

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Relationship Between Water Penetration Rate and Concrete Surface Strength in Severe Freeze-Thaw Conditions and Developing a New Theory

Mahmood Naderi^a, Ali Saberi Varzaneh^{b,*}, Sardar Wali Din^c

^a Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^b Ph.D. Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^c Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 25 May 2024; Reviewed: 22 February 2025; Accepted: 03 March 2025

Keywords:

Friction transfer method, Water infiltration rate, Freeze-thaw cycles, Surface strength, Theoretical model.

1. Introduction

In this study, cubic concrete samples with dimensions of 15 millimeters were cured at ages of 7, 28, 90, and 120 days, and subjected to varying freeze-thaw cycles at durations of 40, 100, and 160 cycles. The surface resistance of the samples was evaluated using the friction transfer method. The volume of water penetration into the concrete was determined using a novel cylindrical chamber test, and the results were compared with a new fractal model.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The freeze-thaw cycles were conducted based on the ASTM C666-B standard. According to this standard, the thawing of concrete samples occurs in water, while the freezing is conducted in air. Concrete permeability was measured using a novel cylindrical chamber device. This method, invented by Naderi, is a precise technique with broad applicability for measuring the permeability of concrete and other building materials both in a laboratory setting and on-site. Permeability device is depicted in Fig. 1-a. Additionally, the surface resistance of the concrete was assessed using the friction transfer test. This test can be used to determine the surface strength of materials and components employed in the road construction, building, and structural industries. Furthermore, beyond laboratory conditions, this test can also be performed on-site during the service life of buildings and structures and the apparatus is shown in Fig. 1-b.



(a)



(b)

Fig. 1. Test setup: a) Demonstration of permeability device which is mounted on concrete specimens, b) The view of the friction transfer test setup which is in use

3. Results and discussion

3.1. Results of regression analysis

Taking into account the regression analysis between the surface strength obtained from the friction transfer method and the flow rate, a power relationship with an intensity coefficient of 90 and a coefficient of determination of 84% is derived. In this context, there is an inverse relationship between the flow rate and surface strength, because as surface strength increases, the flow rate decreases. The increase in surface resistance reduces the pores and capillary channels in the concrete. This condition leads to a decrease in the flow rate as well as a reduction in penetration volume, as shown in Fig. 2.

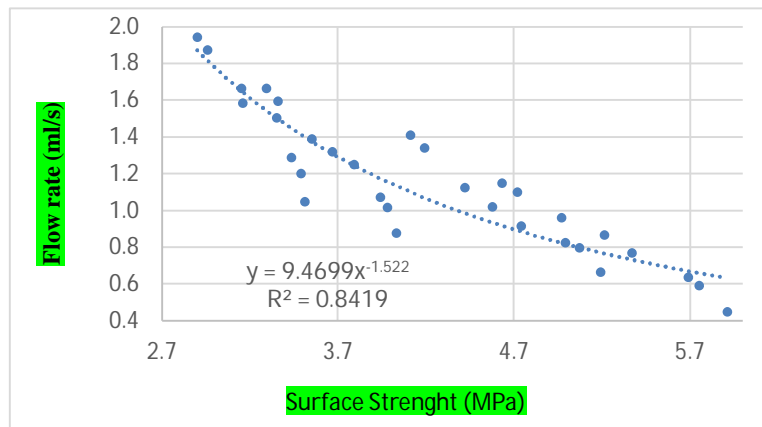


Fig. 1. Results of regression analysis between flow rate and surface strength of concrete specimen

4. Conclusions

With the increase in the number of severe freeze-thaw cycles, the volume of water penetration into the samples has increased. By comparing the permeability of normal concrete with that of concrete subjected to severe freeze-thaw conditions, it was observed that the increase in the volume of penetration for specimen affected by 40, 100, and 160 cycles in 120-day-cured concrete was 42.8%, 93%, and 156%, respectively. By employing the novel cylindrical chamber test, it is possible to measure the volume of water penetration into concrete under normal and severe freeze-thaw conditions without damaging the specimen. The correlation coefficient between the volume of water penetration and the depth of water penetration in concrete obtained from the cylindrical chamber test is 97%.

بررسی رابطه نرخ نفوذ آب و مقاومت سطحی بتن در شرایط حاد یخ و ذوب یخ و بسط یک تئوری جدید

محمود نادری¹، علی صابری ورزنه^{2*}، سردارولی دین³

¹ استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

² دکترای سازه دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

³ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

دریافت: 1403/3/15، بازنگری: 1403/12/4، پذیرش: 1403/12/13، نشر آنلاین: 1403/12/13

چکیده

با افزایش سن، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده که با افزایش مقاومت فشاری، نفوذ آب در بتن کاهش می‌یابد. اما در تئوری‌های موجود، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری، تأثیر سن بتن مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین در معادله داریسی، نفوذ آب به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده اما نفوذ آب به بتن در چند جهت می‌باشد. مقاومت سطحی بتن نیز می‌تواند رابطه نزدیکی با مقدار نفوذپذیری داشته باشد. لذا در این مقاله با بسط یک تئوری، معادله جدیدی ارائه شده که با فاصله گرفتن از مواردی همچون یک بعدی یا دو بعدی بودن انتشار آب، با استفاده از اندازه و توزیع منافذ داخل بتن، مقدار نرخ نفوذ آب به بتن را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌نماید. از مزیت‌های مدل فوق، تأثیر سن در اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب در بتن است. مقدار نرخ نفوذ آب در بتن نیز با به کارگیری آزمون محفظه استوانه‌ای اندازه‌گیری شده و نتایج آن با مدل تئوری مقایسه گردیده. با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک نیز مقاومت سطحی نمونه‌ها تعیین و رابطه آن با مقدار نفوذپذیری به دست آمده است. نمونه‌های آزمایشگاهی علاوه بر شرایط عادی، تحت شرایط حاد یخ و ذوب یخ قرار گرفته و تأثیر آن بر مقاومت سطحی، نرخ نفوذ و رابطه آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله بیانگر دقت بالای مدل جدید در اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب می‌باشد. همچنین ضمن تأثیر منفی شرایط حاد بر مقدار نرخ نفوذ آب، رابطه معکوسی بین نفوذپذیری با مقاومت سطحی بتن در شرایط عادی و حاد وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: روش انتقال اصطکاک، نرخ نفوذ آب، یخ و ذوب یخ، مقاومت سطحی، مدل تئوری.

1- مقدمه

حمله سولفات‌ها (Zhang و همکاران، 2024) می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. علاوه بر این نفوذپذیری سطحی بتن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد فوری و بلندمدت آن دارد (Yang و همکاران، 2024). ویژگی‌های نفوذپذیری اهمیت بسیار زیادی برای مقاومت بتن در برابر تأثیرات خارجی دارند. مواد شیمیایی آسیب رسان از طریق ترک‌ها و شکاف‌ها در ساختار بتن عبور کرده و منجر به واکنش فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌شوند، این امر باعث اختلال در ساختار بتن می‌شود (Ozhan و Yildirim، 2023). با این حال، نفوذپذیری بتن به عنوان یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر دوام و عملکرد سازه‌های بتنی شناخته شده است.

در طراحی سازه‌های مختلف بتنی علاوه بر مقاومت مورد نیاز، دوام بتن نیز می‌بایست مدنظر قرار گیرد. به عبارت دیگر، بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که هم دارای مقاومت مناسب بوده و هم دارای نفوذپذیری کمی باشد. به دلیل نفوذ عوامل آسیب‌رسان به داخل بتن و کاهش دوام آن، اطلاع از مقدار نفوذپذیری بتن بسیار با اهمیت می‌باشد. همچنین نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد مانند دماهای بالا (Shen و همکاران، 2024) فشار آب زیاد (Zhang و همکاران، 2024)، یخ و ذوب یخ مداوم (Zeng و همکاران، 2023)، حمله کلریدها (Zeng و همکاران، 2023)،



همکاران، 2020؛ Mahamud و همکاران، 2004). ویژگی‌های داخلی منافذ را توسط بُعد فراکتال به‌طور واضح می‌توان توصیف کرد و بُعد فراکتال یک ارتباط خوبی با قطر بحرانی و مساحت خاص سطحی منافذ دارد (Han و همکاران، 2022).

شناخت دقیق از عوامل اثرگذار بر نفوذپذیری و اتخاذ راهکارهای فنی مناسب می‌تواند عمر مفید سازه‌های بتنی را به‌طور چشم‌گیر افزایش دهد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن با آزمایش‌های رایج در دنیا، نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات مختلف است. همچنین به‌دلیل زمان‌بر بودن انجام این آزمایش‌ها، هزینه انجام آن‌ها نیز زیاد است. از سوی دیگر بسیاری آزمایش‌های مرسوم تنها در شرایط آزمایشگاهی قابل انجام بوده و قابلیت اعمال به‌صورت درجا را ندارند. روش نوین محفظه استوانه‌ای که توسط نادری در سال 2010 ابداع شد (Naderi، 2010)، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن استفاده شده است. 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 (Naderi و Kaboudan، 2021). با توجه به نتایج تحقیقی که به‌منظور مقایسه بین روش محفظه استوانه‌ای و روش BS انجام شده است، مشاهده شد که همبستگی خوبی بین دو روش وجود دارد. در تحقیق مذکور، عمق نفوذ محفظه استوانه‌ای با عمق نفوذ به‌دست آمده از استاندارد BS (EN-12390، 2009) محاسبه شده است که رابطه خطی با ضریب تعیین بیش از 0/95 بین نتایج حاصل از روش‌های مذکور مشاهده شده است (Naderi و Kaboudan، 2020).

در این تحقیق، نمونه‌های بتنی با ابعاد 15 میلی‌متر به‌شکل مکعبی در سنین 7، 28، 90 و 120 روز عمل‌آوری شده و چرخه‌های مختلف یخ و ذوب یخ در سیکل‌های 40، 100 و 160 اعمال گردیده هستند. برای بررسی مقاومت سطحی نمونه‌ها از روش انتقال اصطکاک استفاده شده است. حجم نفوذ آب در بتن با به‌کارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای به‌دست آمده و نتایج آن با مدل جدید فراکتال مورد مقایسه قرار گرفته است.

2-1- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند تیپ 2 و آب آشامیدنی استفاده شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM-C136 انجام پذیرفته است (ASTM-C136، 2019). چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به-ترتیب برابر 2330 و 2510 کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن‌ها نیز به‌ترتیب برابر 3/2 و 2/6 درصد به‌دست آمده است (ASTM-C128، 2015؛ ASTM-C127، 2015).

چسب مورد استفاده برای چسباندن صفحه فولادی به بتن

دوام سازه‌های بتنی عبارت از توانایی بتن در برابر بارگذاری محیطی و حفظ قابلیت سرویس‌دهی و یکپارچگی در طول زمان است (Huang و همکاران، 2021). در مناطق سردسیر، بتن در فضای باز ممکن است به‌دلیل چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ به‌طور قابل‌توجهی آسیب ببیند (Hanjri و همکاران، 2013).

مقدار و نفوذ آسیب در اجزای سازه به‌تعداد و محدوده چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ بستگی دارد (Xue و همکاران، 2023؛ An و همکاران، 2019).

مقاومت بتن در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ در ابتداً افزایش پیدا می‌کند و بعداً به‌تدریج کاهش می‌یابد (Zhang و همکاران، 2018). بنابراین، مطالعات زیادی در مورد تخریب بتن، تحت اثر چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ گزارش شده است. مکانیسم تخریب در محیط یخ و ذوب یخ توسط بسیاری از محققان توضیح داده شده است. فشار هیدرولیکی (Powers، 1945) و فشار اسمزی (Powers، 1953؛ Powers، 1949) از تئوری‌های ابتدایی بوده که در مورد آسیب یخ و ذوب یخ در تحقیقات اولیه ارائه گردیده است. بر اساس این دو تئوری، جریان محلول در منافذ، علت آسیب یخ و ذوب یخ در بتن است (Shi و Cheng، 2019).

در مناطق سردسیر، مقاومت در برابر نفوذپذیری یون کلر و مقاومت سایشی بتن، شاخص‌های مهمی برای ارزیابی دوام بتن هستند (Choinska و همکاران، 2007). ترک‌های جمع‌شدگی که به‌دلیل تفاوت در دما و رطوبت محیط رخ می‌دهد، به‌طور قابل توجهی بر نفوذپذیری بتن نیز تأثیر می‌گذارد (Gardner، 2005؛ Shi، 2004).

اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن یکی از مسائل حیاتی در صنعت ساخت‌وساز است که بر دوام و عملکرد سازه‌های بتنی تأثیر مستقیم دارد. استفاده از تئوری فراکتال در این زمینه، این امکان را می‌دهد تا با درک بهتر از توزیع و اندازه منافذ، راهی نوین برای ارزیابی نفوذپذیری بتن پیدا نمود. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال ارائه شده توسط Mandelbrot (1982) در توصیف ساختار منافذ مواد کامپوزیت سیمانی استفاده شده است، که موارد فوق در مطالعات محققان مختلف نیز به‌کار گرفته شده است (Xuan و همکاران، 2018).

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که مساحت، حجم و شکل منافذ دارای ویژگی‌های مهم فراکتالی هستند که ارتباط ویژه‌ای با خواص ماکروسکوپی آن دارد (Li و Zhang، 1995). از سوی دیگر، ساختار منافذ مواد سیمانی به‌عنوان یک سیستم بسیار پیچیده به‌شمار می‌رود، که نمی‌توان آن را به‌طور کامل با پارامترهای سنتی مانند تخلخل، حجم منافذ و توزیع قطر منافذ مشخص کرد (Gao و همکاران، 2014؛ Chen و همکاران، 2015). اما از طریق تحلیل فراکتال، پیچیدگی ساختار منافذ بتن را می‌توان به‌طور مؤثر اندازه‌گیری و مقایسه نمود (Ma و

2-4- آزمایش انتقال اصطکاک

آزمون انتقال اصطکاک، از آزمایش‌های نوین و درجا می‌باشد که توسط Naderi اختراع گردیده است. آزمون فوق را می‌توان برای تعیین مقاومت سطحی 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 (Naderi, 2005). 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 (Naderi و Saberi, 2020).

در آزمایش انتقال اصطکاک در نخست باید مغزه‌ای جزئی با قطر 50 میلی‌متر و عمق 25 میلی‌متر روی سطح بتن آماده شود. پس از آماده‌سازی مغزه جزئی، دستگاه فلزی انتقال اصطکاک بر روی مغزه جزئی قرار داده شده و با استفاده از پیچ‌های موجود در کنار دستگاه تثبیت می‌شود. سپس با استفاده از یک پیچ‌سنج دستی معمولی، به دستگاه فلزی، لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا مغزه جزئی دچار شکست گردد (شکل 2-الف)). در این آزمایش مغزه در اثر لنگر پیچشی ایجاد شده، دچار شکست می‌شود (شکل 2-ب)). در این حالت مقدار حداکثر تنش برشی ایجاد شده تحت اثر پیچش عبارت است از (رابطه (1)):

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



شکل 2- آزمایش انتقال اصطکاک:

الف) انجام آزمایش، ب) استوانه شکسته شده

2-5- آزمایش نفوذپذیری

در این تحقیق اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای که روشی جدید است، انجام شده است. این روش که توسط نادری اختراع شده است (Naderi, 2010)، روشی دقیق با کاربردی وسیع در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمان چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل کار است. نمای کلی این دستگاه در شکل 3-الف) نشان داده شده است.

برای استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای ابتدا سطح بتن

در آزمون محفظه استوانه‌ای، از نوع رزین اپوکسی است که دارای رنگ طوسی می‌باشد. چسب دو مؤلفه‌ای رزین اپوکسی به کار رفته دارای نسبت اختلاط یک‌به‌یک می‌باشد. مدت زمان خشک شدن بعد از استفاده برابر 4 ساعت بوده و دارای مقاومت فشاری و برشی به ترتیب برابر 70 و 15 مگاپاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته چسب مذکور نیز برابر 12750 مگاپاسکال می‌باشد.

2-2- ساخت نمونه‌های بتنی

با توجه به این‌که امروزه بتن استفاده شده در بسیاری از سازه‌های معمول دارای مقاومت فشاری حدود 30 مگاپاسکال می‌باشند لذا در این تحقیق از طرح اختلاط ارائه شده در جدول (1) استفاده گردید. برای انجام آزمایش محفظه استوانه‌ای اقدام به ساخت آزمون‌های مکعبی با ابعاد 150 میلی‌متر شد. آزمون‌ها در سنین 7 تا 90 روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول 1- طرح اختلاط بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	نسبت			
	آب	سیمان	شن	ماسه
30	0/5	415/92	686/83	863/63

2-3- چرخه یخ و ذوب یخ

چرخه‌های یخ و ذوب یخ بر اساس استاندارد ASTM C666-B (ASTM-C666-B, 2022) انجام پذیرفته است. طبق استاندارد مذکور، ذوب نمونه‌های بتنی در آب صورت پذیرفته و یخ زدن آن‌ها در هوا انجام می‌شود. نمونه‌ها به مدت سه ساعت در دمای 18- درجه سانتی‌گراد یخ زده و سپس برای مدت 50 دقیقه در آب با دمای 4 درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند. تعداد چرخه‌ها به ترتیب 40، 100 و 160 می‌باشند. نمونه‌ها بعد از انجام چرخه‌های مورد نظر، با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای تحت آزمایش نفوذپذیری قرار گرفته‌اند. در شکل (1) روند اعمال شرایط یخ و ذوب یخ نشان داده شده است.



شکل 1- انجام چرخه یخ و ذوب یخ

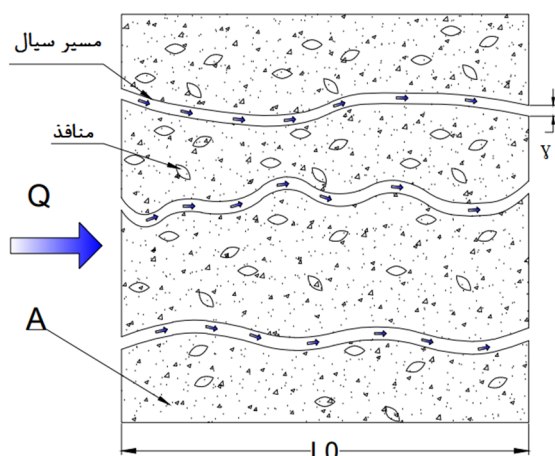
$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

که در آن V حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی (میلی متر مکعب)، h مقدار میکرومتر (میلی متر)، A سطح مقطع اعمال فشار (میلی متر مربع)، Q نرخ نفوذ آب (میلی متر مکعب بر ثانیه) و t مدت زمان (ثانیه) است.

6-2- مدل فراکتال

محیط متخلخل بتن که دارای منافذ مختلفی است، می توان به عنوان یک دسته از مویرگی های منحنی شکل در نظر گرفت، که در شکل (4) نیز نشان داده شده است. نفوذپذیری در محیط متخلخل بتن، با استفاده از تئوری فراکتال قابل محاسبه است. قطر منفذ محیط متخلخل به γ (میلی متر)، مساحت کل محیط متخلخل بتن به A (میلی متر مربع)، طول نمونه L_0 (میلی متر) و نرخ جریان در محیط متخلخل بتن با Q (میلی متر مکعب بر ثانیه) نشان داده می شود (Li و Yu، 2001).

رابطه نفوذپذیری با پارامترهای ساختاری محیط متخلخل را می توان به صورت کمی با تحلیل و تجزیه فراکتال محاسبه نمود (Xu، 2015). با توجه به تحقیقات قبلی، محیط متخلخل (بتن) در واقع یکنواخت نیست. همان طور که در شکل (6) نشان داده شده است، هنگامی که سیال در محیط متخلخل جریان دارد، مسیر آن به شکل منحنی می باشد (Patro و همکاران 2007؛ Olson و Bernabe، 2000).



شکل 4- نمونه از کاناها های مویرگی با پیچیده گی

7-2- تعیین اندازه منافذ با استفاده از آزمایش جیوه

ساختار داخلی بتن، اندازه منافذ و توزیع تخلخل، نقش تعیین کننده بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن دارد. خواص مهم بتن مانند دوام و مقاومت فشاری آن ارتباط مستقیمی با ساختار منافذ دارد (Wei و همکاران، 2023). آزمایش جیوه (MIP) رایج ترین

کاملاً خشک شده و آلودگی های موجود در سطح بتن زوده می شود. سپس رینگ فلزی توسط چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می شود (شکل 3-ب)). پس از سخت شدن چسب، دستگاه نفوذپذیری روی صفحه فلزی نصب می شود (شکل 3-ج)). سپس دستگاه محفظه استوانه ای 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 می شود که مقدار آن با استفاده از گیج تعبیه شده روی دستگاه قابل قرائت است. همچنین مقدار حجم نفوذ آب در بتن را می توان از طریق میکرومتر نصب شده در قسمت بالای دستگاه و در زمان های مختلف ثبت نمود.



(الف)



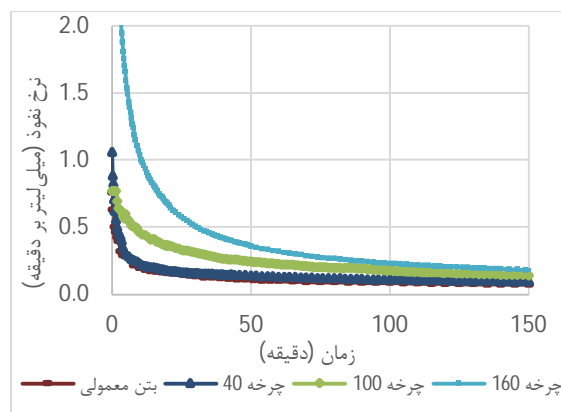
(ج)

(ب)

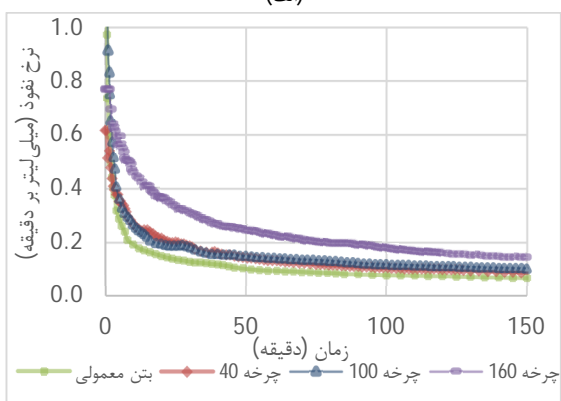
شکل 3- روند تست محفظه استوانه ای: (الف) اجزاء مهم دستگاه محفظه استوانه ای، (ب) حالت نصب دستگاه، (ج) چسباندن صفحه فلزی روی نمونه

مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن در زمان های مختلف، با انجام حاصل ضرب مقدار ثبت شده از میکرومتر در سطح مقطعی که فشار به آن وارد می شود توسط رابطه (2) 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 می توان از رابطه (3) محاسبه نمود.

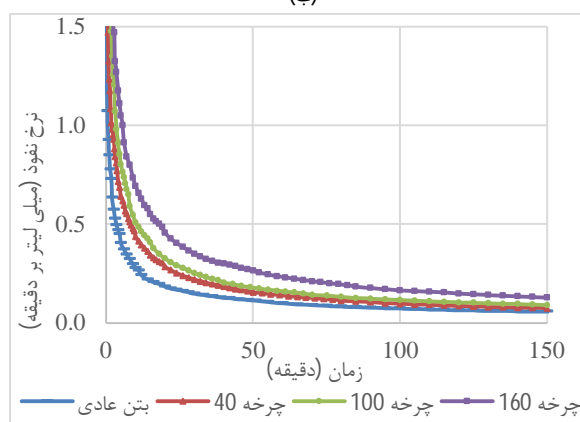
$$V = h \times A \quad (2)$$



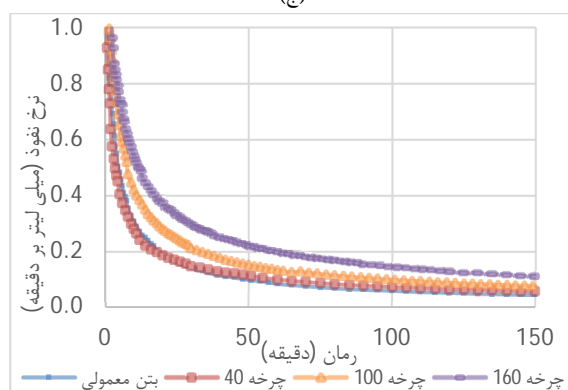
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 5- تأثیر چرخه‌های مختلف یخ و ذوب یخ بر نرخ نفوذ:
(الف) 7 روزه، (ب) 28 روزه، (ج) 90 روزه، (د) 120 روزه

روش برای مطالعه ویژگی‌های ساختار منافذ مواد سیمانی است. در سال‌های اخیر، این روش به‌طور گسترده برای مطالعه ساختار منافذ خمیر سیمان هیدراته، ملات و بتن مورد استفاده قرار گرفته است (Cook و Hover، 1993؛ Indelicato، 1993).

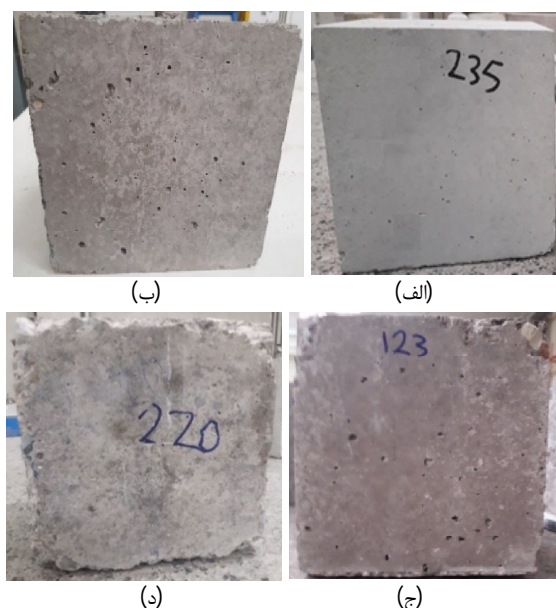
نمونه‌ها تحت فشار مشخص جیوه قرار می‌گیرد (این دستگاه می‌تواند اندازه منافذی که در محدوده 140 میکرومتر تا 10 نانومتر است را اندازه‌گیری نماید). فشار باعث نفوذ جیوه در بتن می‌شود (جیوه در فشار کم نیز به منافذ بزرگ بتن نفوذ می‌کند اما برای نفوذ در منافذ ریز نیاز به فشار بیشتری می‌باشد). دستگاه به‌شکل خودکار نتایج را اندازه‌گیری می‌کند که شامل حجم کلی منافذ، سطح ویژه، تخلخل و توزیع منافذ می‌باشد.

3- تحلیل و بررسی نتایج به‌دست آمده

3-1- نرخ نفوذ آب در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ

در این تحقیق، نمونه‌های بتنی در سنین 7، 28، 90 و 120 روزه و تحت چرخه‌های 40، 100 و 160 سیکل حاد یخ و ذوب یخ قرار گرفته و نرخ جریان آن‌ها با استفاده از آزمون محافظه استوانه‌ای به‌دست آمده است. در نمودارهای شکل (5) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ، نرخ نفوذ آب به نمونه‌ها افزایش نشان داده است. با مقایسه نرخ جریان بتن عادی با بتن قرار گرفته در شرایط حاد مشخص است که افزایش در نرخ جریان نمونه‌ها تحت تأثیر چرخه‌های مختلف در بتن با سن 7 روزه تحت چرخه‌های 40، 100 و 160 سیکل به‌ترتیب برابر 20/6، 49 و 86 درصد می‌باشد. همچنین در بتن با سن 28 روزه به‌ترتیب برابر 23/5، 50/6 و 90 درصد، در بتن با سن 90 روزه به‌ترتیب برابر 24/6، 55 و 112 درصد و در بتن با سن 120 روزه به‌ترتیب برابر 42/8، 93 و 156 درصد به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ، مقدار نرخ جریان افزایش پیدا نموده است. دلیل این موضوع، به‌وجود آمدن آسیب در داخل بتن است. در مورد این آسیب می‌توان گفت که مکانیزم آسیب بتن در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ ناشی از یخ زدن آب (یا محلول) در داخل یا روی سطح بتن می‌باشد (Yuan و همکاران، 2019).

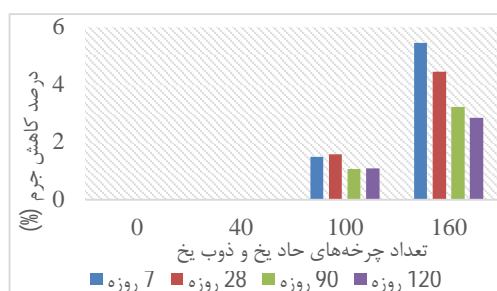
وقتی آب به یخ تبدیل می‌شود حجم آن 9 درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که آب در منافذ بتن تبدیل به یخ گردد، این افزایش حجم باعث آسیب بتن در اثر تنش تبلور می‌شود. فشار تبلور یک پدیده رایج یخ‌زدگی در طبیعت است. کریستال‌ها به‌سمت دیوار منافذ که دارای انحناهای مختلف است رشد می‌کنند (Ozcan و Koc، 2018).



شکل 6- حالت نمونه‌ها در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ: (الف) چرخه صفر، (ب) چرخه 40، (ج) چرخه 100، (د) چرخه 160

3-3- کاهش جرم نمونه‌ها در چرخه‌های یخ و ذوب یخ

میزان کاهش جرم نمونه‌های بتنی در اثر چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ از دیگر پارامترهایی است که نشان‌دهنده مقدار دوام بتن در برابر چرخه‌های فوق می‌باشد. درصد کاهش جرم نمونه‌های بتنی حاصل از 40، 100 و 160 چرخه حاد یخ و ذوب یخ در سنین 7، 28، 90 و 120 در شکل (7) نشان داده شده است. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری، افت جرمی نمونه‌ها کاهش یافته است. این امر به دلیل افزایش مقاومت بتن است که موجب کاهش شدت تخریبی چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش جرم نمونه‌ها، میزان تخریب ناشی از چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ را نشان می‌دهد. کاهش جرم نمونه‌ها در سن 7 روزه و تحت 100 و 160 چرخه به ترتیب 1/5 و 5/6 درصد و همچنین در سن 120 روزه تحت 100 و 160 چرخه به ترتیب 1/1 و 2/8 درصد به دست آمده است.



شکل 7- کاهش جرم نمونه‌ها در چرخه‌های یخ و ذوب یخ

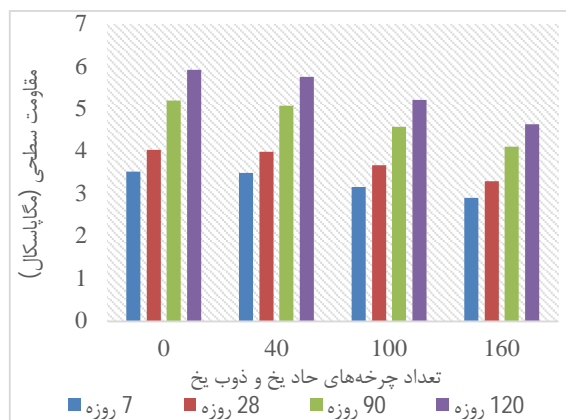
هنگام یخ زدن آب در منافذ انتهایی نیم‌کره کریستالی، باعث ایجاد تنش اضافی کریستالیزاسیون می‌شود. اگر تنش کریستالیزاسیون از حد مقاومت بتن بیشتر شود، باعث آسیب به بتن می‌گردد (Valenza و Scherer, 2007). علاوه بر این، کریستال‌های یخ، تمایل دارند به سمت فشار پائین، رشد کنند. در این صورت، دیوار جانبی توسط فشار کریستالیزاسیون آسیب می‌بیند و آب منجمد نشده منفذ، به ترک‌های میکرو نفوذ نموده و منجر به شکست انبساطی بیشتر می‌شود (Corte, 1962).

آب منفذی از سطح بتن شروع به انجماد می‌کند که باعث ایجاد فشار هیدرولیکی شده و آب منجمد نشده را در فضای خالی هوا فشرده می‌کند (Zeng و همکاران, 2010). نیروی واکنشی ناشی از حرکت آب و فشار هیدرولیکی بر دیوارهای منفذ، منبع اصلی فشار مخرب است (Cheng و Yu, 2002). فشار هیدرولیکی با طول جریان آب افزایش می‌یابد و با بیشتر شدن فشار هیدرولیکی از مقاومت کششی بتن، باعث آسیب بتن می‌شود. حباب هوا و منافذ مویرگی در مکانی که به هم متصل هستند، باعث افزایش حجم یخ می‌گردد. با افزایش بیشتر حجم یخ، آب منجمد نشده در منافذ مویرگی، نمی‌تواند به شکل آزاد جریان یابد و فشار هیدرولیکی بیشتر می‌شود. هنگامی که تنش کششی روی دیوار منفذ از مقاومت کششی نهایی بیشتر گردد، ساختار منفذ پاره شده و ترک ایجاد می‌شود (Zeng و همکاران, 2010). عوامل فوق بر نفوذپذیری بتن در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

3-2- آسیب ظاهری نمونه‌ها در چرخه‌های یخ و ذوب یخ

در شکل (6) آسیب ظاهری نمونه‌ها تحت شرایط حاد یخ و ذوب یخ نشان داده شده است. با توجه به بررسی ظاهری نمونه‌ها، دیده می‌شود که تحت 40 چرخه، تغییر زیادی در سطح بتن مشاهده نمی‌گردد. تنها منافذ کوچک سطحی، بزرگتر نمایان شده است در حالی که تحت 100 چرخه، نمونه بتنی در آسیب نسبتاً بزرگ قرار گرفته و تعدادی از کناره‌های آن شروع به کنده شدن نموده. این حالت، تأثیر بر مقاومت فشاری نمونه دارد و به کاهش آن منتج می‌شود. تحت 160 چرخه، کناره‌های نمونه به طور گسترده کنده شده و نمونه تحت آسیب جدی قرار گرفته است. همچنین مقاومت فشاری نیز تحت تأثیر قابل مشاهده‌ای قرار خواهد گرفت.

است. دلیل این تغییر این است که در چرخه‌های ابتدای منافذ موجود در بتن، اندازه کمی دارد که با گذشت زمان و افزایش تعداد چرخه‌ها مقادیر و تعداد منافذ گسترده‌تر و بیشتر می‌شود که روند تخریب را افزایش می‌دهد.



شکل 9- تغییرات مقاومت سطحی در چرخه‌های یخ و ذوب یخ

6-3- مقایسه تأثیر چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ بر کاهش مقاومت سطحی و فشاری

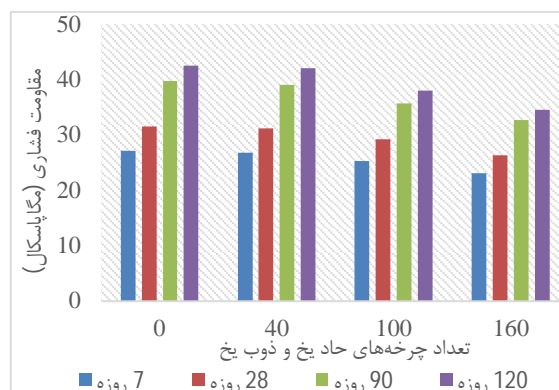
در این مقایسه، هدف از بررسی تأثیر ایجاد شده در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ در سطح و کل بتن است. برای رسیدن به این هدف، نمونه‌های بتنی در عمل‌آوری‌های 7، 28، 90 و 120 روز و در 160 چرخه شرایط حاد تحت بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج شکل (1) و شکل (2)، مشاهده می‌شود که تغییر ایجاد شده در مقاومت سطحی و فشاری به صورت کاهشی می‌باشد. این کاهش در بتن 7 روزه به ترتیب برابر با 17/4 و 15 درصد، در بتن 28 روزه به ترتیب برابر با 18/3 و 16/7 درصد، در بتن 90 روزه به ترتیب برابر با 20/8 و 17/6 درصد و در بتن 120 روزه به ترتیب برابر با 21/7 و 18/8 درصد حاصل شده است. شایان ذکر است که مقاومت سطحی حاصل از روش انتقال اصطکاک نسبت به مقاومت فشاری بیشتر کاهش یافته است؛ که علت آن، شروع تخریب در شرایط حاد یخ و ذوب یخ از سطح است. بنابراین سطح بتن بیشتر آسیب دیده است.

7-3- بررسی همبستگی بین مقاومت سطحی و نرخ جریان نمونه‌ها در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ

با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی حاصل از روش انتقال اصطکاک و نرخ جریان یک رابطه توانی با ضریب شدت 90 و ضریب تعیین 82 درصد حاصل می‌گردد. در این قسمت بین نرخ جریان و مقاومت سطحی یک رابطه معکوس برقرار است، به این دلیل که با افزایش مقاومت سطحی، نرخ

4-3- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ

در تحقیق حاضر از چهار نوع عمل‌آوری (7، 28، 90 و 120 روزه) و سه نوع چرخه حاد یخ و ذوب یخ (40، 100 و 160) استفاده شده است. مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در اثر چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ در شکل (8) قابل مشاهده است. با توجه به آن، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ، در مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش دیده می‌شود. کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت تأثیر چرخه‌های مختلف در بتن با عمل‌آوری 7 روزه به ترتیب برابر با 1/3، 7 و 15 درصد، در بتن با عمل‌آوری 28 روزه به ترتیب برابر با 1/1، 7/6 و 16/7 درصد، در بتن با عمل‌آوری 90 روزه به ترتیب برابر با 1/6، 10 و 17/6 درصد و در بتن با عمل‌آوری 120 روزه به ترتیب برابر با 1/2، 10/5 و 18/8 درصد به دست آمده است.



شکل 8- تغییرات مقاومت فشاری در چرخه‌های یخ و ذوب یخ

5-3- بررسی مقاومت سطحی حاصل از آزمون انتقال اصطکاک در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ

با توجه به مقادیر مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی در اثر چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ که در شکل (9) قابل مشاهده است. در این شرایط از چهار نوع عمل‌آوری (7، 28، 90 و 120 روزه) و سه نوع چرخه حاد یخ و ذوب یخ (40، 100 و 160) استفاده شده است. مشخص است که با افزایش تعداد این چرخه‌ها، مقاومت سطحی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت سطحی در بتن با عمل‌آوری 7 روزه به ترتیب به میزان 0/6، 10 و 17/4 درصد، در بتن با عمل‌آوری 28 روزه به ترتیب به میزان 1/2، 9 و 18/3 درصد، در بتن با عمل‌آوری 90 روزه به ترتیب به میزان 2/3، 11/8 و 20/8 درصد و در بتن با عمل‌آوری 120 روزه به ترتیب به میزان 2/7، 11/8 و 21/7 درصد می‌باشد. قابل ذکر است که در چرخه‌های ابتدایی، کاهش مقاومت مقدار کمی دارد، در حالی که در چرخه‌های بالاتر این مقدار افزایش بسیار زیاد کرده

$$d_{av} = \frac{4 \times V}{A} \quad (4)$$

که در رابطه (4) d_{av} قطر متوسط منافذ (نانومتر)، V حجم کل منافذ (میلی متر مکعب بر گرم) و A مساحت سطحی خاص منافذ (مترمربع بر گرم) است. با توجه به جدول (2)، مشاهده می‌شود که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد، علت این تغییرات پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که باعث فشردگی ساختار منافذ بتن می‌شود. مساحت منافذ در ابتدای عمل‌آوری افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان به حالت ثابت تبدیل می‌شود (Yu و Li، 2001).

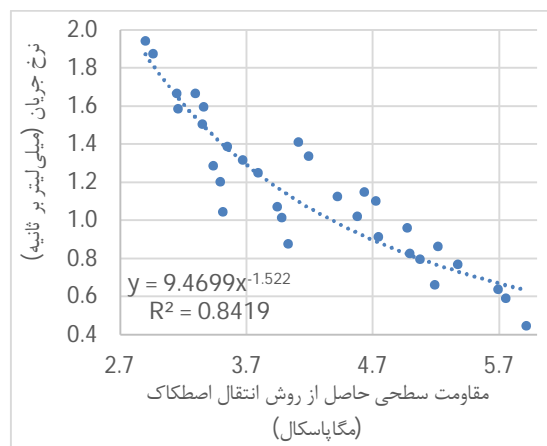
به این علت که مساحت منافذ نه تنها با قطر منافذ، بلکه با تعداد منافذ نیز ارتباط نزدیکی دارند. علاوه بر این، منافذ ژل و منافذ ریز مویرگی در مساحت منافذ، نقش عمده‌ای دارند. در مرحله اولیه هیدراسیون، تغییر ساختار منافذ داخل بتن سخت شده، عمدتاً حفره‌های ماکرو، منافذ مویرگی بزرگ و منافذ مویرگی متوسط به صورت تدریجی به منافذ مویرگی ریز و منافذ ژل، تبدیل می‌گردند.

جدول 2- مشخصات منافذ در سنین مختلف

تخلخل (%)	قطر متوسط (نانومتر)	مساحت سطح خاص منافذ (گرم/مترمربع)	حجم کلی منافذ (گرم/میلی‌متر مکعب)	عمل‌آوری (روز)
18/4	50/6	5/3	67	7
16/86	39/3	5/9	58	28
13/3	26/5	6/2	41	90

با توجه به تحقیقات پیشین و آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شده است که با افزایش سن عمل‌آوری در ریز ساختار منافذ بتن، تغییر به وجود می‌آید که علت این تغییر پیشرفت واکنش هیدراسیون سیمان است. این پیشرفت باعث کاهش اندازه منافذ می‌شود، زیرا محصولات واکنش ذکر شده به تدریج خلل و فرج را پر می‌کند (Wei و همکاران، 2023، Yu و Cheng، 2002). سپس با استفاده از اندازه‌های قطر متوسط منافذ، اقدام به قرار دادن آن در نمودار دوبعدی X و Y می‌شود. به گونه‌ای که در جهت X ، سن عمل‌آوری بر اساس روز و در جهت Y قطر متوسط منافذ جای‌گذاری گردد. داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب طبق روند فوق ترسیم می‌گردد. سپس یک نمودار معادل، با نمودار داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب رسم گردیده که باعث حصول رابطه (5) و نمودار شکل (12) شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری، قطر متوسط منافذ کاهش می‌یابد. لذا افزایش سن به معنای افزایش مقاومت،

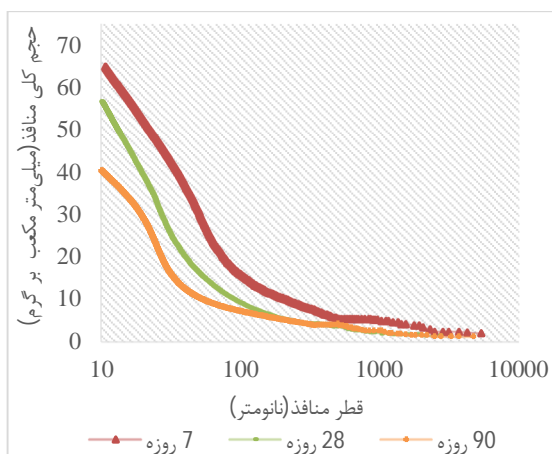
جریان کاهش می‌یابد، افزایش مقاومت سطحی، منافذ و کانال‌های مویرگی بتن را کاهش می‌دهد. این حالت منجر به کاهش نرخ جریان و همچنین کاهش حجم نفوذ می‌گردد که در شکل (10) قابل مشاهده است.



شکل 10- همبستگی بین مقاومت سطحی و نرخ جریان نمونه‌ها در چرخه‌های حاد یخ و ذوب یخ

3-8- نتایج آزمون جیوه و استخراج مدل جدید فراکتال

با استفاده از آزمون جیوه، حجم کل منافذ در سنین مختلف عمل‌آوری در شکل (11) نشان داده شده است.



شکل 11- تغییرات حجم کلی منافذ با افزایش عمل‌آوری

با استفاده از آزمون جیوه می‌توان مشخصه‌های بیشتری از ساختار منافذ را به دست آورد، مانند تخلخل، سطح کل منافذ و متوسط قطر منافذ. این مشخصات در جدول (2) نیز خلاصه شده است. با استفاده از حجم کل منافذ و مساحت سطح خاص منافذ و جایگذاری آن در رابطه (4)، قطر متوسط منافذ به دست می‌آید (Yu و Li، 2001).

است؛ لذا برای دریافت تعداد منافذ از قانون مقیاس‌بندی فراکتال (رابطه (8)) استفاده شده است و این رابطه با توجه به رابطه (7) تبدیل به رابطه (9) شده است. به طوری که در رابطه (8) مقیاس γ_{max}/γ به مقیاس جدیدی که مساوی با C^{-at} است تغییر یافته است و رابطه به شکل رابطه جدید (9) معرفی شده است.

$$N(t) = (C^{-at})^{D_f} = 2^{\frac{\gamma_{max} D_f}{\gamma}} \quad (9)$$

برای محاسبه بعد فراکتال مساحت سطحی D_f از رابطه (10) استفاده می‌شود (Xu, 2015).

$$D_f = D_e - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left(\frac{\gamma_{min}}{\gamma_{max}} \right)} \quad (10)$$

در رابطه (10)، D_e بعد هندسی اقلیدسی است که در فضای دوبعدی مقدار آن 2 و در فضای سه‌بعدی مقدار آن مساوی با 3 است (Xu, 2015). همچنین ε مقدار تخلخل بتن (0/15) است که در آزمایش جیوه به دست آمده است. γ_{min} و γ_{max} نیز حداکثر و حداقل قطر منافذ است که حداکثر آن برابر به 70 نانومتر می‌باشد که در محدوده منافذ قطر متوسط آزمایش جیوه حاصل شده است و مقدار حداقل آن در محدوده قطر منافذ ژل قرار دارد که مساوی با 5 نانومتر است (Han و همکاران، 2022).

کانال‌های مویرگی موجود در بتن دارای پیچیدگی است که این پیچیدگی را می‌توان با L_t نشان داد. اگر طول نمونه برابر با L_0 باشد؛ روشن است که $L_t \geq L_0$ اما در صورتی که جریان در یک کانال مستقیم باشد آنگاه $L_t = L_0$ است. Wheatcraft و همکاران (1988) برای دریافت L_t از قانون فراکتال رابطه (11) استفاده نمودند:

$$L_t(\gamma) = L_0^{D_t} \gamma^{1-D_t} \quad (11)$$

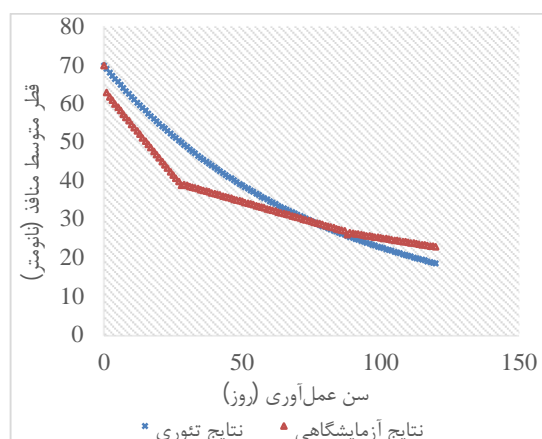
در رابطه (11)، D_t اندازه بعد پیچیدگی را نشان می‌دهد که به معنای بعد پیچ‌خوردگی مسیر مویرگی در هنگام عبور سیال از ساختار متخلخل است. هنگامی که $D_t = 1$ باشد نشان‌دهنده یک مسیر مویرگی مستقیم است و D_t بزرگتر از آن مربوط به یک مسیر مویرگی منحنی است. در این تحقیق برای دریافت طول پیچیده‌گی کانال مویرگی بتن از رابطه (12) استفاده می‌شود اما به جای γ از مقدار رابطه (5) استفاده شده که رابطه جدید (12) به دست آمده است.

$$L_t(t) = L_0^{D_t} \gamma_{max}^{1-D_t} 2^{\frac{-16.01 t + 16.01 t D_t}{t-1000}} \quad (12)$$

با مشتق‌گیری رابطه (9)، نرخ تغییرات تعداد منافذ dN را می‌توان به صورت رابطه (13) به دست آورد:

$$dN(t) = \ln 2 \frac{-16.01 t D_f}{t-1000} \frac{16010 D_f}{(t-1000)^2} \quad (13)$$

کاهش منافذ و کاهش نفوذپذیری است. رابطه (6)، رابطه مهمی است که در محاسبات استخراج مدل جدید استفاده می‌شود.



شکل 12- کاهش قطر منافذ با افزایش سن

$$\gamma = \gamma_{max} \times C^{at} \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{max}}{\gamma} = C^{-at} \quad (6)$$

در رابطه (5) ضریب زمان که بر اساس رابطه (7) حاصل می‌گردد و t سن عمل‌آوری و C قاعده تابع نمایی که مقدار آن 2 است. تعیین مقدار C و مقدار a ، بر این اساس است که منحنی تئوری، منطوق منحنی داده‌های آزمایشگاهی بوده و مقدار γ_{max} نیز برابر حداکثر قطر متوسط که برابر با 70 نانومتر است باشد.

$$a = \frac{16.01}{t-1000} \quad (7)$$

در سال 2002 Yu و Cheng برای دریافت توزیع منافذ در محیط متخلخل با استفاده از قانون مقیاس‌بندی فراکتال، از رابطه (8) استفاده نمودند. همچنین مدل فراکتالی، برای ساختار متخلخل بتن فوم، قادر به پیش‌بینی رابطه مقاومت فشاری با میزان تخلخل است، لذا از این مدل در بخش‌های دیگر بتن فوم نیز می‌توان استفاده نمود (Xu و Chen، 2019). ویژگی‌های فراکتالی توزیع اندازه منافذ، بیشتر در منافذ مویرگی بزرگ به عنوان عامل مؤثر عمل می‌نمایند. در همین حال، ویژگی‌های پیچیدگی در ناحیه منافذ کوچک ژل و ناحیه منافذ کوچک مویرگی دارای نقش مؤثر بودند (Choi و Kim، 2023).

در تحقیقی دیگر نیز با استفاده از مدل فراکتال، اقدام به ارائه یک مدل سه‌بعدی جهت اندازه‌گیری تخلخل بتن شده است (Liu و همکاران، 2022).

$$N(L \geq \gamma) = \left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma} \right)^{D_f} \quad (8)$$

در رابطه (8)، N تعداد منافذ، D_f بعد فراکتال و γ قطر منفذ

جدول 3- مشخصات منافذ در سنین مختلف

نرخ جریان (میلی متر مکعب بر ثانیه)			
درصد اختلاف (%)	نتایج آزمایشگاهی	نتایج تئوری	عمل آوری
12/43	1/048	1/178	7
2/9	1/032	1/062	9
2/6	1/015	0/989	11
7/3	0/991	0/919	14
9/6	0/967	0/874	17
10/8	0/935	0/834	21
9/9	0/879	0/792	28
9/8	0/834	0/752	41
7/28	0/789	0/732	54
2/9	0/744	0/723	67
1/6	0/699	0/711	80
6/17	0/665	0/706	90

وجود مقدار اندک اختلاف، نشان از دقت مدل تئوری است. در کل، روند تغییرات نرخ جریان با استفاده از مدل جدید فراکتال و نتایج آزمون محفظه استوانه‌ای دارای هم‌خوانی مناسبی می‌باشد. در هر دو روش، مقدار نرخ جریان با افزایش سن به شکل تدریجی کاهش می‌یابد که علت آن افزایش مقاومت بتن است. نمودار نرخ جریان به دست آمده از رابطه (18) در شکل (13) نشان داده شده است. در نمودارهای مربوطه، مشاهده می‌شود که مقادیر نرخ جریان با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد که با آزمایش‌های انجام شده مطابقت دارد و این بیانگر معتبر بودن تئوری مورد نظر است. دلیل این کاهش، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که منجر به کاهش منافذ و قطع کانال‌های مویینه گردیده است (Nderi و همکاران، 2018). با گذشت زمان و پیشرفت واکنش هیدراسیون، منافذ خالی با محصولات این واکنش پر می‌شوند و به همین ترتیب، مقادیر نرخ جریان بتن کاهش می‌یابد. همچنین در فرآیند هیدراسیون، مقاومت پیوند ذرات در خمیره سیمان افزایش می‌یابد و خلل و فرج بین ذرات در خمیره سیمان کاهش می‌یابد. فضاها موجود در خمیره سیمان تازه که از همان ابتدا مملو از آب هستند، با کمک فرآورده‌های ناشی از فعل و انفعالات هیدراسیون سیمان پر می‌شوند و از این رو، مقادیر نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابند (ASTM C1679-18، 2018).

نرخ جریان سیال، در یک کانال مویرگی را می‌توان بر اساس رابطه (14) اصلاح شده هاگن پوازی¹ به دست آورد (Yu و Cheng، 2002).

$$q(t) = \frac{\pi P \gamma^4}{128 L_t(t) \mu} \quad (14)$$

در رابطه (14)، P فشار سیال (مگاپاسکال) و μ ضریب ویسکوزیته (مگاپاسکال ثانیه) است. با استفاده از رابطه (5) و (12) می‌توان قطر متوسط و طول پیچیدگی جدید را در رابطه (14) جای‌گذاری کرد که رابطه (15) حاصل می‌گردد؛ این رابطه شکل جدید رابطه هاگن پوازی می‌باشد.

$$q(t) = \frac{\pi P \gamma_{max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} 2^{\left(\frac{16.01 t D_t + 48.03 t}{t-1000}\right)} \quad (15)$$

با استفاده از نرخ جریان حجمی یک کانال، نرخ کل جریان از محیط متخلخل را می‌توان با انتگرال‌گیری رابطه (16) محاسبه نمود؛ که رابطه (17) حاصل می‌گردد.

$$Q(t) = \int q(t) dN(t) \quad (16)$$

$$Q(t) = -\frac{\pi P \gamma_{max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)} + C \quad (17)$$

پس از محاسبه ثابت انتگرال، حالت نهایی رابطه نرخ جریان در رابطه (18) داده شده است که با به‌کارگیری این رابطه می‌توان نرخ جریان را برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری حساب کرد. همچنین رابطه (18) به نام مدل جدید فراکتال برای اندازه‌گیری نرخ جریان، معرفی می‌شود.

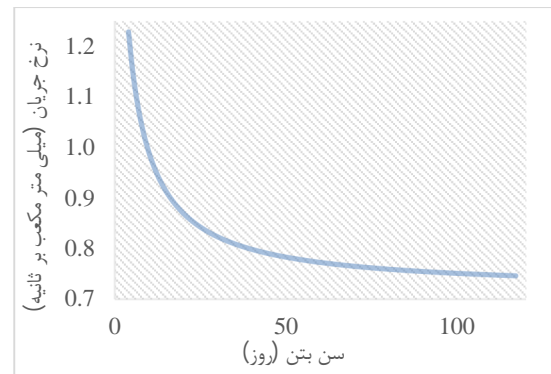
$$Q(t) = \frac{\pi P \gamma_{max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)} - \frac{\pi P \gamma_{max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} - 9 \quad (18)$$

مقدار نرخ جریان (Q) یکی از پارامترهای مهم است؛ با محاسبه آن می‌توان به پارامترهای مهم دیگری نظیر مقدار حجم نفوذ، ضریب نفوذپذیری و عمق نفوذ دست پیدا نمود.

3-9- مقایسه نتایج مدل جدید فراکتال و آزمون محفظه استوانه‌ای

در جدول (3) مقادیر نرخ جریان در سنین مختلف برای نتایج حاصل از مدل جدید فراکتال و آزمون محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که، درصد اختلاف بین نتایج نرخ جریان در عمل‌آوری 90 روز برابر با 6/17 درصد است.

- aggregate, ASTM West Conshohocken, PA, 2015.
- Astm, C127-15, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, ASTM Current Edition Approved Jan, 1, 2015.
- Astm, C136-19, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM C136-06, 2019.
- ASTM C666/C666M-22, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- ASTM C1679-18, Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- An M, Wang Y, Yu Z, "Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration", Construction and Building Materials, 2019, 198, 546-552.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.175
- Bernabé Y, Olson JF, "The hydraulic conductance of a capillary with a sinusoidally varying cross-section", Geophysical Research Letters, 2000, 27 (2), 245-248. https://doi.org/10.1029/1999GL010842
- Cheng Y, Shi Z, "Experimental study on nano-SiO₂ improving concrete durability of bridge deck pavement in cold regions", Advances in Civil Engineering, 2019.
https://doi.org/10.1155/2019/5284913
- Choinska M, Khelidj A, Chatzigeorgiou G, Pijaudier-Cabot G, "Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete", Cement and Concrete Research, 2007, 37 (1), 79-88.
https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.015
- Chen X, Zhou J, Ding N, "Fractal characterization of pore system evolution in cementitious materials", KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19, 719-724.
https://doi.org/10.1007/s12205-013-0320-2
- Chen Y, Xu YF, "Compressive strength of fractal-textured foamed concrete. Fractals, 2019, 27 (01), 1940003.
https://doi.org/10.1142/S0218348X19400036
- Cook RA, Hover KC, "Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors", Construction and Building Materials, 1993, 7 (4), 231-240.
https://doi.org/10.1016/0950-0618(93)90007-Y
- Corte AE, "Vertical migration of particles in front of a moving freezing plane", Journal of Geophysical Research, 1962, 67 (3), 1085-1090.
https://doi.org/10.1029/JZ067i003p01085
- EN B, 12390-8, "Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure", BSI, London, 2009.
- Gardner DR, Lark RJ, Barr B, "Effect of conditioning temperature on the strength and permeability of normal-and high-strength concrete", Cement and concrete research, 2005, 35 (7), 1400-1406.
https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.012
- Gao Y, Jiang J, De Schutter G, Ye G, Sun W, "Fractal and



شکل 13- تغییرات نرخ جریان حاصل شده از تئوری فراکتال بسط داده شده با توجه به زمان عمل آوری

4- نتیجه گیری

- با توجه به تک بعدی نبودن نفوذ آب به بتن و اهمیت سن بتن در مقدار نفوذپذیری بتن، یک مدل تئوری جدید در این مقاله جهت اندازه گیری مقدار نرخ جریان ارائه گردید. با استفاده از معادله مذکور می توان نرخ نفوذ را با دقت بالایی اندازه گیری نمود.
- با مقایسه مدل تئوری جدید و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که مقدار اختلاف نرخ نفوذ آب در سن 90 روز حدود 6 درصد می باشد که نشان از دقت مدل تئوری جدید می باشد.
- با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی حاصل از روش انتقال اصطکاک و نرخ جریان در شرایط حاد یخ و ذوب یخ، یک رابطه توانی معکوس با ضریب شدت 90 درصد حاصل می گردد. به عبارتی با افزایش مقاومت سطحی، نفوذپذیری بتن کاهش می یابد.
- با افزایش تعداد چرخه های حاد یخ و ذوب یخ، نرخ نفوذ آب به نمونه ها افزایش نشان داده است. با مقایسه نرخ جریان بتن عادی با بتن قرار گرفته در شرایط حاد مشخص شد که افزایش در نرخ جریان نمونه ها در بتن با سن 120 روزه تحت چرخه های 40، 100 و 160 سیکل به ترتیب برابر 93، 42/8 و 156 درصد به دست آمده است.
- با بررسی درصد کاهش جرم نمونه های بتنی حاصل از 40، 100 و 160 چرخه حاد یخ و ذوب یخ در سن 7، 28، 90 و 120 مشاهده شد که با افزایش سن عمل آوری، افت جرمی نمونه ها کاهش یافته است. کاهش جرم نمونه ها در سن 120 روزه و تحت 40، 100 و 160 چرخه به ترتیب برابر 5/8، 4/2 و 9 درصد به دست آمده است.

5- مراجع

- ASTM, C128-15, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.018>
- Naderi M, Varzaneh AS, "Curing and Shrinkage Effect on the PMM/Concrete Bond, using Friction-transfer and Pull-off Methods", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 2020, 33 (1), 10.22067/civil.v1i33.82639
- Naderi M, "Determination of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method", Registration of Patent in Companies and Industrial Property Office, Registration Number 67726, 2010.
- Naderi M, Kaboudan A, Akhavan Sadighi A, "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*, 2018, 6 (1), 116-131.
<http://civiljournal.semnan.ac.ir/>
- Özcan F, Koç ME, "Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state", *Construction and Building Materials*, 2018, 187, 382-393.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.183>
- Patro D, Bhattacharyya S, Jayaram V, "Flow kinetics in porous ceramics: understanding with non-uniform capillary models", *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90 (10), 3040-3046.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01776.x>
- Powers TC, Helmuth RA, "Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing", In *Highway research board proceedings*, 1953, (Vol. 32).
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/32/32-019.pdf>
- Powers TC, Willis TF, "The air requirement of frost-resistant concrete", 1949.
- Powers TC, "January. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete", In *Journal Proceedings*, 1945, 41 (1), 245-272.
<https://doi.org/10.14359/8684>
- Standard B, "Testing hardened concrete", *Compressive Strength of Test Specimens*, BS EN, 2009, 12390-3.
- Shen L, Zhang L, Yang X, Di Luzio G, Xu L, Wang H, Cao M, "Multiscale cracking pattern-based homogenization model of water permeability in hybrid fiber-reinforced concrete after high-temperature exposure", *Journal of Building Engineering*, 2024, 84, 108643.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108643>
- Shi C, "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results", *Cement and concrete research*, 2004, 34 (3), 537-545.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.007>
- Singh LP, Goel A, Bhattacharyya SK, Sharma U, Mishra G, "Hydration studies of cementitious material using silica nanoparticles", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2015, 13 (7), 345-354.
- multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Construction and Building Materials*, 2014, 69, 253-261.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.065>
- Hanjari KZ, Kettil P, Lundgren K, "Modelling the structural behaviour of frost-damaged reinforced concrete structures", *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9 (5), 416-431.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2011.552916>
- Han X, Wang B, Feng J, "Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP", *Construction and Building Materials*, 2022, 322, 126504.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126504>
- Huang M, Dong Q, Ni F, Wang L, "LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283, 124583.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124583>
- Indelicato F, "On the correlation between porosity and strength in high-alumina cement mortars", *Materials and Structures*, 1990, 23, 289-295.
<https://doi.org/10.1007/BF02472202>
- Kim J, Choi S, "Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes", *Construction and Building Materials*, 2023, 366, 130157.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130157>
- Liu H, Xie Z, Yu R, Zhang N, "A new three-dimensional fractal dimension model to describe the complexity of concrete pores", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2022, 20 (3), 127-138.
<https://doi.org/10.3151/jact.20.127>
- Mahamud M, López Ó, Pis JJ, Pajares JA, "Textural characterization of chars using fractal analysis", *Fuel Processing Technology*, 2004, 86 (2), 135-149.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.01.001>
- Ma H, Sun J, Wu C, Yi C, Li Y, "Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars", *Materials*, 2020, 13 (11), 2442.
<https://doi.org/10.3390/ma13112442>
- Mandelbrot BB, Mandelbrot BB, "The fractal geometry of nature (Vol. 1, pp. 25-74)", New York: WH freeman, 1982.
<https://doi.org/10.1080/00029890.1984.11971507>
- Naderi M, Kaboudan A, "Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability", *Journal of Building Engineering*, 2021, 37, 101928.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101928>
- Naderi M, Kaboudan A, "Cylindrical Chamber: A new in situ method for measuring permeability of concrete with and without admixtures", *Journal of Testing and Evaluation*, 2020, 48 (3), 2225-2241.
<https://doi.org/10.1520/JTE20190578>
- Naderi M, "Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 2005, 19 (6), 454-459.

- Engineering, 2023, 7 (1), 48-59.
<https://doi.org/10.38088/jise.1174927>
- Zhang B, Li S, "Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34 (4), 1383-1386.
<https://doi.org/10.1021/ie00043a044>
- Zhang G, Zheng H, Wei X, Li Z, Yan Z, Chen X, "Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure", *Developments in the Built Environment*, 2024, 100385.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100385>
- Zhang J, Zhou L, Nie Q, Wu H, Wu L, "Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete", *Construction and Building Materials*, 2024, 411, 134369.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134369>
- Zhang M, Yang LM, Guo JJ, Liu WL, Chen HL, "Mechanical properties and service life prediction of modified concrete attacked by sulfate corrosion", *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/8907363>
- Zeng Q, Li K, Fen-chong T, Dangla P, "June. A study of the behaviors of cement-based materials subject to freezing", In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, IEEE, 2010, 1611-1616.
<https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535987>
- Zeng W, Wang W, Pan J, Liu G, "Effect of steel fiber on the permeability of freeze-thaw damaged concrete under splitting tensile and compressive loads", *Journal of Building Engineering*, 2023, 80, 108086.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108086>
- Zeng W, Zhao X, Zou B, Chen C, "Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion", *Journal of Building Engineering*, 2023, 80, 108042.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108042>
- <https://doi.org/10.3151/jact.13.345>
- Torrent RJ, Neves RD, Imamoto KI, "Concrete permeability and durability performance: from theory to field applications", CRC Press, 2021.
<https://doi.org/10.1201/9780429505652>
- Valenza II JJ, Scherer GW, "A review of salt scaling: II. Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, 2007, 37 (7), 1022-1034.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.003>
- Wei J, Chen Z, Liu J, Liang J, Shi C, "Review on the characteristics and multi-factor model between pore structure with compressive strength of coral aggregate", *Construction and Building Materials*, 2023, 370, 130326.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130326>
- Wheatcraft SW, Tyler SW, "An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry", *Water Resources Research*, 1988, 24 (4), 566-578.
<https://doi.org/10.1029/WR024i004p00566>
- Xuan W, Chen X, Yang G, Dai F, Chen Y, "Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures", *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187, 222-236. Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures
- Xue G, Zhu H, Xu S, Dong W, "Fatigue performance and fatigue equation of crumb rubber concrete under freeze-thaw cycles", *International Journal of Fatigue*, 2023, 168, 107456.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107456>
- Xu P, "A discussion on fractal models for transport physics of porous media", *Fractals*, 2015, 23 (03), 1530001.
<https://doi.org/10.1142/S0218348X15300019>
- Yang J, Dong Q, Chen X, Shi B, Wang X, "Evaluation of concrete surface permeability: A dynamic water film-based approach", *Measurement*, 2024, 224, 113863.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113863>
- Yuan J, Du Z, Wu Y, Xiao F, "Freezing-thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters", *Construction and Building Materials*, 2019, 204, 317-326.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.149>
- Yu B, and Cheng, P., 2002. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International journal of heat and mass transfer*, 45(14), pp.2983-2993.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00014-5)
- Yu B, Li J, "Some fractal characters of porous media", *Fractals*, 2001, 9 (03), 365-372.
<https://doi.org/10.1142/S0218348X01000804>
- Yıldırım M, Özhan HB, "Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages", *Journal of Innovative Science and*