

# The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using “Cylindrical chamber” and “Pull-off” test methods

Mahmood Naderi<sup>1</sup>, Sardarwali Din<sup>2</sup>, Ali Saberi Varzaneh<sup>3\*</sup> 

1. Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2. Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
3. Ph.D. Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin.

## Abstract

Diffusion equations such as Darcy's equation which is used to measure the permeability coefficient of concrete has a one-dimensional limitation. If the water penetrates into the concrete in a multi-dimensional way. Therefore, there is a need for equations that measure the permeability coefficient of concrete either in a multi-dimensional way or without considering things like one-dimensional, two-dimensional or three-dimensional. Also, acute environmental conditions such as different cycles of ice and ice melting have a negative effect on concrete and especially on the surface of concrete. Therefore, in this article, according to the fractal theory, a new theoretical relationship has been presented that measures the permeability coefficient of concrete without the need for permeability dimensions. Also, the relationship between the surface resistance of concrete and its permeability coefficient in the conditions of ice and ice melting has been investigated by using pull tests from the surface and cylindrical chamber. Cylindrical chamber test is a new test invented by Mahoud Naderi. This test is very simple and has a portable device. The above test has the ability to measure the permeability of concrete in situ. Using this test, it is possible to measure the permeability of water into the concrete without breaking the concrete. To perform the above test, a steel plate must be glued on the concrete surface using epoxy resin glue. The desired adhesive must have the required compressive and shear strength so that no water leaks around it during the test. After that, the cylindrical container should be placed on the steel plate and water should be poured into it. Then, by using the handle on the device, the required pressure is applied to the water so that the water penetrates into the concrete. In the "direct tension" test to determine the surface resistance of concrete, first a metal cylinder with a diameter of 5 cm is attached to the place of the test using epoxy resin glue, then by using the "direct tension" device, the tensile force is applied to the cylinder. It is inserted to separate from the concrete surface. According to the existing relationship, the resistance value obtained by the "direct tension" method is obtained by dividing the tension force applied by the area of the cylinder. The direct tensile test can also be performed in situ. In addition, unlike the previous theories, the new theory has the ability to investigate the effect of processing time on the permeability coefficient. The obtained results show the high accuracy of the presented model for measuring the permeability coefficient of concrete. Also, the acute conditions of ice and ice melting have a negative effect on the permeability coefficient of concrete, and an inverse relationship between the permeability coefficient of concrete and the surface resistance obtained from the pull-out test was observed. With the increase in the number of acute cycles of ice and ice melting, the permeability of concrete also increases, which shows the negative effect of these conditions on concrete. Also, a great agreement between the theoretical and experimental results was observed.

## Review History

Received: May 20, 2024

Revised: Aug 28, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

## Keywords

Pull-off test

Cylindrical chamber test

Acute conditions

Permeability coefficient

\* Corresponding Author Email: [ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir) - ORCID: 0000-0003-0921-6484



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

## ارتباط ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن با به کارگیری آزمون "محفظه استوانه‌ای" و "Pull-off"

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

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

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

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

### چکیده

### تاریخچه داوری

معادلات انتشار مانند معادله داری که برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن بکار می‌رود دارای محدودیت یک بعدی می‌باشد. در صورتیکه آب بصورت چند بعدی به داخل بتن نفوذ می‌کند. لذا نیاز به معادلاتی می‌باشد که یا بصورت چند بعدی یا بدون در نظر گرفتن مواردی مانند یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی مقدار ضریب نفوذپذیری بتن را اندازه‌گیری نماید. همچنین شرایط حاد محیطی مانند چرخه‌های مختلف یخ‌زدن و آب شدن دارای تاثیر منفی روی بتن و بخصوص بر سطح بتن می‌باشد. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال که توسط بنوایت ماندلبرات ارائه شده است، برای تعریف ساختار منافذ مواد سیمانی استفاده گردیده است. در این مقاله تئوری پیشنهادی جهت اندازه‌گیری نرخ نفوذ و ضریب نفوذپذیری بر اساس قوانین فراکتال ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از آزمون‌های "کشیدن از سطح" و "محفظه استوانه‌ای" رابطه بین مقاومت سطحی بتن با نفوذپذیری آن در شرایط یخ‌زدن و آب شدن مورد بررسی قرار گرفته است که ضریب تعیین این رابطه برابر با ۸۵ درصد به دست آمده است. نفوذپذیری و کاهش مقاومت سطحی بتن تحت ۱۲۰ چرخه حاد یخ‌زدن و آب شدن در سن ۱۲۰ روز به ترتیب ۲/۵ برابر و ۱۳/۴ درصد افزایش داشته است. در کل با توجه به نتایج حاصله، دقت بالای تئوری مذکور جهت اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در سنین مختلف مشاهده گردید. همچنین ضریب همبستگی بالا بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری بدست آمده به گونه‌ای که اختلاف نتایج بین نرخ نفوذ و ضریب نفوذپذیری کمتر از ۱۰ درصد به دست آمده است.

### کلمات کلیدی

کشیدن از سطح  
محفظه استوانه‌ای  
شرایط حاد  
ضریب نفوذپذیری

### ۱- مقدمه

اهمیت می‌باشد. همچنین مقدار نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد مانند دماهای بالا [1] فشار آب زیاد [2]، یخ‌زدن و آب شدن مداوم [3] حمله کلریدها [4]، حمله سولفات‌ها [5] می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این نفوذپذیری سطحی بتن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کوتاه مدت و بلند مدت آن دارد [6]. نفوذپذیری بتن اهمیت بسیار زیادی برای مقاومت در برابر تاثیرات خارجی دارد.

در طراحی سازه‌های مختلف بتنی علاوه بر مقاومت مورد نیاز، دوام بتن نیز می‌بایست مد نظر 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 آسیب رسان به داخل بتن و کاهش دوام آن، اطلاع از مقدار نفوذپذیری بتن بسیار با

\* رایانامه نویسنده مسئول: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir - ORCID: 0000-0003-0921-6484

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



مواد شیمیایی آسیب رسان از طریق ترک‌ها و شکاف‌ها در ساختار بتن نفوذ کرده و منجر به واکنش فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌شوند، این امر باعث اختلال در ساختار بتن می‌شود [7]. با این حال، نفوذپذیری بتن به عنوان یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر دوام و عملکرد سازه‌های بتنی شناخته شده است.

بتنی که در معرض چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن قرار دارد، با دو نوع آسیب مستقل روبرو می‌شود: آسیب‌های داخلی و آسیب‌های خارجی [8]. آسیب‌های داخلی باعث ایجاد ترک‌های ریز در خمیر سیمان می‌شود و همچنین تغییر در خواص بتن مانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن می‌شود [9-12]. آسیب‌های خارجی عبارت است از پوسته شدن سطح بتن که معمولاً توسط نمک‌های یخ‌زدایی به وجود می‌آید. بطور کلی، خواص مکانیکی بتن تحت تأثیر آسیب‌های خارجی قرار نمی‌گیرد [8]. چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن علاوه بر آسیب به خواص مکانیکی بتن، تأثیر منفی بر دوام بتن گذاشته و باعث تخریب آن می‌شود [13-18]. بتنی که در معرض آسیب یخ‌زدن و آب شدن قرار گرفته باشد، مقدار نفوذ کلرید در آن نسبت به بتنی که در این معرض قرار نگرفته است، بیشتر می‌شود [16]. بطور کلی، افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن باعث افزایش عمق نفوذ کلرید در بتن می‌شود [17-19].

در هندسه سستی اقلیدسی، برای تعریف ابعاد، از اعداد صحیح استفاده می‌شود. اما تعریف ساختار منافذ توسط روابط اقلیدسی چندان نزدیک به واقعیت نمی‌باشد. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال که توسط بنوایت ماندلبرات [20] ارائه شده است، برای تعریف ساختار منافذ مواد سیمانی استفاده گردیده است. موارد مذکور در مطالعات پژوهشگران مختلفی بکار رفته است [21]. حجم، شکل و مساحت منافذ بتن دارای مشخصات فراکتالی می‌باشند که مرتبط با ویژگی‌های ماکروسکوپی آن هستند [22]. ساختار موجود در منافذ بتن نیز بسیار پیچیده بوده و تنها با پارامترهایی مانند تخلخل و توزیع قطر قابل بررسی نمی‌باشند [23-24]. اما با استفاده از تئوری فراکتال می‌توان پیچیدگی موجود در ساختار منافذ بتن را اندازه‌گیری نمود [25]. زیرا تئوری فراکتال دارای یک ارتباط موثر با مساحت خاص سطحی منافذ و قطر بحرانی می‌باشد [26].

در استانداردهای رایج دنیا برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن

نیاز به گرفتن مغزه از سازه و آزمایش نمودن مغزه در آزمایشگاه می‌باشد. همچنین برای ارزیابی مقاومت بتن بصورت مستقیم، نیاز به آزمون‌های مخرب می‌باشد. آزمون‌های درجا نیز اغلب بصورت مستقیم قادر به اندازه‌گیری مقاومت بتن نبوده یا دارای دستگاه بسیار گران قیمتی می‌باشند. در این تحقیق برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن از آزمون نوین "محفظه استوانه‌ای" استفاده شده است [27]. آزمون فوق دارای کاربرد وسیع، بسیار ساده، ارزان و قابلیت استفاده بصورت درجا می‌باشد [28]. در تحقیقی جهت صحت‌سنجی آزمون "محفظه استوانه‌ای" مقایسه‌ای بین نتایج این آزمون با استاندارد بریتانیا [29] انجام پذیرفت که همبستگی بالای ۹۵ درصد بین نتایج حاصل شد [30]. یکی از روش‌های درجا جهت اندازه‌گیری مقاومت سطحی بتن، آزمون کشیدن از سطح [31] می‌باشد. تحقیقات گذشته بیانگر دقت مناسب این آزمون برای ارزیابی مقاومت سطحی بتن بصورت درجا می‌باشد [32].

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن از یک مدل تئوری جدید استفاده شده است. بر خلاف مدل‌های قبلی، مدل استفاده شده در این تحقیق قابلیت در نظر گرفتن سن عمل‌آوری بتن در مقدار نفوذپذیری را دارا می‌باشد. با بسط مدل مذکور، یک مدل تئوری جدید ارائه شده است که با استفاده از پیچیدگی‌های مسیرهای جریان و مساحت سطحی منافذ، ضریب نفوذپذیری بتن تعیین شده است. همچنین رابطه بین مقدار مقاومت و نفوذپذیری بتن تحت شرایط یخ‌زدن و آب شدن ارائه گردیده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی و تئوری

### ۲-۱- مصالح مصرفی

از سیمان پرتلند تیپ ۲ برای ساخت بتن‌ها استفاده شده است. آب مورد استفاده نیز آب آشامیدنی شهری می‌باشد. مقدار چگالی سنگدانه‌های شن و ماسه به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد [33-34]. دانه‌بندی شن و ماسه نیز بر اساس استاندارد ASTM-C136 انجام پذیرفت [35]. چسب مخصوص مورد استفاده نیز از نوع رزین اپوکسی می‌باشد که ویژگی‌های آن در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات چسب مصرفی

Table 1: Specifications of used glue

| Strenght (MPa) | Time to stick | Color | Mix ratio |
|----------------|---------------|-------|-----------|
| 70             | 90 Min        | Gray  | 1-1       |



شکل ۱. آزمون کشیدن از سطح

Fig. 1. pull-off test

### ۲-۳- آزمون "محفظه استوانه‌ای"

طبق شکل (۲-الف) ابتدا یک صفحه فولادی روی نمونه بتنی چسبانده می‌شود. سپس دستگاه محفظه استوانه‌ای بر صفحه فولادی نصب شده و پر از آب می‌شود (شکل ۲-ب). سپس اهرم دستی را چرخانده تا فشار وارده برابر ۵ بار شود.

### ۲-۴- چرخه یخ‌زدن و آب شدن

چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن بر اساس استاندارد ASTM C666-B [37] انجام پذیرفته است. طبق استاندارد مذکور، آب شدن نمونه‌های بتنی باید در آب صورت پذیرد و یخ‌زدن آن‌ها در هوا انجام شود. نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد یخ‌زده و سپس برای مدت ۵۰ دقیقه در آب با دمای ۴ درجه سانتیگراد آب می‌شوند. تعداد چرخه‌ها به ترتیب ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ می‌باشند. نمونه‌ها بعد از انجام چرخه‌های مورد نظر، با استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" تحت آزمایش نفوذپذیری قرار گرفته‌اند.

### ۲-۵- مدل فراکتال

مطابق شکل (۳) محیط متخلخل موجود در بتن که حاوی منافذ مختلفی است را می‌توان به صورت مویرگی‌های منحنی فرض نمود. مقدار نفوذ آب در بتن را می‌توان با استفاده از مدل فراکتال محاسبه نمود. طول نمونه برابر  $L_0$  (mm)، قطر منفذ در محیط متخلخل برابر  $\gamma$  (mm)، نرخ جریان برابر  $Q$  ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) و مساحت محیط متخلخل برابر  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) می‌باشد [38]. محیط متخلخل در واقع یکنواخت نیست. وقتی که سیال در یک محیط متخلخل جریان دارد، مسیر جریان به صورت منحنی است [39].

در تحقیق انجام شده توسط گزو و یو [40] برای بررسی نفوذپذیری محیط متخلخل از یک مدل جدید بر اساس مشخصات هندسی فراکتال استفاده نموده‌اند که از تخلخل محیط مربوطه و قطر حداکثر منفذ تشکیل شده است. مدل مورد نظر (رابطه ۱) با مدل کازنی-کارمن (رابطه ۲) [41-42] نیز مقایسه شده که نتایج حاصل از مدل پژوهشگران گزو و یو با در نظر گرفتن

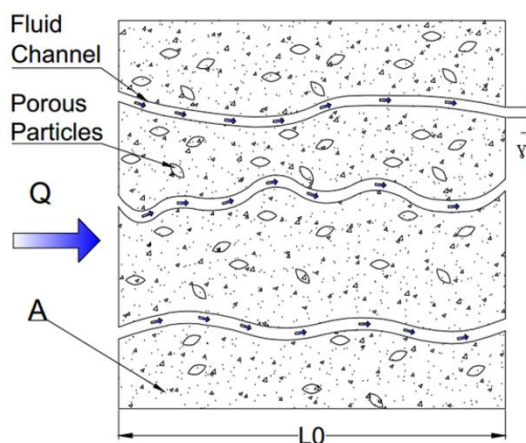


ب) نصب دستگاه

الف) صفحه فولادی

شکل ۲. آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 2. Cylindrical chamber test



شکل ۳. کانال‌های مویرگی در محیط متخلخل

Fig. 3. Capillary channels in porous medium

### ۲-۲- آزمایش "کشیدن از سطح"

روش کشیدن از سطح از روش‌های نیمه مخرب محسوب می‌شود

می‌بیند و آب منجمد نشده‌ی منفذ، به ترک‌های میکرو نفوذ نموده و منجر به شکست انبساطی بیشتر می‌شود [43]. آب منفذی از سطح بتن شروع به انجماد می‌کند که باعث ایجاد فشار هیدرولیکی شده و آب منجمد نشده را در فضای خالی فشرده می‌کند. هنگامی که تنش کششی روی دیوار منفذ از مقاومت کششی نهایی بیشتر شود، ساختار منفذ پاره شده و ترک ایجاد می‌شود [44].

### ۳-۲- حجم نفوذ حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" در

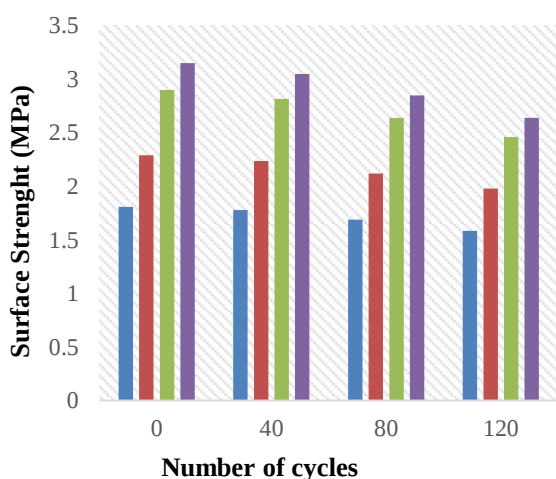
#### چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن، حجم نفوذ نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در مقایسه حجم نفوذ بتن معمولی با بتن قرار گرفته در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن، تحت تأثیر چرخه‌های مختلف به صورت کلی افزایش در حجم نفوذ مشاهده شده است. این افزایش حجم نفوذ در سن ۷ روزه تحت چرخه‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۱/۴۴، ۱/۱۵ و ۱/۵۹ برابر، در سن ۲۸ روزه به میزان ۱/۴۲، ۱/۱۵ و ۱/۵۸ برابر، در سن ۹۰ روزه به میزان ۱/۱۸، ۱/۴ و ۱/۷۲ برابر و در سن ۱۲۰ روزه به میزان ۱/۳۲، ۱/۷۲ و ۲/۱۴ برابر به دست آمده است.

جدول ۲. نسبت‌های مخلوط (kg/m<sup>3</sup>)

Table 2. Mixing plan (kg/m<sup>3</sup>)

| Water | Sand  | Gravel | Cement | W/C | Strenght (MPa) |
|-------|-------|--------|--------|-----|----------------|
| 206   | 863.6 | 686.83 | 415    | 0.5 | 30             |



شکل ۴. تغییر مقاومت سطحی در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

آبی=۷ روز . قرمز=۲۸ روز . سبز=۹۰ روز . بنفش=۱۲۰ روز

Fig. 4. Change of surface strength in freeze-thaw cycles

ابعاد فراکتالی، تخلخل و حداکثر قطر منفذ نسبت به مدل کازنی-کارمن دارای دقت بیشتر می‌باشد.

$$K = \frac{\pi D_f^{(1-D_t)/2} \times [4 \times (2 - D_f)]^{\frac{1+D_t}{2}}}{128 \times (3 + D_t - D_f)} \quad (1)$$

$$\times \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{(1+D_t)/2} \times \lambda_{max}^2$$

$$K = \frac{d_c^2 \times \phi^3}{16c \times (1-\phi)^2} \quad (2)$$

در روابط فوق  $\lambda_{max}$  بیشترین قطر منفذ،  $\phi$  تخلخل محیط مورد نظر،  $d$  قطر منفذ،  $c$  ضریب تجربی،  $D_f$  ابعاد مساحت سطح منافذ فراکتالی و  $D_t$  پیچیدگی کانال‌های مویینگی می‌باشد.

### ۲-۶- ساخت نمونه‌ها

با عنایت به اینکه بتن بکار رفته در بیشتر سازه‌های معمولی دارای مقاومت فشاری حدود ۳۰ مگاپاسکال هستند پس در این تحقیق از طرح مخلوط نشان داده شده در جدول (۲) استفاده شده است. برای انجام آزمایش "کشیدن از سطح" و "محفظه استوانه‌ای"، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها در سنین مختلف از ۷ الی ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

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

#### ۳-۱- مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح در

##### چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شده

مقادیر مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی در اثر چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن در شکل (۴) قابل مشاهده است. نمونه‌ها در سنین مختلف (۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه) و چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن (چرخه‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰) قرار گرفته‌اند. با افزایش تعداد این چرخه‌ها، مقاومت سطحی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت سطحی در سن ۷ روزه برای چرخه‌های فوق به ترتیب به میزان ۱/۷، ۶/۶ و ۱۰/۹ درصد، در سن ۲۸ روزه به ترتیب به میزان ۲/۴، ۷/۴ و ۱۱/۴ درصد، در سن ۹۰ روزه به ترتیب به میزان ۲/۹، ۹ و ۱۲/۶ درصد و در سن ۱۲۰ روزه به ترتیب به میزان ۳/۲، ۹/۵ و ۱۳/۴ درصد می‌باشد. علت کاهش مقاومت سطحی در چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن این است که کریستال‌های یخ، تمایل دارند به سمت فشار پائین، رشد کنند. در این صورت دیوار جانبی توسط فشار کریستالیزاسیون آسیب

افزایش حجم باعث آسیب بتن در اثر تنش تبلور می‌شود. فشار تبلور یک پدیده رایج یخ‌زدگی در طبیعت است. کریستال‌ها به سمت دیوار منفذ که دارای انحنای مختلف است رشد می‌کنند [46]. هنگام یخ‌زدن 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 می‌شود [47].

### ۳-۳- نتایج آزمون جیوه و استخراج مدل جدید فراکتال

با استفاده از آزمون جیوه، حجم کل منافذ در سنین مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است.

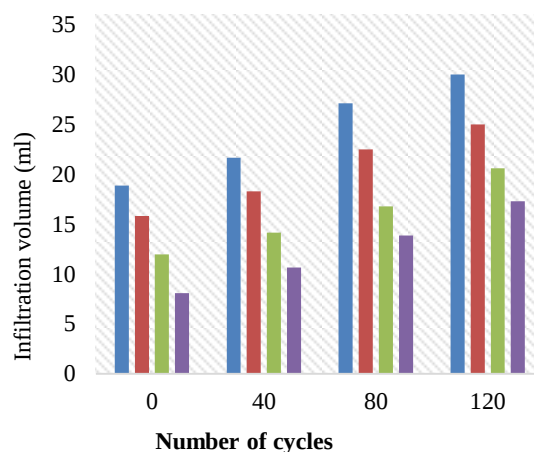
با استفاده از آزمایش جیوه می‌توان مشخصه‌های بیشتری از ساختار منافذ را به دست آورد، مانند تخلخل، سطح کل منافذ و متوسط قطر منافذ. این مشخصات در جدول (۲) نیز خلاصه شده است. با استفاده از حجم کل منافذ و مساحت سطح خاص منافذ و جایگذاری آن در رابطه ۳، قطر متوسط منافذ به دست می‌آید [48].

$$d_{av} = \frac{4 \times V}{A} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $d_{av}$  قطر متوسط منافذ (نانومتر)،  $V$  حجم کل منافذ (میلی‌متر مکعب برگرم) و  $A$  مساحت سطح خاص منافذ (مترمربع برگرم) است.

با توجه به جدول (۳)، 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 [48].

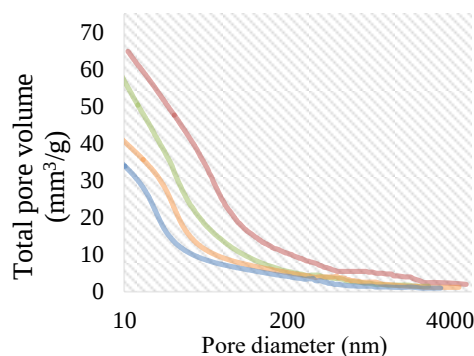
با توجه به تحقیقات پیشین و آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شده است که با افزایش سن عمل‌آوری در ریز ساختار منافذ بتن، تغییر به وجود می‌آید که علت این تغییر پیشرفت واکنش هیدراسیون سیمان است. این پیشرفت باعث کاهش اندازه منافذ می‌شود، زیرا محصولات واکنش ذکر شده به تدریج خلل و فرج را پر می‌کنند [43، 48]. سپس با استفاده از اندازه‌های قطر متوسط منافذ، اقدام به قرار دادن آن در نمودار دو بعدی  $x$  و  $y$  می‌شود. به گونه‌ای که در جهت  $x$ ، سن عمل‌آوری بر اساس روز و در جهت  $y$  قطر متوسط منافذ جایگذاری می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی در



شکل ۵. تغییر حجم نفوذ آب در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

آبی=۷ روز . قرمز=۲۸ روز . سبز=۹۰ روز . بنفش=۱۲۰ روز

Fig. 5. Change of water infiltration volume in freeze-thaw cycles



شکل ۶. توزیع منافذ و حجم منافذ در سنین مختلف

بنفش=۷ روز . سبز=۲۸ روز . نارنجی=۹۰ روز . آبی=۱۲۰ روز

Fig. 6. Pore distribution and pore volume in different treatments

جدول ۳. مشخصات منافذ در سنین مختلف

Table 3. Characteristics of pores at different ages

| Curing (Day) | Total pore volume (mm <sup>3</sup> /g) | Specific surface area of pores (m <sup>2</sup> /g) | Medium diameter (nm) | Porosity (%) |
|--------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| 7            | 67                                     | 5.3                                                | 50.6                 | 18.4         |
| 28           | 58                                     | 5.9                                                | 39.3                 | 16.86        |
| 90           | 41                                     | 6.2                                                | 26.5                 | 13.3         |
| 120          | 35                                     | 6.1                                                | 23                   | 11.24        |

دلیل افزایش حجم نفوذ در چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن، به وجود آمدن آسیب در داخل بتن است. در مورد این آسیب می‌توان گفت که سازوکار آسیب بتن در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن ناشی از یخ‌زدن آب در داخل یا روی سطح بتن می‌باشد [45]. وقتی آب به یخ تبدیل می‌شود حجم آن ۹ درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که آب در منافذ بتن تبدیل به یخ شود، این

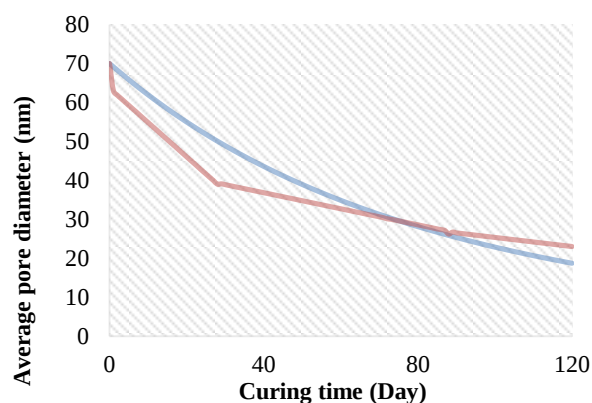
$$D_f = D_e - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left( \frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}} \right)} \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $D_e$  بعد هندسی اقلیدسی است که در فضای دو بعدی مقدار آن برابر ۲ و در فضای سه بعدی مقدار آن مساوی با ۳ است [52]. همچنین  $\varepsilon$  مقدار تخلخل بتن (۰/۱۵) است که در آزمایش جیوه به دست آمده است.  $\gamma_{\max}$  و  $\gamma_{\min}$  نیز بیشترین و کمترین قطر منافذ است که بیشترین آن برابر با ۷۰ 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 ۵ نانومتر است [26].

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. ویتکرافت و همکاران [53] برای دریافت  $L_t$  از قانون فراکتال رابطه ۱۰ استفاده نمودند؛

$$L_t(\gamma) = L_0^{D_t} \times \gamma^{1-D_t} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $D_t$  اندازه بُعد پیچیدگی را نشان می‌دهد که به معنای بُعد پیچ خوردگی مسیر مویرگی در هنگام عبور سیال از ساختار متخلخل است. هنگامی که  $D_t = 1$  باشد نشان دهنده یک مسیر مویرگی مستقیم است و  $D_t$  بزرگتر از آن مربوط به یک مسیر مویرگی منحنی است. برای محاسبه  $D_t$  از رابطه ۱۱ استفاده شده است [53].



شکل ۷. کاهش قطر منافذ با افزایش سن  
آبی=نتایج تئوری. بنفش = نتایج آزمایشگاهی

Fig. 7. Reduction of pore diameter with increasing age

فضای متلب طبق روند فوق ترسیم می‌شود. سپس یک نمودار معادل، با نمودار داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب رسم شد که باعث حصول رابطه ۴ و نمودار شکل (۷) شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری، قطر متوسط منافذ کاهش می‌یابد. پس افزایش سن به معنای افزایش مقاومت، کاهش منافذ و کاهش نفوذپذیری است. رابطه ۵ که بر اساس تغییر رابطه ۴ به دست آمده است، رابطه‌ی مهمی است که در محاسبات استخراج مدل جدید فراکتال استفاده می‌شود.

$$\gamma = \gamma_{\max} \times C^{a \times t} \quad (4)$$

$$\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} = C^{-a \times t} \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $a$  ضریب زمان است که بر اساس رابطه ۶ حاصل می‌شود و  $t$  سن عمل‌آوری (روز) و  $C$  قاعده تابع نمایی که مقدار آن برابر ۲ است. تعیین مقدار  $C$  و مقدار  $a$  بر این اساس است که منحنی تئوری، متناظر منحنی داده‌های آزمایشگاهی بوده و مقدار  $\gamma_{\max}$  نیز برابر حداکثر قطر متوسط که برابر با ۷۰ نانومتر است می‌باشد.

$$a = \frac{16.01}{t - 1000} \quad (6)$$

در سال ۲۰۰۲ گزو و یو [40] برای اندازه‌گیری توزیع منافذ در محیط متخلخل با استفاده از قانون مقیاس بندی فراکتال، از رابطه ۷ استفاده نمودند [49]. ویژگی‌های فراکتالی توزیع اندازه منافذ، بیشتر در منافذ مویرگی بزرگ به عنوان عامل موثر عمل می‌نمایند. در همین حال، ویژگی‌های پیچیدگی در ناحیه منافذ کوچک ژل و ناحیه‌ی منافذ کوچک مویرگی دارای نقش موثر می‌باشند [50].

$$N(L \geq \gamma) = \left( \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \right)^{D_f} \quad (7)$$

در رابطه ۷،  $N$  تعداد منافذ،  $D_f$  بعد فراکتال و  $\gamma$  قطر منفذ است؛ پس برای دریافت تعداد منافذ از قانون مقیاس بندی فراکتال (رابطه ۷) استفاده شده است و این رابطه با توجه به رابطه ۵ تبدیل به رابطه‌ی ۸ شده است. به طوری که در رابطه ۵ مقیاس  $\gamma_{\max}/\gamma$  به مقیاس جدیدی که مساوی با  $C^{-at}$  است تغییر یافته است و رابطه به شکل رابطه ۸ نشان داده می‌شود.

$$N(t) = (C^{-a \times t})^{D_f} = 2^{\frac{-16.01 \times t \times D_f}{t - 1000}} \quad (8)$$

همچنین برای محاسبه بعد فراکتال مساحت سطحی  $D_f$  از رابطه ۹ استفاده می‌شود [51].

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

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

$$-\frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t} (3 + D_t - D_f)} - 9 \quad (18)$$

اکنون، با استفاده از نرخ جریان، می‌توان ضریب نفوذپذیری را

که در رابطه ۱۹ نشان داده شده است محاسبه کرد [56].

$$K = \frac{\mu \times L_0 \times Q}{A \times P} \quad (19)$$

در رابطه ۱۹،  $L_0$  طول نمونه و  $A$  مساحت مورد نظر (میلی متر

مربع)، در نمونه است. با جایگذاری رابطه ۱۸ به جای عبارت ( $Q$ )

در رابطه ۱۹، رابطه ۲۰ بدست می‌آید. پس از ساده‌سازی این رابطه،

رابطه نهایی ضریب نفوذپذیری بدست می‌آید. بر اساس تغییرات

زمان می‌توان ضریب نفوذپذیری ( $K$ ) را با بکارگیری مدل جدید

محاسبه نمود.

$$-\frac{\pi \times D_f \times L_0^{1-D_t} \times \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \times A \times (3 + D_t - D_f)} - \frac{9 \times \mu \times L_0}{A \times P} \quad (20)$$

به عنوان نمونه، نرخ جریان و ضریب نفوذپذیری برای بتن

عمل‌آوری شده در ۲۸ روز محاسبه شده است. ابتدا پارامترهایی که

در محاسبه نرخ جریان، ضریب نفوذپذیری و عمق نفوذ استفاده

می‌شود، در جدول (۴) معرفی شده است.

با جایگذاری اعداد جدول (۳) در روابط ۱۸ و ۲۰ داریم:

$$Q(28) = \frac{\pi}{128} \frac{0.5 \times 1.5 \times (0.00007)^{4.084}}{150^{1.084} \times 8.9 \times 10^{-10} \times (3 + 1.084 - 1.28)}$$

جدول ۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده

Table 4. Values of used parameters

| parameter         | amount        | Unit            |
|-------------------|---------------|-----------------|
| $D_e$             | 2             |                 |
| $\varepsilon$     | 0.15          |                 |
| $\lambda_{\min}$  | 0.00000227    | mm              |
| $D_f$             | 1.28          |                 |
| $D_t$             | 1.084         |                 |
| $\gamma_{\max-a}$ | 0.00007       | mm              |
| $\mu$             | 0.00000000089 | MPa.s           |
| $p$               | 0.5           | MPa             |
| $A$               | 4418          | mm <sup>2</sup> |
| $L_0$             | 150           | mm              |
| $\pi$             | 3.14          |                 |

$$D_t = 1 + \frac{\ln \bar{\gamma}}{\ln \left( \frac{L_0}{\bar{\gamma}} \right)} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱،  $\bar{\gamma}$  قطر متوسط (نانومتر) و  $\bar{\gamma}$  متوسط پیچیدگی

است [54].

در این تحقیق برای اندازه‌گیری طول پیچیده‌گی کانال مویرگی

بتن از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود اما به جای  $\gamma$  از مقدار رابطه ۵

استفاده شده که رابطه‌ی جدید ۱۲ به دست آمده است.

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

با مشتق‌گیری از رابطه ۸، نرخ تغییرات تعداد منافذ  $dN$  را

می‌توان به صورت رابطه ۱۳ به دست آورد.

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

نرخ جریان سیال، در یک کانال مویرگی را می‌توان بر اساس

رابطه اصلاح شده هاگن پوازی به دست آورد (رابطه ۱۴) [55].

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

$$K(t) = \frac{\pi \times D_f \times L_0^{1-D_t} \times \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \times A \times (3 + D_t - D_f)} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)}$$

در رابطه ۱۴،  $P$  فشار سیال (مگاپاسکال) و  $\mu$  ضریب

ویسکوزیته (مگاپاسکال ثانیه) است. با استفاده از روابط ۵ و ۱۲

می‌توان قطر متوسط و طول پیچیدگی جدید را در رابطه ۱۴

جایگذاری نمود که پس از ساده سازی، رابطه ۱۵ حاصل می‌شود؛

این رابطه شکل جدید رابطه هاگن پوازی می‌باشد.

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

با استفاده از نرخ جریان حجمی یک کانال، نرخ کل جریان از

محیط متخلخل را می‌توان با انتگرال‌گیری رابطه‌ی ۱۶ محاسبه

نمود؛ پس از محاسبه ثابت انتگرال (رابطه ۱۷)، حالت نهایی رابطه

نرخ جریان در رابطه ۱۸ داده شده است که با بکارگیری این رابطه

می‌توان نرخ جریان را برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری حساب

نمود.

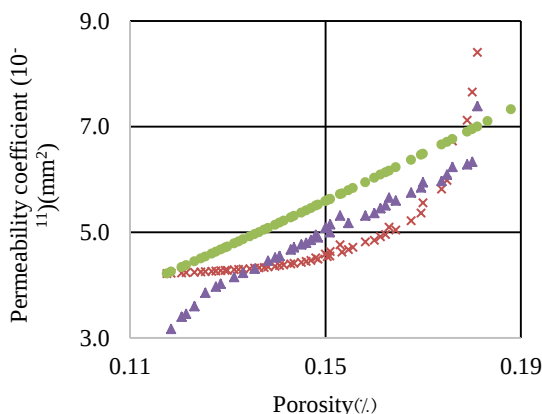
$$Q(t) = \int q(t) dN(t) \quad (16)$$

نفوذپذیری را محاسبه نمود. با توجه به نمودار همبستگی مشاهده می شود که مقدار آن نزدیک به نتایج آزمایشی می باشد. علاوه بر این موقعیت این نمودار به طور تقریبی بین نتایج مدل جدید فراکتال و نتایج مدل گزو و یو قرار دارد که می توان از نتایج آن به عنوان نتایج بهینه استفاده نمود. با بررسی نتایج، مشاهده می شود که افزایش تخلخل منجر به افزایش مقادیر نفوذپذیری می شود. این امر به دلیل افزایش تعداد منافذ نفوذپذیر و ایجاد کانال های بیشتر موئینگی بتن است که نقش مهمی در افزایش نفوذپذیری ایفا می کنند. بین مقادیر ضریب نفوذپذیری و مقادیر تخلخل رابطه مستقیم برقرار است که نمودار مورد نظر در شکل (۹) این موضوع را به خوبی نشان می دهد.

جدول ۵. مقایسه مقادیر ضریب نفوذپذیری در سنین مختلف

Table 5. Comparison of permeability coefficient values at different ages

| Curing (Day) | permeability coefficient (mm <sup>2</sup> ) |                                           | Percentage difference (%) |
|--------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
|              | Theoretical results<br>× 10 <sup>-11</sup>  | Laboratory results<br>× 10 <sup>-11</sup> |                           |
| 7            | 6.22                                        | 6.33                                      | 1.74                      |
| 9            | 5.67                                        | 6.24                                      | 9.13                      |
| 14           | 4.98                                        | 5.99                                      | 16.86                     |
| 21           | 4.55                                        | 5.65                                      | 19.48                     |
| 28           | 4.34                                        | 5.36                                      | 19.01                     |
| 41           | 4.14                                        | 5.04                                      | 17.86                     |
| 54           | 4.03                                        | 4.77                                      | 15.51                     |
| 67           | 3.98                                        | 4.5                                       | 11.78                     |
| 80           | 3.92                                        | 4.23                                      | 7.33                      |
| 90           | 3.9                                         | 4.02                                      | 2.99                      |



شکل ۸. نتایج مدل های مختلف

آبی=نتایج آزمایشها، سبز=مدل گزو و یو، قرمز=مدل فراکتال

Fig. 8. Results of different models

$$2^{\left(\frac{16.01 \times 2419200(3+1.084-1.28)}{2419200-1000}\right)} - \frac{\pi}{128} \frac{0.5 \times 1.5 \times 0.00007^{4.084}}{150^{1.084} \times 8.9 \times 10^{-10} \times (3+1.084-1.28)} - 9 = 0.792 \frac{mm^3}{s}$$

$$K(28) = \frac{\pi}{128} \frac{1.28 \times 150^{(1-1.084)} \times (0.00007)^{4.084}}{4418 \times (3+1.084-1.28)}$$

$$2^{\left(\frac{16.01 \times 2419200(3+1.084-1.28)}{2419200-1000}\right)} - \frac{\pi}{128} \frac{1.28 \times 150^{(1-1.084)} \times (0.00007)^{4.084}}{4418 \times (3+1.084-1.28)} - \frac{9 \times 8.9 \times 10^{(-10)} \times 150}{4418 \times 0.5} = 4.78 \times 10^{-11} mm^2$$

در تحقیق دیگر [57]، مشاهده شده است که ضریب نفوذپذیری برای عمل آوری ۲۸ روزه برابر با  $4.2 \times 10^{-11}$  (میلی متر مربع) است و در این تحقیق نیز برابر با  $4.78 \times 10^{-11}$  (میلی متر مربع) به دست آمده که اختلاف نتایج بسیار اندک می باشد که نشان از دقت نتایج دارد.

### ۴-۳- مقایسه ضریب نفوذپذیری حاصل از مدل جدید فراکتال و آزمون "محفظه استوانه ای"

در جدول (۵) مقادیر ضریب نفوذپذیری در سنین مختلف برای نتایج تئوری و آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مشاهده می شود که، درصد اختلاف بین نتایج در عمل آوری های ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۹/۶ و ۶/۲۲ درصد است. وجود مقدار اندک اختلاف، نشان از دقت تئوری مذکور است.

### ۵-۳- درستی آزمایی و مقایسه نتایج مدل جدید فراکتال با مدل های موجود

در این بخش برای اطمینان از دقت نتایج بدست آمده، مقایسه نتایج آزمایش ها و مدل جدید فراکتال با نتایج مدل گزو و یو (رابطه ۱) در شکل (۸) قابل مشاهده است. در این نمودار، نتایج با الگوهای مختلف به منظور تفکیک آن ها ارائه شده اند.

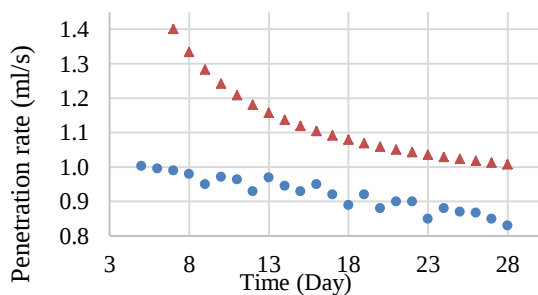
در شکل (۹)، نتایج بدست آمده برای بررسی رابطه همبستگی ارائه شده است. در رابطه همبستگی مشاهده می شود که بین نتایج رابطه درجه سه وجود دارد. همچنین با بکارگیری مقدار تخلخل و جایگذاری آن در رابطه همبستگی می توان مقدار ضریب

نتایج مدل‌های مختلف در جداول (۶ و ۷) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، می‌توان اظهار کرد که بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و همبستگی کم‌ترین میزان اختلاف وجود دارند. به همین ترتیب در مرحله بعدی، مقایسه بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج حاصل شده از مدل جدید فراکتال قرار دارند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل شده از رابطه همبستگی می‌تواند مقادیری با اختلاف تقریباً کم‌تر از ۵ درصد مقایسه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها ارائه دهند؛ پس این رابطه را می‌توان به عنوان رابطه بهینه در زمینه اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در نظر گرفت.

### ۳-۶- استفاده از مدل جدید فراکتال در نتایج دیگر محققان

در این قسمت، از مدل جدید فراکتال به منظور صحت و دقت آن در نتایج تحقیق یکی دیگر از محققین استفاده شده است [58]. نتایج تئوری و نتایج آزمایش‌ها در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج دیده می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری، در مقادیر نرخ نفوذ کاهش دیده می‌شود، زیرا پیشرفت هیدراسیون سیمان سبب افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری می‌گردد.

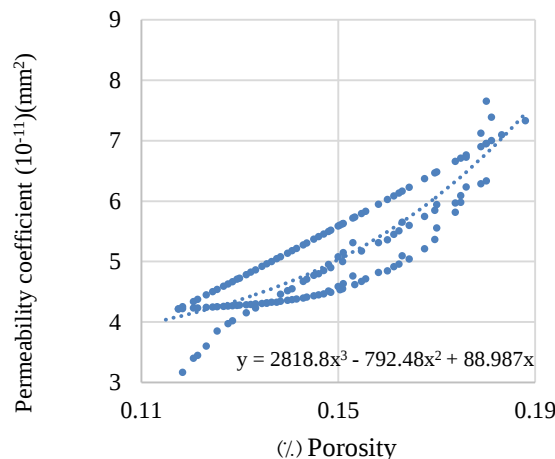
در شکل (۱۱)، نمودار همبستگی بدست آمده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیق مذکور و نتایج مدل جدید فراکتال نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که معادله توانی با ضریب تعیین بالای ۸۵ درصد بین نتایج آزمایش‌ها و نتایج تئوری وجود دارد.



شکل ۱۰: صحت سنجی معادله تئوری در تحقیق دیگر

قرمز= مقادیر تئوری . آبی=مقادیر آزمایشگاهی

Fig. 10. Verification of the theory equation in another research



شکل ۹. همبستگی بین نتایج مختلف

Fig. 9. Correlation between results

جدول ۶. مقادیر ضریب نفوذپذیری در نتایج مختلف

Table 6. Values of permeability coefficient in different results

| Porosity | permeability coefficient (mm <sup>2</sup> ) |                                          |                           |
|----------|---------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|
|          | Optimal results (10 <sup>-11</sup> )        | Theoretical results (10 <sup>-11</sup> ) | Percentage difference (%) |
| 0.179    | 6.78                                        | 7.1                                      | 4.57                      |
| 0.177    | 6.61                                        | 6.42                                     | 2.93                      |
| 0.175    | 6.46                                        | 5.98                                     | 7.95                      |
| 0.17     | 6.11                                        | 5.56                                     | 9.84                      |
| 0.169    | 6.01                                        | 5.3                                      | 13.47                     |
| 0.164    | 5.75                                        | 5.04                                     | 14.13                     |
| 0.161    | 5.57                                        | 4.92                                     | 13.24                     |
| 0.157    | 5.35                                        | 4.8                                      | 11.36                     |
| 0.151    | 5.06                                        | 4.6                                      | 10.01                     |
| 0.145    | 4.81                                        | 4.42                                     | 8.78                      |
| 0.139    | 4.61                                        | 4.35                                     | 5.98                      |
| 0.133    | 4.44                                        | 4.3                                      | 3.15                      |
| 0.128    | 4.32                                        | 4.32                                     | 0                         |

جدول ۷. مقادیر پارامترهای استفاده شده

Table 7. Values of used parameters

| Optimal results (10 <sup>-11</sup> ) | permeability coefficient (mm <sup>2</sup> ) |                           |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
|                                      | Laboratory results × 10 <sup>-11</sup>      | Percentage difference (%) |
| 6.78                                 | 6.33                                        | 7.04                      |
| 6.61                                 | 6.24                                        | 5.9                       |
| 6.46                                 | 6.13                                        | 5.31                      |
| 6.11                                 | 6                                           | 1.78                      |
| 6.01                                 | 5.85                                        | 2.8                       |
| 5.75                                 | 5.65                                        | 1.8                       |
| 5.57                                 | 5.51                                        | 1.12                      |
| 5.35                                 | 5.31                                        | 0.66                      |
| 5.06                                 | 5.04                                        | 0.41                      |
| 4.81                                 | 4.77                                        | 0.8                       |
| 4.61                                 | 4.5                                         | 2.45                      |
| 4.44                                 | 4.23                                        | 4.86                      |
| 4.32                                 | 4.32                                        | 4.02                      |

مقایسه‌ای انجام شده بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با

## ۴- نتیجه گیری

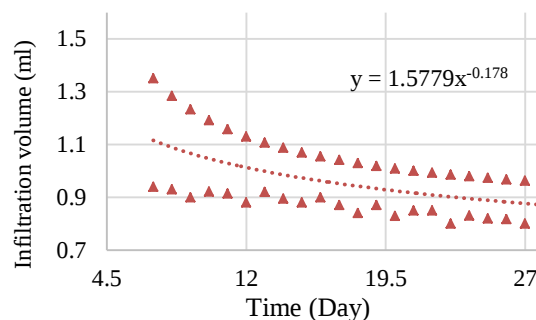
- رابطه معکوسی بین ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح مشاهده شد. با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی و ضریب نفوذپذیری یک رابطه خطی با ضریب شدت ۹۲ درصد بدست آمد.
- با بسط تئوری فراکتال، مدل جدیدی ارائه شد که ضمن در نظر گرفتن آثار سن عمل آوری، قابلیت اندازه گیری ضریب نفوذپذیری بتن را با دقت بالایی دارا می باشد.
- اختلاف ضریب نفوذپذیری حاصل از مدل جدیدی و نتایج آزمایشگاهی در سن ۹۰ روز حدود ۶ درصد می باشد که نشان از دقت بالای مدل مذکور می باشد.
- با توجه به نتایج آزمون جیوه برای بتن در سنین مختلف مشاهده شد که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل آوری کاهش می یابد.
- با افزایش تعداد چرخه های یخ زدن و آب شدن، مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح کاهش می یابد. این کاهش مقاومت سطحی در بتن با عمل آوری ۱۲۰ روزه برای چرخه های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۳/۲، ۹/۵ و ۱۳/۴ درصد می باشد.
- در مقایسه حجم نفوذ بتن معمولی با بتن قرار گرفته در چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن، تحت تأثیر چرخه های مختلف به صورت کلی افزایش حجم نفوذ آب به بتن مشاهده شده است. این افزایش حجم نفوذ در بتن با عمل آوری ۱۲۰ روزه برای چرخه های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۱/۳۲، ۱/۷۲ و ۲/۱۴ برابر به دست آمده است.
- با مقایسه نتایج مدل جدید فراکتال و مدل گزو و یو رابطه بهینه ای که قادر به ارائه نتایج دقیق در زمینه نفوذپذیری بتن است، بدست آمد.

## قدردانی نویسندگان

در انجام این پژوهش از سوی مراکز یا دانشگاه ها حمایتی صورت نگرفته است.

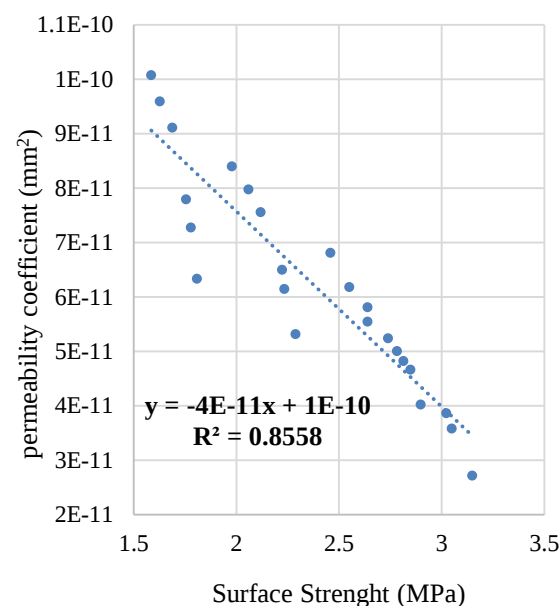
## تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن



شکل ۱۱. همبستگی بین نتایج مختلف

Fig. 11. Correlation between different results



شکل ۱۲. همبستگی بین مقاومت سطحی و ضریب نفوذپذیری نمونه ها در

چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن

Fig. 12. Correlation between surface resistance and permeability coefficient of samples in acute ice and ice melting cycles

## ۳-۷- بررسی همبستگی بین مقاومت سطحی و ضریب

## نفوذپذیری نمونه ها در چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن

با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی حاصل از روش کشیدن از سطح و ضریب نفوذپذیری یک رابطه خطی با ضریب شدت ۹۲ و ضریب تعیین ۸۵ درصد بدست آمده است. در این قسمت بین ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی یک رابطه ی معکوس برقرار است، به این دلیل که با افزایش مقاومت سطحی، ضریب نفوذپذیری کاهش می یابد و کانال های مویرگی بتن را کاهش می دهد. این حالت منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری می شود که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.

وجود ندارد.

## منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی شخص یا نهادهای استفاده

نشده است.

## سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

## References

- [1] Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H. and Cao, M., 2024. Multiscale cracking pattern-based homogenization model of water permeability in hybrid fiber-reinforced concrete after high-temperature exposure. *Journal of Building Engineering*, 84, p.108643.
- [2] Zhang, G., Zheng, H., Wei, X., Li, Z., Yan, Z. and Chen, X., 2024. Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure. *Developments in the Built Environment*, 17, p.100385.
- [3] Zeng, W., Wang, W., Pan, J. and Liu, G., 2023. Effect of steel fiber on the permeability of freeze-thaw damaged concrete under splitting tensile and compressive loads. *Journal of Building Engineering*, 80, p.108086.
- [4] Zeng, W., Zhao, X., Zou, B. and Chen, C., 2023. Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion. *Journal of Building Engineering*, 80, p.108042.
- [5] Zhang, J., Zhou, L., Nie, Q., Wu, H. and Wu, L., 2024. Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 411, p.134369.
- [6] Yang, J., Dong, Q., Chen, X., Shi, B. and Wang, X., 2024. Evaluation of concrete surface permeability: A dynamic water film-based approach. *Measurement*, 224, p.113863.
- [7] Yıldırım, M. and Özhan, H.B., 2023. Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 7(1), pp.48-59.
- [8] Powers, T.C., 1945, January. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 41, No. 1, pp. 245-272).
- [9] Tian, J., Wang, W. and Du, Y., 2016. Damage behaviors of self-compacting concrete and prediction model under coupling effect of salt freeze-thaw and flexural load. *Construction and Building Materials*, 119, pp.241-250.
- [10] Wang, B., Pan, J., Fang, R. and Wang, Q., 2020. Damage model of concrete subjected to coupling chemical attacks and freeze-thaw cycles in saline soil area. *Construction and Building Materials*, 242, p.118205.
- [11] Zhang, D., Mao, M., Zhang, S. and Yang, Q., 2019. Influence of stress damage and high temperature on the freeze-thaw resistance of concrete with fly ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 229, p.116845.
- [12] Qiu, W.L., Teng, F. and Pan, S.S., 2020. Damage constitutive model of concrete under repeated load after seawater freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 236, p.117560.
- [13] Ren, J. and Lai, Y., 2021. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack. *Cold Regions Science and Technology*, 188, p.103301.
- [14] Polat, R., Qarluq, A.W. and Karagöl, F., 2021. Influence of singular and binary nanomaterials on the physical, mechanical and durability properties of mortars subjected to elevated temperatures and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 295, p.123608.
- [15] Zhang, B., Yan, B. and Li, Y., 2023. Study on mechanical properties, freeze-thaw and chlorides penetration resistance of alkali activated granulated blast furnace slag-coal gangue concrete and its mechanism. *Construction and Building Materials*, 366, p.130218.
- [16] Jiang, W.Q., Shen, X.H., Xia, J., Mao, L.X., Yang, J. and Liu, Q.F., 2018. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete. *Construction and Building Materials*, 179, pp.553-565.
- [17] Li, L.J., Liu, Q.F., Tang, L., Hu, Z., Wen, Y. and Zhang, P., 2021. Chloride penetration in freeze-thaw induced cracking concrete: A numerical study. *Construction and Building Materials*, 302, p.124291.
- [18] Linjie, L.I. and Qingfeng, L.I.U., 2022. Numerical analysis on freezing rate and chloride transport in concrete subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 50(8), pp.2245-2256.
- [19] Zhang, M., Yang, L.M., Guo, J.J., Liu, W.L. and Chen, H.L., 2018. Mechanical properties and service life prediction of modified concrete attacked by sulfate corrosion. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), pp. 1-7.
- [20] Mandelbrot, B.B., 1982. The Fractal Geometry of Nature, New York. *Freeman WH*, 16, p.32.
- [21] Xuan, W., Chen, X., Yang, G., Dai, F. and Chen, Y., 2018. Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after

- exposure to high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 187, pp.222-236.
- [22] Zhang, B. and Li, S., 1995. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(4), pp.1383-1386.
- [23] Gao, Y., Jiang, J., De Schutter, G., Ye, G. and Sun, W., 2014. Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Construction and Building Materials*, 69, pp.253-261.
- [24] Chen, X., Zhou, J. and Ding, N., 2015. Fractal characterization of pore system evolution in cementitious materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, pp.719-724.
- [25] Ma, H., Sun, J., Wu, C., Yi, C. and Li, Y., 2020. Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars. *Materials*, 13(11), p.2442.
- [26] Han, X., Wang, B. and Feng, J., 2022. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP. *Construction and Building Materials*, 322, p.126504.
- [27] 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.
- [28] Naderi, M. and Kaboudan, A., 2021. Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, pp. 1-11.
- [29] BS EN 12390-8. 2009. Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure, British Standards Institution, London.
- [30] Naderi, M. and Kaboudan, A., 2020. Cylindrical Chamber: A new in situ method for measuring permeability of concrete with and without admixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3), pp.2225-2241
- [31] ASTM C1583/C1583M. 2013. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). *American Society for Testing and Materials*.
- [32] Pereira, E. and de Medeiros, M.H.F., 2012. Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5, pp.757-780.
- [33] ASTM C128-15 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [34] ASTM C127-15 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [35] ASTM C136-19 2019. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- [36] Giancaspro, J., Millman, L., Goolabsingh, R., MacDonald, K. and Yang, Q.D., 2014. *A Novel Bearing Swivel Joint and a Universal Joint for Concrete Pull-Off Testing Using a Material Testing Machine*. ASTM International.
- [37] ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates, 2008. *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. ASTM international.
- [38] Yu, B. and Li, J., 2001. Some fractal characters of porous media. *Fractals*, 9(03), pp.365-372.
- [39] Patro, D., Bhattacharyya, S. and Jayaram, V., 2007. Flow kinetics in porous ceramics: understanding with non-uniform capillary models. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(10), pp.3040-3046.
- [40] Xu, P. and Yu, B., 2008. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry. *Advances in water resources*, 31(1), pp.74-81.
- [41] Kozeny, J., 1927. Ueber kapillare leitung des wassers im boden. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, 136, p.271.
- [42] Carman, P.C., 1937. Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Eng. London*, 15, pp.150-156.
- [43] Corte, A.E., 1962. Vertical migration of particles in front of a moving freezing plane. *Journal of Geophysical Research*, 67(3), pp.1085-1090. <https://doi.org/10.1029/JZ067i003p01085>.
- [44] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P., 2010, June. A study of the behaviors of cement-based materials subject to freezing. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 1611-1616). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535987>.
- [45] Yuan, J., Du, Z., Wu, Y. and Xiao, F., 2019. Freezing-thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters. *Construction and Building Materials*, 204, pp.317-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.149>.
- [46] Özcan, F. and Koç, M.E., 2018. 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*, 187, pp.382-393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.183>.
- [47] Valenza II, J.J. and Scherer, G.W., 2007. A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cement and Concrete*

- Research, 37(7), pp.1022-1034. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.003>.
- [48] Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J. and Shi, C., 2023. Review on the characteristics and multi-factor model between pore structure with compressive strength of coral aggregate. *Construction and Building Materials*, 370, p.130326.
- [49] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P., 2010, June. A study of the behaviors of cement-based materials subject to freezing. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 1611-1616). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535987>.
- [50] 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).
- [51] 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/10.1142/S0218348X19400036>.
- [52] Kim, J. and Choi, S., 2023. Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 366, p.130157.
- [53] Xu, P., 2015. A discussion on fractal models for transport physics of porous media. *Fractals*, 23(03), p.1530001.
- [54] Wheatcraft, S.W. and Tyler, S.W., 1988. An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. *Water Resources Research*, 24(4), pp.566-578.
- [55] Liu, H., Xie, Z., Yu, R. and Zhang, N., 2022. A new three-dimensional fractal dimension model to describe the complexity of concrete pores. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(3), pp.127-138.
- [56] Torrent, R.J., Neves, R.D. and Imamoto, K.I., 2021. *Concrete permeability and durability performance: from theory to field applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429505652>.
- [57] Naderi, M., Kaboudan, A.R. and Amin Afshar, M., 2020. Studying the Strength and Diffusion and Permeability Coefficients of Concretes Containing Silica Fume, Fly Ash, Zeolite And Limestone Powder. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36(2.2), pp. 13-25.
- [58] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Naderi, M., Din, S. and Saberi Varzaneh, A., 2025. The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using "Cylindrical chamber" and "Pull-off" test methods. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.47-60.

DOI: 10.22034/25.3.5

