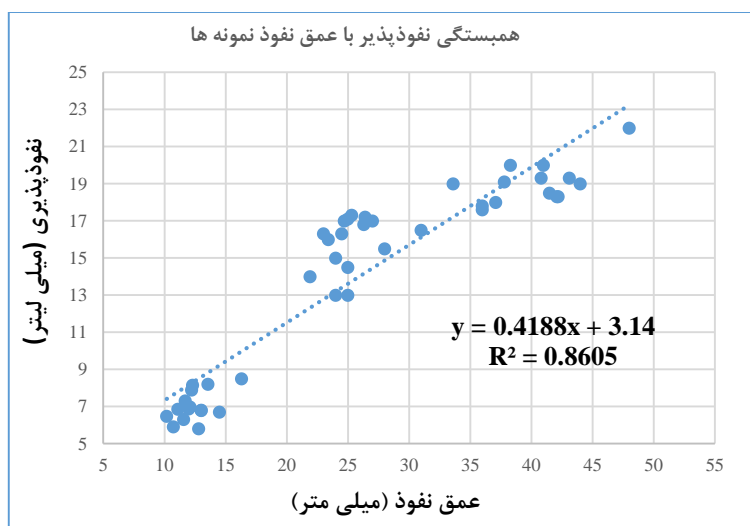


ج: سن ۱۲۰ روزه

شکل ۱۱: عمق نفوذ در نمونه‌های تحت شرایط تغییرات دمایی

۵-۳- همبستگی بین نفوذپذیری و عمق نفوذ نمونه‌ها

مطابق شکل ۱۲ با انجام تحلیل رگرسیون خطی میان نفوذپذیری و عمق نفوذ نمونه‌های بتنی، ضریب همبستگی برابر ۹۳ درصد بدست آمده است. با توجه به ضریب همبستگی بدست آمده می‌توان گفت که یک رابطه خطی با معادله $y = 0.42x + 3.14$ و با دقت بالا بین نفوذپذیری و عمق نفوذ نمونه‌های بتنی وجود دارد. در نتیجه می‌توان در صورت استفاده از آزمون "محفظه‌ای ستوانه‌ای" با اندازه-گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ساخته شده باسیمان تیپ II، مقدار عمق نفوذ همان نمونه‌ها را نیز تعیین نمود.



شکل ۱۲: همبستگی خطی بین نفوذپذیری و عمق نفوذ

۴- نتیجه گیری

- ۱- تغییرات دمایی دارای تاثیر زیادی روی مقاومت سطحی بتن حاصل از آزمون پیچش می باشد. برای بتن در سن ۱۲۰ روزه مقدار کاهش مقاومت سطحی تحت تاثیر سیکل های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ چرخه به ترتیب برابر ۷/۷، ۲۷/۴، ۴۰/۴ و ۵۴/۳ درصد می باشد.
- ۲- با گذشت زمان و کسب مقاومت بتن، مقدار نفوذپذیری کاهش می یابد به گونه ای که نفوذپذیری بتن در سن ۱۲۰ روزه نسبت به ۷ روز حدود ۶۲ درصد کاهش داشته است.
- ۳- چرخه های تغییرات دمایی باعث افزایش مقدار نفوذپذیری می گردد به گونه ای که نفوذپذیری بتن تحت سیکل های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ چرخه نسبت به بتن معمولی به ترتیب به مقدار ۴۸۹، ۶۱۳، ۱۰۵۲ و ۱۲۴۵ درصد افزایش داشته است.
- ۴- با توجه به ضریب همبستگی بالا بین نفوذپذیری و عمق نفوذ نمونه های بتنی آزمایش شده، لذا می توان گفت که یک رابطه خطی با معادله $y = 0.42x + 3.14$ و با دقت بالا بین نفوذپذیری و عمق نفوذ نمونه های بتنی وجود دارد. در نتیجه می توان در صورت استفاده از آزمون "محفظه ای ستوانه ای" با اندازه گیری نفوذپذیری نمونه های بتنی، مقدار عمق نفوذ همان نمونه ها را نیز تعیین نمود.
- ۵- در ابتدای آزمایش نفوذپذیری، آب با سرعت بیشتری در نمونه ها نفوذ می کند و با گذشت زمان، از سرعت نفوذ کاسته می شود که احتمالاً به دلیل پر شدن منافذ و حفره های خالی از آب می باشد.

مراجع

- [1] Li, X. Xu, Q. & Chen, S. (2016); an experimental and numerical study on water permeability of concrete. Construction and building materials, 105, 503-510.
- [2] Naderi, M. & Kaboudan, A. (2020); Evaluation of the effect of strength, duration, water pressure and casting direction on concrete permeability. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(9), 2379-2398.
- [3] ACI, ACI (2018); Concrete Terminology, ACI CT-18. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [4] 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.
- [5] Memon, S. A. Shah, S. F. A. Khushnood, R. A. & Baloch, W. L. (2019). Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature—A review. Construction and Building Materials, 199, 435-455.

- [6] Naderi, M. and Taheri, M., (2011). Investigation of the standard and common methods available in determining the permeability and durability of concrete. First Inter, National Conference in concrete with low permeability potable water tank of gellan, Iran.
- [7] DIN 1048 part 5: (1991); Test methods for concrete, Deutsches Institut für Normung, Germany.
- [8] BSI (British Standards Institution). (2019); Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure. British Standards Institution, BS EN 12390-8.
- [9] 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.
- [10] Naderi, M., Kaboudan, A., & Kargarfard, K. (2021); 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), 25-43.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Naderi, M., Maleki, B. and 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), pp.89-93.
- [14] 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.
- [15] Naderi, M., & Kaboudan, A. (2020); Evaluation of the effect of strength, duration, water pressure and casting direction on concrete permeability. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9), 2379-2398.
- [16] Ye, Z., Guo, G., Su, L. and 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.
- [17] B. Vidya, K. Srinivasa R. (2019). Effect of Thermal Cycles On Concrete: An Overview, *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. 2454-9150.
- [18] Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S. and Yao, G.C., 2006. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cement and concrete research*, 36(10), pp.1999-2005.
- [19] Phan, L. T., & Carino, N. J. (1998). Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 58-65.
- [20] Huang, H., An, M., Wang, Y., Yu, Z., & Ji, W. (2019). Effect of environmental thermal fatigue on concrete performance based on mesostructural and microstructural analyses. *Construction and Building Materials*, 207, 450-462.
- [21] ACI Committee 214, Report 214.4R-21. (2021). Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, American Concrete Institute.
- [22] ASTM C900-19. (ASTM 2019); Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM, C. 597-16 (ASTM 2016); Standard test method for pulse velocity through concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM C805/C805M-18. (ASTM 2018); Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM C1583/C1583M-20. (ASTM 2020); Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull off Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [26] Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M., & Rouhi, J. (2012); The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27(1), 73-77.
- [27] Naderi, M. (2007); New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6), 602-608.
- [28] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2021); STUDY OF BOND STRENGTH BETWEEN FIBER-REINFORCED MORTAR/STEEL AND THEIR MECHANICAL PROPERTIES USING PUSH-OUT, TWIST-OFF AND PULL-OFF METHODS. *Revista Romana de Materiale*, 51(2), 228-238.
- [29] Naderi, M., & Shibani, R. (2013); New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, *Aust. J. Basic Appl. Sci*, 7(2), 438-447.
- [30] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2020); determining the in-situ compressive and bending strengths of pozzolanic concrete containing polypropylene and glass fibers using "twist-off" method. *Scient. J. of Civil Eng*, 20(5).

- [31] ASTM C136-19 (ASTM 2019); Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [32] ASTM C128-15 (ASTM 2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [33] ASTM C127-15 (ASTM 2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] Naderi, M., Kaboudan, A., & Amin, A, M. (2020); Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using “Cylindrical chamber” method. Thesis of Ph.D. Imam Khomeini International University.