

Application of innovative tests of twist-off and cylindrical chamber and development of a new theoretical model to measure the rate of water penetration in concrete

Ali Saberi Varzaneh^{1*}, Mahmood Naderi², Sardarwali Din³

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

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

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

ABSTRACT

The mechanical characteristics and reliability of concrete are directly related to the structural characteristics of the microscopic pores of concrete. Considering that in Euclidean geometry, all dimensions are integers, therefore, the structure of microscopic pores cannot be defined by it. Therefore, in this article, passing the limitations such as one-dimensional and two-dimensional, etc., a new theory has been presented that expresses the real characteristics of complex systems. Dimension length of complexity and surface area of pores are important characteristics of the mentioned model. Also, by examining the valid international standards, it can be seen that laboratory devices are needed to measure the permeability of concrete and it is not possible to evaluate the permeability at the project site. For this reason, there is a need to introduce and use new and in-situ tests to measure the permeability and strength of concrete. In this article, to measure the rate of water penetration into concrete as well as the surface resistance of concrete, innovative and in-situ tests of cylindrical chamber and twist-off have been used. The devices related to the mentioned tests are very simple, repeatable and can be used at the project site. The results of the tests show the high accuracy of the introduced theoretical model for measuring the rate of water penetration in concrete. Also, a very small difference between the laboratory results and the theoretical results was observed. By using the twist-off test, it is possible to evaluate the compressive strength of concrete without breaking the sample with a coefficient of determination of about 95%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 April 2024

Revise Date: 15 May 2024

Accept Date: 11 July 2024

Keywords:

Twist-off
Rate of water penetration
Theoretical model
Cylindrical chamber
Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.451959.3390](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451959.3390)

*Corresponding author: Ali Saberi Varzaneh.

Email address: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

بکارگیری آزمون‌های ابداعی پیچش و محفظه استوانه‌ای و بسط مدل جدید تئوری

جهت اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب در بتن

علی صابری ورزنه^{1*}، محمود نادری²، سردار ولی دین³

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

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

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

چکیده

مشخصات مکانیکی و پایایی بتن بصورت مستقیم با ویژگی‌های ساختاری منافذ میکروسکوپی بتن در ارتباط است. با توجه به اینکه در هندسه اقلیدسی، تمامی ابعاد بصورت اعداد صحیح می‌باشند لذا نمی‌توان ساختار منافذ میکروسکوپی را توسط آن تعریف نمود. لذا در این مقاله با گذر از محدودیت‌هایی مانند یک بعدی و دو بعدی و... اقدام به ارائه تئوری جدیدی شده که مشخصات واقعی سیستم‌های پیچیده را بیان می‌نماید. بعد طول پیچیدگی و مساحت سطحی منافذ از مشخصات مهم مدل مذکور می‌باشد. همچنین با بررسی استانداردهای معتبر جهانی، ملاحظه می‌گردد که برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن نیاز به دستگاه‌های آزمایشگاهی بوده و نمی‌توان در محل پروژه و بصورت درجا اقدام به ارزیابی نفوذپذیری نمود. به همین جهت نیاز به معرفی و بکارگیری آزمون‌های نوین و درجا برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت بتن مورد نیاز می‌باشد. در این مقاله برای اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب به بتن و همچنین مقاومت سطحی بتن از آزمون‌های ابداعی و درجای محفظه استوانه‌ای و پیچش استفاده شده است. دستگاه مرتبط با آزمون‌های مذکور بسیار ساده، قابلیت تکرار و قابل استفاده در محل پروژه می‌باشند. نتایج آزمایش‌ها نشانگر دقت بالای مدل تئوری معرفی شده جهت اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب در بتن می‌باشد. همچنین اختلاف بسیار اندکی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تئوری مشاهده شد. با استفاده از آزمون پیچش نیز می‌توان بدون شکستن نمونه مقدار مقاومت فشاری بتن را با ضریب تعیین حدود 95 درصد ارزیابی نمود.

کلمات کلیدی: آزمون پیچش، نرخ نفوذپذیری، مدل تئوری، آزمون محفظه استوانه‌ای، بتن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.451959.3390	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451959.3390	1403/12/30	1403/12/30	1403/04/21	1403/02/26	1403/02/03
علی صابری ورزنه ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

1- مقدمه

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 اهمیت می‌باشد. همچنین نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد مانند دماهای بالا [۱]، فشار آب زیاد [۲]، یخ و ذوب یخ مداوم [۳]، حمله کلریدها [۴]، حمله سولفات‌ها [۵] می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این نفوذپذیری سطحی بتن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد فوری و بلندمدت آن دارد [۶]. 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 [۷].

قابل ذکر است که منافذ مواد سیمانی با گستره قطر وسیع و مورفولوژی بسیار نامنظم باعث پیچیدگی و زبری کل ساختار میکروسکوپی منافذ می‌شود. همه ابعاد در هندسه سنتی اعداد صحیح هستند. به همین منظور، ساختار منافذ میکروسکوپی بتن را نمی‌توان با آن‌ها توصیف نمود. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال ارائه شده توسط بنوایت ماندلبرات [۸]، در توصیف ساختار منافذ مواد کامپوزیت سیمانی استفاده شده است، که موارد فوق در مطالعات محققان مختلف نیز بکار گرفته شده است [۹]. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که مساحت، حجم و شکل منافذ دارای ویژگی‌های مهم فراکتالی هستند که ارتباط ویژه‌ای با خواص میکروسکوپی آن دارد [۱۰]. از سوی دیگر، ساختار منافذ مواد سیمانی به عنوان یک سیستم بسیار پیچیده به شمار می‌رود، که نمی‌توان آن را به طور کامل با پارامترهای سنتی مانند تخلخل، حجم منافذ و توزیع قطر منافذ مشخص کرد [۱۱-۱۲]. اما از طریق تحلیل فراکتال، پیچیدگی ساختار منافذ بتن را می‌توان به طور مؤثر اندازه‌گیری و مقایسه نمود [۱۳-۱۴]. ویژگی‌های داخلی منافذ را توسط بُعد فراکتال به طور واضح می‌توان توصیف کرد و بُعد فراکتال یک ارتباط خوبی با قطر بحرانی و مساحت خاص سطحی منافذ دارد [۱۵].

شناخت دقیق از عوامل اثر گذار بر نفوذپذیری و اتخاذ راهکارهای فنی مناسب می‌تواند عمر مفید سازه‌های بتنی را به طور چشم‌گیر افزایش دهد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن با آزمایش‌های رایج در دنیا، نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات مختلف است. همچنین به دلیل زمان بر 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 به صورت درجا را ندارند. روش نوین محفظه استوانه‌ای که توسط نادری در سال ۲۰۱۰ ابداع شد [۱۶]، 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 [۱۷]. با توجه به نتایج تحقیقی که به منظور 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 بدست آمده از استاندارد BS [۱۸] محاسبه شده است که رابطه خطی با ضریب تعیین بیش از ۰/۹۵ بین نتایج حاصل از روش‌های مذکور مشاهده شده است [۱۹].

روش پیچش از روش‌های درجای نیمه مخرب محسوب می‌شود. این روش توسط نادری برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی مصالح سیمانی اختراع گردیده است [۲۰]. آزمون پیچش یک روش کاربردی در تعیین مقاومت فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در آزمایشگاه و چه در محل می‌باشد. دقت بالا، هزینه اندک با خرابی ناچیز و سرعت عمل بالا، امکان کاربرد آن در حالت‌های افقی و قائم از مزایای این روش هست [۲۱]. برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی انواع بتن و ملات با استفاده از آزمون "پیچش" تحقیقات فراوانی انجام پذیرفته است. در تحقیق انجام شده با استفاده از ملات، همبستگی بین آزمایش پیچش و مقاومت فشاری با دقت بالا به دست آمد [۲۲]. در تحقیق دیگری با استفاده از سیمان تپ ۲ تحت شرایط مختلف عمل‌آوری، ضریب همبستگی ۹۴ درصد بین نتایج حاصل از آزمون پیچش و مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی به دست آمده است [۲۳]. برای تعیین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی تیر بتنی پوزولانی از معادله کالیبراسیون مربوطه در محدوده اطمینان ۹۷ درصد به دست آورد [۲۴].

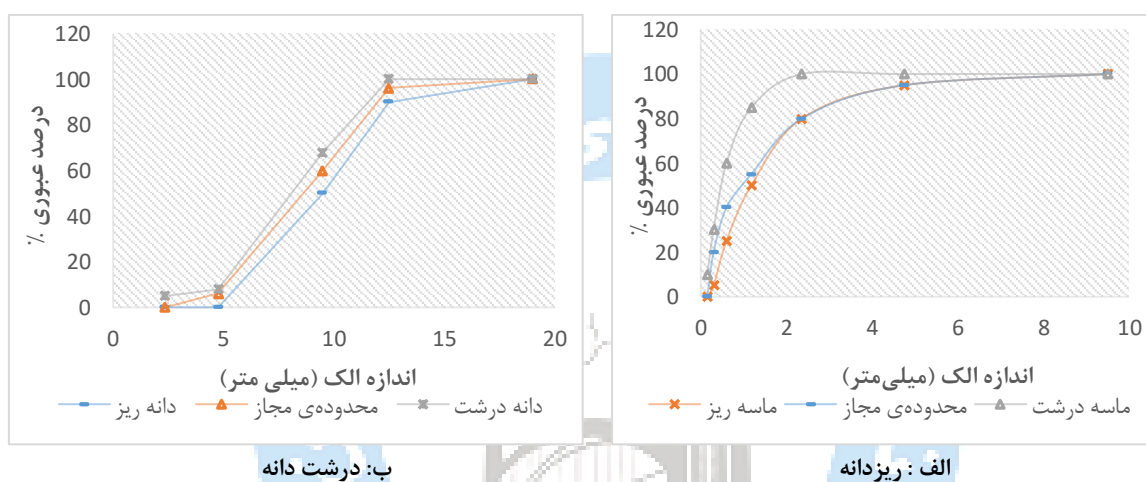
در این تحقیق، یک مدل فرکتال بسط داده شده جدید با استفاده از مساحت سطحی منافذ و پیچیدگی مسیرهای جریان برای اندازه‌گیری نرخ نفوذ آب در بتن ارائه شده است. این مدل بر اساس اصول فراکتال استخراج شده است. نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌های

بتنی نیز با استفاده از روش‌های درجای محفظه استوانه‌ای و پیچش، در سنین مختلف بدست آمده است. در ادامه برای بررسی اعتبار نتایج مدل فراکتال پیشنهادی جدید، مقایسه بین نتایج حاصل از روش محفظه استوانه‌ای و مدل فراکتال جدید انجام شده است.

۲- کارهای آزمایشگاهی و تئوری

۱-۲- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند تیپ ۲ و آب آشامیدنی استفاده شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM-C136 انجام پذیرفته است [۲۵]. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن‌ها نیز به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد به دست آمده است [۲۶-۲۷]. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به همراه محدوده مجاز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل 1: دانه بندی سنگدانه‌ها

چسب مورد استفاده برای چسباندن صفحه فولادی به 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 ۴ ساعت بوده و دارای مقاومت فشاری و برشی به ترتیب برابر ۷۰ و ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته‌ی چسب مذکور نیز برابر ۱۲۷۵۰ مگاپاسکال می‌باشد.

۲-۲- آزمون پیچش

روش پیچش که در سال ۲۰۰۵ توسط نادری ابداع شد [۲۰]، یک روش کاربردی در تعیین مقاومت فشاری بتن و سایر مصالح ساختمانی، چه در آزمایشگاه و چه در محل پروژه است. به عنوان یک روش سریع، دقیق و کم‌هزینه با خرابی جزئی، در گروه آزمایش‌های نیمه مخرب محسوب می‌گردد. از مزایای این روش دقت، سرعت انجام آزمایش، سادگی، خرابی جزئی و هزینه اندک انجام آن است که آن را در مقایسه با سایر آزمون‌های درجا ممتاز گردانیده‌اند. این آزمایش در حالت‌های قائم، افقی و به صورت کلی بر روی هر سطح صافی به راحتی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی قابل استفاده است. استفاده از آزمایش پیچش بر این اساس استوار است که استوانه فلزی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، با استفاده از چسب رزین اپوکسی، به سطح محل انجام آزمایش چسبانده می‌شود (شکل ۲-الف). سپس با استفاده از یک پیچش سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا جسم مورد نظر دچار شکست گردد (شکل ۲-ب). در این آزمایش چون شکست در خود بتن مورد نظر اتفاق می‌افتد، لذا نتایج آن نسبت به آزمایش‌های تعیین سختی سطح یا آزمایش‌های که به شکل غیرمستقیم مقاومت بتن را تعیین می‌کنند، از اطمینان بیشتری برخوردار است. خرابی حاصل از انجام این آزمایش

بسیار جزئی بوده و در صورت نیاز به راحتی با استفاده ملات ترمیم می‌شود. مقدار مقاومت حاصل از روش پیچش که باعث کنده شدن استوانه فلزی از سطح بتن شده، مطابق رابطه ۱ می‌باشد.

(۱)

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

که در آن τ تنش برشی، T گشتاور پیچشی، r شعاع استوانه فلزی، J ممان قطبی دوم سطح بوده. در شکل ۲-ج نیز حالت شکست نشان داده شده است.



ج: شکست نمونه

ب: حالت انجام آزمایش پیچش

الف: استوانه فلزی چسبیده روی بتن

شکل ۲: آزمایش پیچش

۲-۳- آزمون محفظه استوانه‌ای

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 [۱۶]، 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 ۳-الف نشان داده شده است.

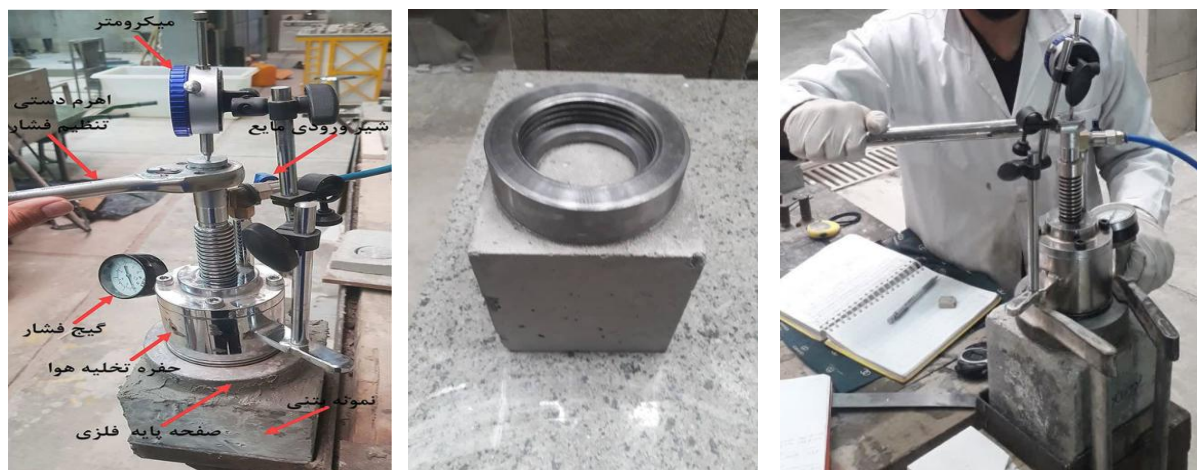
برای استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای ابتدا سطح بتن کاملاً خشک شده و آلودگی‌های موجود در سطح بتن زدوده می‌شود. سپس رینگ فلزی توسط چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۳-ب). پس از سخت شدن چسب، دستگاه نفوذپذیری روی صفحه فلزی نصب می‌شود (شکل ۳-ج). سپس دستگاه محفظه استوانه‌ای را کاملاً با آب پر کرده و جهت خروج هوای احتمالی موجود، یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تعبیه شده است. پس از پر شدن دستگاه، شیر تخلیه هوا بسته شده و با چرخاندن اهرم دستی، فشار مورد نظر به آب داخل دستگاه اعمال می‌شود که مقدار آن با استفاده از گیج تعبیه شده روی دستگاه قابل قرائت است. همچنین مقدار حجم نفوذ آب در بتن را می‌توان از طریق میکرومتر نصب شده در قسمت بالای دستگاه و در زمان‌های مختلف ثبت نمود.

مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن در زمان‌های مختلف، با انجام حاصل ضرب مقدار ثبت شده از میکرومتر در سطح مقطعی که فشار به آن وارد می‌شود توسط رابطه ۲ قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ کرده در بتن و زمان نفوذ آب، نرخ نفوذ آب به داخل نمونه بتنی را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه نمود.

$$V = h \times A \quad (۲)$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad (۳)$$

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.



ج: نصب دستگاه روی صفحه فلزی

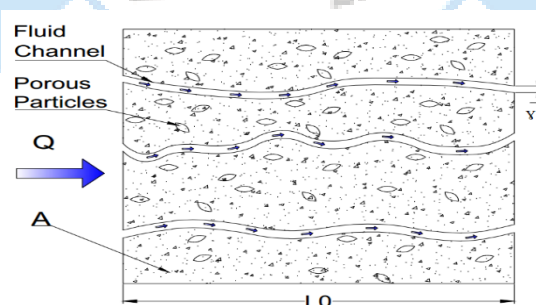
ب: چسباندن صفحه فلزی روی نمونه

الف: نمای کلی دستگاه

شکل 3: آزمون محفظه استوانه‌ای

۲-۴- مدل فراکتال

محیط متخلخل بتن که دارای منافذ مختلفی است، می‌توان به عنوان یک دسته از مویرگی‌های منحنی شکل در نظر گرفت، که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است. نفوذپذیری در محیط متخلخل بتن، با استفاده از تئوری فراکتال قابل محاسبه است. قطر منافذ محیط متخلخل به γ (میلی‌متر)، مساحت کل محیط متخلخل بتن به A (میلی‌مترمربع)، طول نمونه L_0 (میلی‌متر) و نرخ جریان در محیط متخلخل بتن با Q (میلی‌مترمکعب بر ثانیه) نشان داده می‌شود [۲۸]. رابطه نفوذپذیری با پارامترهای ساختاری محیط متخلخل را می‌توان به صورت کمی با تحلیل و تجزیه فراکتال محاسبه نمود [۲۹]. با توجه به تحقیقات قبلی، محیط متخلخل (بتن) در واقع یکنواخت نیست. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، هنگامی که سیال در محیط متخلخل جریان دارد، مسیر آن به شکل منحنی می‌باشد [۳۰-۳۱].



شکل ۴: نمونه از کانا‌های مویرگی با پیچیده‌گی

۲-۵- 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 [۳۲]. آزمایش جیوه (MIP) رایج‌ترین روش برای مطالعه ویژگی‌های ساختار منافذ مواد سیمانی است. در سال‌های اخیر، این روش به طور گسترده برای مطالعه ساختار منافذ خمیر سیمان هیدراته، ملات و بتن مورد استفاده قرار گرفته است [۳۳-۳۴]. نمونه‌های بتنی که در این آزمایش استفاده شد در ابعاد ۸ میلی‌متر به شکل مکعبی می‌باشند (شکل ۵). این نمونه‌ها تحت فشار مشخص جیوه ($P = 0.14 \text{ MPa} - 228 \text{ MPa}$) قرار می‌گیرد (این دستگاه می‌تواند اندازه منافذی که در

محدوده‌ی ۱۴۰ میکرومتر تا ۱۰ 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 به شکل خودکار نتایج را اندازه‌گیری می‌کند که شامل حجم کلی منافذ، سطح ویژه، تخلخل و توزیع منافذ می‌باشد.



شکل 5: نمونه‌های استفاده شده در آزمایش جیوه

۲-۶- ساخت نمونه‌های بتنی

با توجه به اینکه امروزه بتن استفاده شده در بسیاری از سازه‌های معمول دارای مقاومت فشاری حدود ۳۰ مگاپاسکال می‌باشند لذا در این تحقیق از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردید. برای انجام آزمایش پیچش و محفظه استوانه‌ای اقدام به ساخت نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر شد. نمونه‌ها در سنین ۷ الی ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول 1- طرح اختلاط بتن (کیلوگرم بر مترمکعب)

مقاومت (مگاپاسکال)	نسبت آب سیمان	سیمان	شن	ماسه	آب
30	0/5	415/92	686/83	863/63	206

۳- تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده

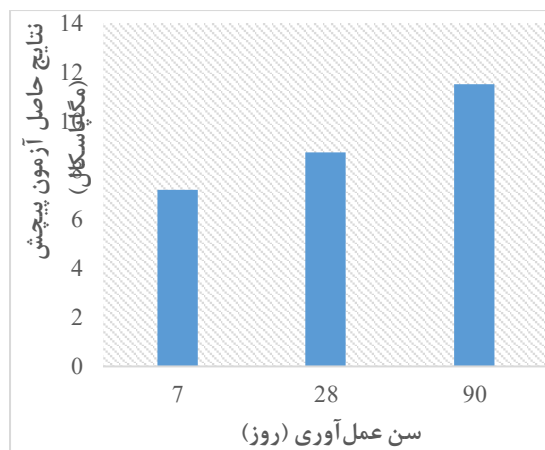
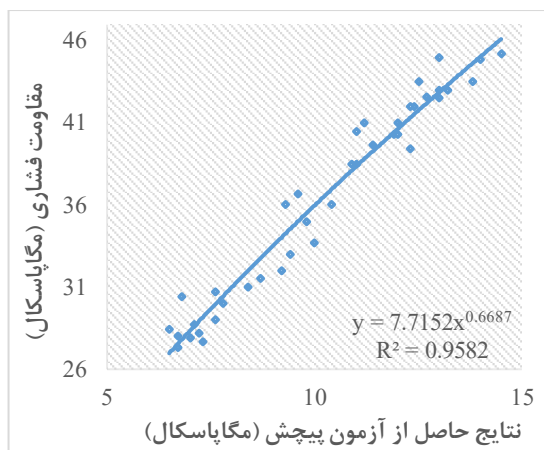
۳-۱- نتایج حاصل از آزمون پیچش

در شکل ۶-الف، نتایج آزمون پیچش حاصل از نمونه‌های بتنی در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در نتایج آزمون پیچش نیز افزایش دیده شده است. این افزایش در نمونه‌های با عمل‌آوری ۷ روزه نسبت به نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه حدود ۱۷/۳ درصد و در سن ۷ روزه نسبت به ۹۰ روزه حدود ۳۷/۳ درصد است. افزایش مقاومت لایه سطحی در مقاومت‌های مختلف، نشان‌دهنده پیشرفت و تشکیل بیشتر محصولات هیدراسیون سیمان است که منجر به یک ساختار متراکم‌تر می‌شود. توسعه‌ی مقاومت به شدت به نوع و حجم محصولات هیدراسیون تشکیل‌شده وابسته است و بنابراین به واکنش‌های بین ترکیبات جامد و مایع برمی‌گردد [۳۵].

همچنین، در شکل ۶-ب، رابطه بین مقاومت فشاری و آزمایش پیچش نشان داده شده است که ضریب تعیین آن برابر ۹۵ درصد به دست آمده است. بنابراین، می‌توان با استفاده از مقاومت سطحی حاصل از آزمایش پیچش، جهت دریافت مقاومت فشاری همان نمونه و یا عضو دیگر، با به‌کارگیری رابطه (۴)، مقدار مقاومت سطحی را در این رابطه قرار داده و مقدار مقاومت فشاری مورد نظر را برحسب مگاپاسکال، در محدوده اطمینان ۹۵ درصد، به دست آورد. قابل ذکر است که بین مقاومت فشاری و مقاومت سطحی رابطه مستقیم وجود دارد.

$$Y = 7.715X^{0.6687}$$

(۴)



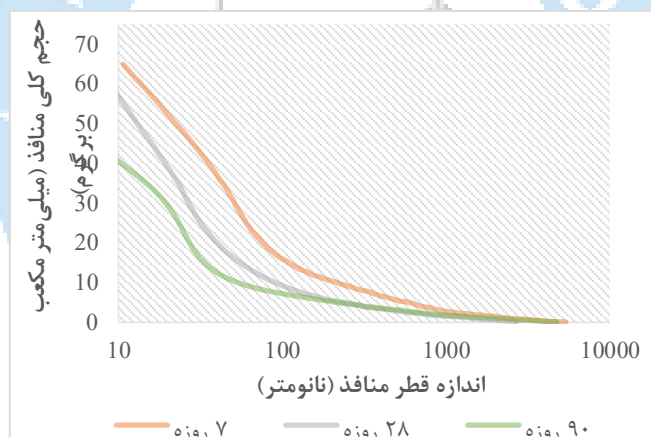
ب: همبستگی بین مقاومت فشاری و نتایج آزمون پیچش

الف: مقاومت سطحی

شکل 6: نتایج مقاومت سطحی بتن حاصل از آزمون پیچش

۲-۳- نتایج آزمون جیوه

با استفاده از آزمون جیوه، حجم کل منافذ در سنین مختلف عمل آوری در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل 7: تغییر در حجم کلی منافذ با افزایش زمان عمل آوری

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 ۵، قطر متوسط منافذ به دست می‌آید [۳۲].

$$d_{av} = \frac{4V}{A}$$

(۵)

که در رابطه ۵ d_{av} قطر متوسط منافذ (نانومتر)، V حجم کل منافذ (میلی متر مکعب بر گرم) و A مساحت سطح خاص منافذ (مترمربع بر گرم) است.

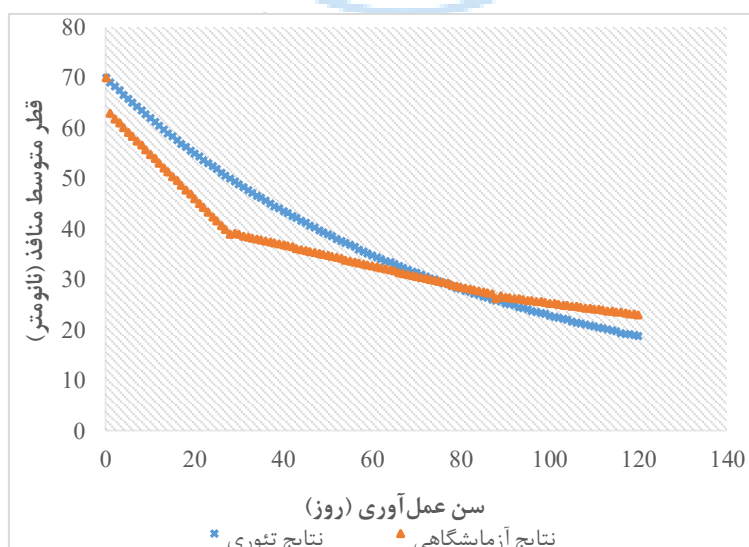
با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد. علت این تغییرات، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که باعث فشردگی ساختار منافذ بتن می‌شود. مساحت منافذ در ابتدای عمل‌آوری افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان به حالت ثابت تبدیل می‌شود [۳۲]. به این 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 دارد. 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 می‌گردد.

جدول ۲: مشخصات منافذ در سنین مختلف

تخلخل (%)	قطر متوسط (نانومتر)	مساحت سطح خاص منافذ (گرم/مترمربع)	حجم کلی منافذ (گرم/میلی‌متر مکعب)	عمل‌آوری (روز)
۱۸/۴	۵۰/۶	۵/۳	۶۷	۷
۱۶/۸۶	۳۹/۳	۵/۹	۵۸	۲۸
۱۳/۳	۲۶/۵	۶/۲	۴۱	۹۰

۳-۳- ارائه مدل جدید فراکتال

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 [۳۶-۳۷]. 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 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 ۶ و نمودار شکل ۸ شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری، قطر متوسط منافذ کاهش می‌یابد. لذا افزایش سن به معنای افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری است. رابطه ۷، رابطه‌ی مهمی است که در محاسبات استخراج مدل جدید فراکتال استفاده می‌شود.



شکل ۸: کاهش قطر منافذ با افزایش سن

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

$$\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} = C^{-at} \quad (7)$$

در رابطه ۶، a ضریب زمان که بر اساس رابطه ۸ حاصل می‌گردد و t سن عمل‌آوری و C قاعده تابع نمایی که مقدار آن ۲ است. تعیین مقدار C و مقدار a ، بر این اساس است که منحنی تئوری، متناظر منحنی داده‌های آزمایشگاهی بوده و مقدار γ_{\max} نیز برابر حداکثر قطر متوسط که برابر با ۷۰ نانومتر است باشد.

$$a = \frac{16.01}{t-1000} \quad (8)$$

در سال ۲۰۰۲ چینگ و یو [۳۸] برای دریافت توزیع منافذ در محیط متخلخل با استفاده از قانون مقیاس بندی فراکتال، از رابطه ۹ استفاده نمودند. همچنین مدل فراکتالی، برای ساختار متخلخل بتن فوم، قادر به پیشبینی رابطه‌ی مقاومت فشاری با میزان تخلخل است، لذا از این مدل در بخش‌های دیگر بتن فوم نیز می‌توان استفاده نمود [۳۹]. ویژگی‌های فراکتالی توزیع اندازه‌ی 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 بودند [۴۰]. در تحقیقی دیگر نیز با استفاده از مدل فراکتال، اقدام به ارائه یک مدل سه بعدی جهت اندازه‌گیری تخلخل بتن شده است [۴۱].

$$N(L \geq \gamma) = \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \right)^{D_f} \quad (9)$$

در رابطه ۹، N تعداد منافذ، D_f بعد فراکتال و γ قطر منفذ است؛ لذا برای دریافت تعداد منافذ از قانون مقیاس بندی فراکتال (رابطه ۷) استفاده شده است و این رابطه با توجه به رابطه ۹ تبدیل به رابطه‌ی ۱۰ شده است. به طوریکه در رابطه ۷ مقیاس γ_{\max}/γ به مقیاس جدیدی که مساوی با C^{-at} است تغییر یافته است و رابطه به شکل رابطه جدید ۱۰ معرفی شده است.

$$N(t) = (C^{-at})^{D_f} = 2^{\frac{-16.01t D_f}{t-1000}} \quad (10)$$

برای محاسبه بعد فراکتال مساحت سطحی D_f از رابطه‌ی ۱۱ استفاده می‌شود [۲۹].

$$D_f = D_e - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left(\frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}} \right)} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، D_e بعد هندسی اقلیدسی است که در فضای دو بعدی مقدار آن ۲ و در فضای سه بعدی مقدار آن مساوی با ۳ است [۲۹]. همچنین ε مقدار تخلخل بتن (۰/۱۵) است که در آزمایش جیوه به دست آمده است، γ_{\max} و γ_{\min} نیز حداکثر و حداقل قطر منافذ است که حداکثر آن برابر به ۷۰ نانومتر می‌باشد که در محدوده‌ی منافذ قطر متوسط آزمایش جیوه حاصل شده است و مقدار حداقل آن در محدوده‌ی قطر منافذ ژل قرار دارد که مساوی با ۵ نانومتر است [۱۵].

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 [۴۲] برای دریافت L_t از قانون فراکتال رابطه ۱۲ استفاده نمودند؛

$$L_t(\gamma) = L_0^{D_t} \gamma^{1-D_t} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، 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. در این تحقیق برای اندازه‌گیری طول پیچیده‌گی کانال مویرگی بتن از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود. اما به جای γ از مقدار رابطه ۶ استفاده شده که رابطه‌ی جدید ۱۳ به دست می‌آید.

$$L_t(t) = L_0^{D_t} (\gamma_{\max} G^{at})^{1-D_t} \rightarrow L_t(t) = L_0^{D_t} \gamma_{\max}^{1-D_t} G^{\frac{16.01t(1-D_t)}{t-1000}} \rightarrow L_t(t) = L_0^{D_t} \gamma_{\max}^{1-D_t} G^{\frac{-16.01t+16.01tD_t}{t-1000}} \quad (13)$$

با مشتق‌گیری رابطه ۹، نرخ تغییرات تعداد منافذ dN را می‌توان به صورت رابطه ۱۴ به دست آورد.

$$dN(t) = \ln G G^{\frac{-16.01tD_t}{t-1000}} \frac{16010 D_t}{(t-1000)^2} dt \quad (14)$$

نرخ جریان سیال، در یک کانال مویرگی را می‌توان بر اساس رابطه اصلاح شده هاگن پوازی (رابطه ۱۵) به دست آورد [۴۱].

$$q(t) = \frac{\pi P}{128 L_t(t) \mu} \gamma^4 \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، P فشار سیال (مگاپاسکال) و μ ضریب ویسکوزیته (مگاپاسکال ثانیه) است. با استفاده از روابط ۶ و ۱۳ می‌توان قطر متوسط و طول پیچیدگی جدید را در رابطه ۱۵ جایگذاری نمود که رابطه ۱۶ به دست می‌آید. این رابطه شکل جدید رابطه هاگن پوازی می‌باشد.

$$q(t) = \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} 2^{\left(\frac{16.01tD_t+48.03t}{t-1000}\right)} \quad (16)$$

با استفاده از نرخ جریان حجمی یک کانال و تغییرات نرخ منافذ، نرخ کل جریان از محیط متخلخل را می‌توان با انتگرال‌گیری محاسبه نمود؛ حالت نهایی رابطه نرخ کل جریان در رابطه ۱۷ نشان داده شده است که با بکارگیری این رابطه می‌توان نرخ جریان را برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری حساب کرد.

$$Q(t) = \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 L_0^{D_t} \mu} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} 2^{\frac{16.01t(3+D_t-D_f)}{t-1000}} - \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 L_0^{D_t} \mu} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} - 9 \quad (17)$$

به عنوان نمونه، نرخ جریان برای بتن عمل‌آوری شده در ۲۸ روز محاسبه گردیده است. ابتدا پارامترهایی که در محاسبه نرخ جریان، ضریب نفوذپذیری و عمق نفوذ استفاده می‌شود، در جدول ۳ معرفی شده است.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای استفاده شده

واحد	مقدار	پارامتر
------	-------	---------

D_f	۱/۲۸	
D_t	۱/۰۸۴	
γ_{max}	۰/۰۰۰۰۷	میلی متر
μ	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۸۹	مگاپاسکال ثانیه
p	۰/۵	مگاپاسکال
L_0	۱۵۰	میلی متر

با جایگذاری اعداد جدول ۳ در رابطه ۱۷ داریم:

$$Q(28) = \frac{\pi}{128} \frac{0.5 \times 1.5 \times (0.00007)^{4.084}}{150^{1.084} \times 8.9 \times 10^{-10} (3 + 1.084 - 1.28)} \frac{16.01 \times 2419200 \times (3 + 1.084 - 1.28)}{2419200 - 1000} - 9 = 0.792 \frac{mm^3}{s}$$

۳-۴- صحت سنجی نتایج مدل فراکتال جدید

در این قسمت جهت صحت سنجی نتایج مدل فراکتال جدید ارائه شده، نتایج دیگر محققین مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در تحقیقی برای اندازه-گیری نفوذپذیری بتن حاوی سنگدانه-های مختلف از آزمون محفظه استوانه-ای استفاده شده است [۱۷]. در تحقیقی مذکور ابتدا نمونه-های بتنی تحت عمل-آوری تا سن ۲۸ روز قرار گرفته و مقدار مقاومت فشاری آن-ها تعیین گردید. در طرح اختلاط بتن از سنگدانه-های توف و سیلیکا استفاده گردیده است. مقاومت فشاری نمونه-های بتنی حاوی سنگدانه-های سیلیکا در تحقیق فوق برابر ۳۸/۵ مگاپاسکال و در این تحقیق برابر ۳۹/۸ مگاپاسکال بدست آمده است. در تحقیق مذکور مقدار نرخ نفوذ آب به بتن برابر ۰/۸۸۹ میلی-متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است. در این تحقیق نیز مقدار نرخ نفوذ آب به بتن با استفاده از مدل جدید فراکتال برابر ۰/۷۹۲ میلی-متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است. مشاهده می-گردد که اختلاف نتایج بدست آمده بسیار کم می-باشد که نشان از دقت نتایج مدل تئوری جدید ارائه شده می-باشد. البته اختلاف اندک نتایج نیز به دلیل اختلاف اندک در مقاومت فشاری و طرح مخلوط نمونه-ها می-باشد.

در تحقیق دیگری که نمونه-های بتنی تحت ۲۸ روز عمل آوری قرار گرفته و سپس مقدار نفوذپذیری آن-ها تعیین گردیده است مشاهده شد که مقدار نرخ نفوذ آب به بتن برابر ۰/۸۵۵ میلی-متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است [۱۹]. در این تحقیق نیز مقدار نرخ نفوذ آب به بتن با استفاده از مدل جدید فراکتال برابر ۰/۷۹۲ میلی-متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است. مشاهده می-گردد که اختلاف نتایج بدست آمده بسیار کم می-باشد که نشان از دقت نتایج مدل تئوری جدید ارائه شده می-باشد.

۳-۵- مقایسه نتایج مدل فراکتال جدید و آزمون محفظه استوانه‌ای

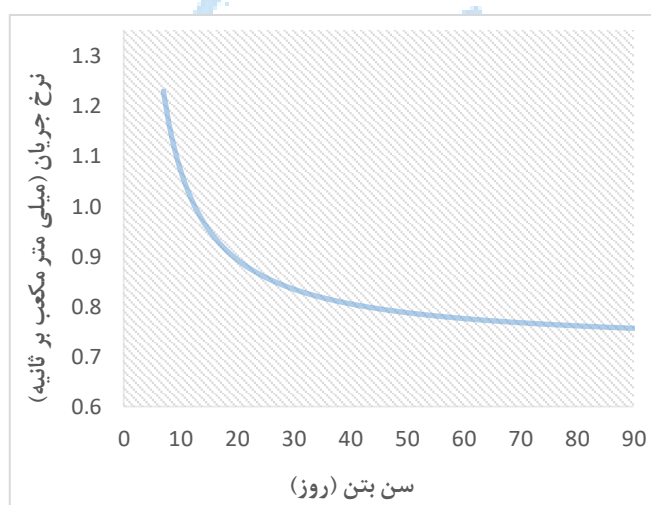
در جدول ۴ مقادیر نرخ جریان، در سنین مختلف برای نتایج حاصل از مدل فراکتال جدید و آزمون محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که، درصد اختلاف بین نتایج نرخ جریان در عمل‌آوری‌های ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۹/۹ و ۶/۱۷ درصد است. وجود مقدار اندک اختلاف، نشان از دقت مدل تئوری است.

در کل روند تغییرات نرخ جریان، با استفاده از مدل فراکتال جدید 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.

جدول 4: مقایسه مقادیر نرخ جریان در عمل‌آوری‌های مختلف

عمل‌آوری	نرخ جریان (میلی متر مکعب بر ثانیه)		
	نتایج تئوری	نتایج آزمون محفظه استوانه‌ای	درصد اختلاف (%)
۷	۱/۱۷۸	۱/۰۴۸	۱۲/۴۳
۹	۱/۰۶۲	۱/۰۳۲	۲/۹
۱۴	۰/۹۱۹	۰/۹۹۱	۷/۳
۲۱	۰/۸۳۴	۰/۹۳۵	۱۰/۸
۲۸	۰/۷۹۲	۰/۸۷۹	۹/۹
۴۱	۰/۷۵۲	۰/۸۳۴	۹/۸
۵۴	۰/۷۳۲	۰/۷۸۹	۷/۲۸
۶۷	۰/۷۲۳	۰/۷۴۴	۲/۹
۸۰	۰/۷۱۱	۰/۶۹۹	۱/۶
۹۰	۰/۷۰۶	۰/۶۶۵	۶/۱۷

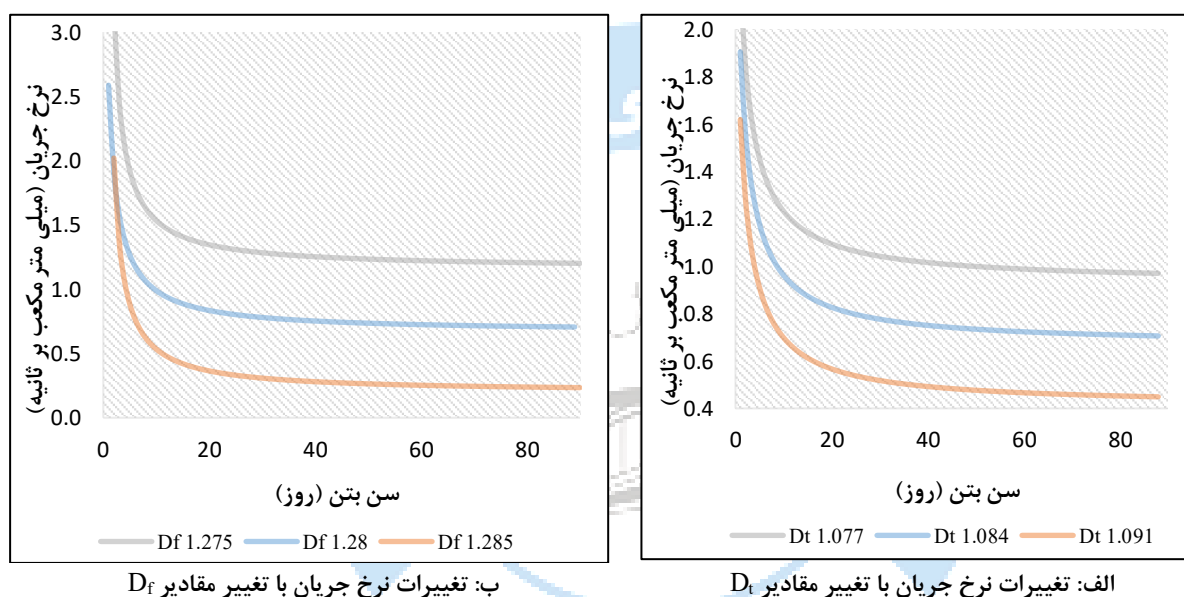
نمودار نرخ جریان به دست آمده از رابطه ۱۷ در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر نرخ جریان با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد که با آزمایش‌های انجام شده مطابقت دارد و این بیانگر معتبر بودن تئوری مورد نظر است. دلیل این کاهش، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که منجر به کاهش منافذ و قطع کانال‌های مویینه گردیده است [۴۳]. 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. فضاهای 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 می‌یابد [۴۳].



شکل 9: تغییرات نتایج حاصل شده از مدل فراکتال با توجه به سن عمل‌آوری

۳-۶- میزان حساسیت مدل فراکتال جدید به پارامترهای مختلف و مزایای آن نسبت به دیگر مدل‌ها

پارامترهای عمده‌ای که بر نرخ نفوذ تأثیر گذار است، عبارتند از پیچیدگی کانال‌های ریز (D_t) و مساحت سطحی منافذ (D_f). پارامتر D_t که پیچیدگی کانال‌های ریز (در حد میکرومتر و نانومتر) را نشان می‌دهد، با افزایش سن عمل‌آوری یا مقاومت فشاری بتن، افزایش می‌یابد که باعث کاهش نفوذپذیری در بتن می‌شود. زیرا با افزایش پیچیدگی در کانال‌های ریز بتن، آب به راحتی نمی‌تواند نفوذ کند [۳۸ و ۴۰]. پارامتر D_f که مساحت سطحی منافذ ریز را نشان می‌دهد، تحقیقات نوین نشان داده که با افزایش سن عمل‌آوری یا مقاومت فشاری بتن، اندازه D_f نیز در یک محدوده افزایش می‌یابد که باعث کاهش نفوذپذیری در بتن می‌شود [۴۰ و ۴۴-۴۵]. علت اصلی کاهش نفوذپذیری این است که افزایش مقاومت بتن منجر به زبرتر شدن سطح داخلی منافذ بتن می‌گردد که این حالت بر سر راه نفوذ آب موانع ایجاد می‌کند، که در نتیجه باعث کاهش نفوذپذیری در بتن می‌شود. قابل ذکر است که مدل فراکتال جدید این قابلیت را دارا می‌باشد که با افزایش یا کاهش پارامترهای مذکور، مقدار نرخ نفوذ را کاهش یا افزایش دهد. برای مشاهده این روند، مقادیر مختلف D_f و D_t در نمودارهای شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شکل 10: تغییرات نرخ جریان با تغییر مقادیر D_f و D_t

یکی دیگر از پارامترهای اثر گذار بر مقدار نفوذپذیری بتن، مقدار فشار آب وارده می‌باشد. در تحقیقی برای اندازه‌گیری تأثیر فشار آب بر نفوذپذیری بتن از فشارهای مخالف برابر با ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۹۵ مگاپاسکال استفاده گردید [۴۶]. در تحقیق مذکور مشاهده شد که در یک نمونه با نسبت آب به سیمان ثابت با افزایش مقدار فشار وارده، نفوذپذیری نمونه نیز بیشتر می‌شود. در رابطه جدید فراکتال نیز پارامتر فشار آب (P) در صورت معادله ظاهر شده است که نشان‌دهنده افزایش نفوذپذیری بتن با افزایش مقدار فشار وارده می‌باشد.

از دیگر پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر نفوذپذیری بتن، سن عمل‌آوری بتن می‌باشد که باعث ایجاد مقاومت فشاری‌های مختلف در بتن می‌گردد. مدلی که در تحقیق [۴۵] (Xiao Han et al., ۲۰۲۳) ارائه شده است، تنها می‌تواند با بکارگیری ابعاد فراکتال، رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و ابعاد فراکتال را ارائه نماید. همچنین در تحقیقات دیگر نیز نرخ جریان بر اساس ابعاد فراکتال محاسبه می‌شود [۳۸ و ۴۴]. درحالی‌که مدل فراکتال جدید می‌تواند تأثیر روند عمل‌آوری بتن را که با گذشت زمان باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود را مورد ارزیابی قرار داده که این مورد یکی از مزایای این مدل با دیگر مدل‌ها بوده و از نوآوری‌های این مدل به شمار می‌رود. همچنین از مزایای دیگر این مدل این است که تغییرات ابعاد فراکتال به شکل دقیق در رابطه تأثیر داشته و همچنین مدل فراکتال جدید، برخلاف دیگر

مدل‌های موجود، علاوه بر اندازه‌گیری نرخ نفوذپذیری، قابلیت اندازه‌گیری عمق نفوذ و ضریب نفوذپذیری را دارد که البته موضوع گسترده‌ای برای تحقیقات دیگر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- با استفاده از آزمون پیچش می‌توان بدون شکستن نمونه، مقدار مقاومت فشاری بتن را با ضریب اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی نمود.
- ۲- با بکارگیری آزمون نوین محفظه استوانه‌ای می‌توان بدون شکست نمونه، مقدار نرخ نفوذ آب به داخل بتن را اندازه‌گیری نمود.
- ۳- با استفاده از مدل فراکتال جدید ارائه شده می‌توان مقدار نرخ نفوذ آب به بتن را با دقت بالایی اندازه‌گیری نمود.
- ۴- نتایج حاصل از مدل فراکتال جدید و آزمون محفظه استوانه‌ای دارای همخوانی بالایی می‌باشند به طوری که مقدار نرخ جریان آب در سن ۹۰ روز با استفاده از مدل جدید فراکتال برابر ۰/۷۰۶ میلی متر مکعب بر ثانیه و با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای برابر ۰/۶۶۵ میلی متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که دارای اختلاف اندکی می‌باشند.
- ۵- روند تغییرات نفوذپذیری به دست آمده از روش محفظه استوانه‌ای نشان می‌دهد که با افزایش سن، این روند کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات در مقادیر مدل فراکتال جدید نیز به همین صورت است، که این نکته نشان از تأیید روند مدل جدید مورد نظر برای اندازه‌گیری نفوذپذیری است.
- ۶- درصد اختلاف در نرخ جریان بین روش محفظه استوانه‌ای و مدل فراکتال جدید در عمل‌آوری‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۱۲/۴۳، ۹/۹ و ۶/۱۷ درصد است. مشاهده می‌شود که دقت مدل جدید ارائه شده، مناسب می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H., & 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, 108643.
- [2] Zhang, G., Zheng, H., Wei, X., Li, Z., Yan, Z., & Chen, X. (2024). Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure. *Developments in the Built Environment*, 100385.
- [3] Zeng, W., Wang, W., Pan, J., & 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, 108086.
- [4] Zeng, W., Zhao, X., Zou, B., & 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, 108042.
- [5] Zhang, J., Zhou, L., Nie, Q., Wu, H., & Wu, L. (2024). Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134369.
- [6] Yang, J., Dong, Q., Chen, X., Shi, B., & Wang, X. (2024). Evaluation of concrete surface permeability: A dynamic water film-based approach. *Measurement*, 224, 113863.
- [7] Yildirim, M., & ÖZHAN, H. B. (2023). Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 7(1), 48-59.
- [8] Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature* (Vol. 1). New York: WH freeman.
- [9] Xuan, W., Chen, X., Yang, G., Dai, F., & Chen, Y. (2018). Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 187, 222-236.

- [10] Zhang, B., & Li, S. (1995). Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(4), 1383-1386.
- [11] Gao, Y., Jiang, J., De Schutter, G., Ye, G., & Sun, W. (2014). Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Construction and Building Materials*, 69, 253-261.
- [12] Chen, X., Zhou, J., & Ding, N. (2015). Fractal characterization of pore system evolution in cementitious materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 719-724.
- [13] Ma, H., Sun, J., Wu, C., Yi, C., & Li, Y. (2020). Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars. *Materials*, 13(11), 2442.
- [14] Mahamud, M., López, Ó., Pis, J. J., & Pajares, J. A. (2004). Textural characterization of chars using fractal analysis. *Fuel Processing Technology*, 86(2), 135-149.
- [15] Han, X., Wang, B., & Feng, J. (2022). Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP. *Construction and Building Materials*, 322, 126504.
- [16] 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.
- [17] Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, 1-11.
- [18] BS EN 12390-8, (2009). Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure, British Standards Institution, London.
- [19] Naderi, M., & 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), 2225-2241.
- [20] Naderi, M. (2007); New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6), 602-608.
- [21] Kaboudan, A., & Keshtkar, M. (2020); Studying the permeability and strength of concretes containing silica fume, zeolite and fly ash using "Cylindrical chamber" method and British standard. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), 92-113.
- [22] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2021); STUDY OF BOND STRENGTH BETWEEN FIBER-REINFORCED MORTAR/STEEL AND THEIR MECHANICAL PROPERTIES USING PUSH-OUT, TWIST-OFF AND PULL-OFF METHODS. *Revista Romana de Materiale*, 51(2), 228-238.
- [23] Naderi, M., & Shibani, R. (2013); New Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Strength, *Aust. J. Basic Appl. Sci*, 7(2), 438-447.
- [24] Varzaneh, A. S., & Naderi, M. (2020); determining the in-situ compressive and bending strengths of pozzolanic concrete containing polypropylene and glass fibers using "twist-off" method. *Scient. J. of Civil Eng*, 20(5).
- [25] ASTM C136-19 (ASTM 2019); Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [26] ASTM C128-15 (ASTM 2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM C127-15 (ASTM 2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] Yu, B., & Li, J. (2001). Some fractal characters of porous media. *Fractals*, 9(03), 365-372.
- [29] Xu, P. (2015). A discussion on fractal models for transport physics of porous media. *Fractals*, 23(03), 1530001.

- [30] Patro, D., Bhattacharyya, S., & Jayaram, V. (2007). Flow kinetics in porous ceramics: understanding with non-uniform capillary models. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(10), 3040-3046.
- [31] Bernabé, Y., & Olson, J. F. (2000). The hydraulic conductance of a capillary with a sinusoidally varying cross-section. *Geophysical research letters*, 27(2), 245-248.
- [32] Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J., & Shi, C. (2023). Review on the characteristics and multi-factor model between pore structures with compressive strength of coral aggregate. *Construction and Building Materials*, 370, 130326.
- [33] R. A. Cook, K. C. Hover, Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors, *ACI Mater. J.* 90(2)(1993) 152-161.
- [34] F. Indelicato, On the correlation between porosity and strength in high alumina cement mortars, *Mater. Struct.* 23 (135) (1993) 289-295.
- [35] Teriqet, A., Mohammadi, M., & Medras Y. (2019). Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. *Sharif. J. of Civil Eng*, 34(4.2) 82-57
- [36] Singh, L. P., Goel, A., Bhattacharyya, S. K., Sharma, U., & Mishra, G. (2015). Hydration studies of cementitious material using silica nanoparticles. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(7), 345-354.
- [37] Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J., & 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, 130326.
- [38] Yu, B., & Cheng, P. (2002). A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International journal of heat and mass transfer*, 45(14), 2983-2993.
- [39] Chen, Y., & Xu, Y. F. (2019). Compressive strength of fractal-textured foamed concrete. *Fractals*, 27(01), 1940003.
- [40] Kim, J., & Choi, S. (2023). Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 366, 130157.
- [41] Liu, H., Xie, Z., Yu, R., & Zhang, N. (2022). A New Three-dimensional Fractal Dimension Model to Describe the Complexity of Concrete Pores. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(3), 127-138.
- [42] Wheatcraft, S. W., & Tyler, S. W. (1988). An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. *Water Resources Research*, 24(4), 566-578.
- [43] Naderi, M., Kaboudan, A., & Akhavan Sadighi, A. (2018). Comparative study on water permeability of concrete using cylindrical chamber method and British standard and its relation with compressive strength. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1), 116-131.
- [44] Kim, J., Hong, G., Oh, S., & Choi, S. (2022). Application of various fractal models in characterizing the morphology of pore structures of hydrating cement pastes. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 3818-3835.
- [45] Han, X., Feng, J., & Wang, B. (2023). Relationship between fractal feature and compressive strength of fly ash-cement composite cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 139, 105052.
- [46] Naderi, M., & Kaboudan, A. (2019). Investigating the effect of strength, time and amount of water pressure and concrete pouring direction on concrete permeability. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 52(9), 2379-2398.