



Investigation of the Effect of Continuous Wetting and Drying Cycles on the Durability of the Varzaneh Water Channel

Ali Saberi Varzaneh^{1*}, Mahmood Naderi²

1. Postdoc Researcher, Faculty of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran (Corresponding Author) Ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

2. Prof., Faculty of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.529392.3498>

Original Paper

Abstract

Assessment of water conveyance channel durability, particularly under severe environmental conditions such as wetting and drying cycles, is of considerable importance. Moreover, the development of in-situ testing methods that enable rapid and cost-effective evaluation of structures without the need for concrete destruction plays a crucial role. In this study, the effects of continuous wetting and drying conditions on the permeability of concrete and the performance of the Varzaneh water conveyance channel were investigated. These conditions have resulted in significant water loss and reduced water transmission capacity. Considering that the methods introduced in international standards are generally destructive and only applicable in laboratory environments, the Cylindrical Chamber method was used in this research to measure concrete permeability. This method enables non-destructive, in-situ permeability measurement of concrete. The results indicated that the permeability of concrete increased significantly under wet-dry cycling conditions. To simulate the behavior of the canal's concrete lining, laboratory concrete specimens were prepared, and the effects of various cycles of continuous wetting and drying on permeability were examined. Additionally, microstructural analysis of the concrete was performed to assess the impacts of these conditions. The findings revealed that wetting and drying conditions led to an approximate 17% increase in concrete permeability, which significantly compromises the integrity of the channel's concrete body. Furthermore, three-dimensional plots were utilized to establish the relationship between compressive strength and permeability parameters. Proper curing was also found to reduce shrinkage cracks in concrete by about 20%. Therefore, to maintain optimal channel performance, it is essential to implement preventive measures and appropriate repairs.

Keywords:
Wetting and Drying Cycles, Water Conveyance Channel, Permeability, Concrete, Cylindrical Chamber.



Received: Jan. 27, 2025
Revised: Mar 18, 2025
Accepted: Apr. 14, 2025

To cite this article:

Saberi Varzaneh, A., Naderi, M., 2025. Investigation of the effect of continuous wetting and drying cycles on the durability of the Varzaneh water channel. *Water and Wastewater*, 36(1), 24-42. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.529392.3498>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Use your device to scan and read the article online



1. Introduction

Permeability is recognized as a fundamental factor in determining the performance and durability of concrete. The ingress of harmful substances through microcracks and microscopic pores initiates various chemical and physical processes, ultimately leading to significant alterations in concrete's structure (Yildirim and Özhan, 2023). In general terms, permeability refers to the movement of fluids within the pores of concrete under external pressure. According to the definition provided by the American Concrete Institute¹, permeability is the ability of concrete to allow fluids to pass through its interconnected pore network (ACI, 2018). Factors such as severe temperature fluctuations (Shen et al., 2024), high water pressure (Zhang et al., 2024), the ingress of harmful chemicals such as sulfates and chlorides (Zhou et al., 2024), and the effects of freeze-thaw cycles (Zeng et al., 2023) can negatively influence the mechanical properties and permeability of concrete (Zhao et al., 2023).

To date, no investigations have been conducted on the durability of the Varzaneh water channel, primarily due to the lack of equipment capable of measuring concrete permeability in situ and without the need for destructive testing. Therefore, in this study, the cylindrical chamber test was employed to directly assess the permeability of the water conveyance channel and concrete specimens under severe wetting and drying conditions. This method not only measures the depth of water penetration into concrete but also quantifies the volume of water permeated per unit time, allowing for non-destructive in-situ evaluation of concrete.

Previous studies have exclusively utilized water penetration depth as the criterion for assessing concrete permeability. However, in the present research, the equivalent permeated water volume is determined and considered as the principal indicator of permeability. This approach enables accurate in-situ evaluation of the durability of concrete structures. Moreover, microstructural analysis of the concrete was performed to further investigate the effects of these conditions on its permeability.

2. Methodology

The wet-dry cycles according to the GB/T50082 (2009) standard are performed as follows: First, concrete samples are kept in an oven at a temperature of 80 ± 5 °C for 48 hours. Then, the samples are immersed in a 5% sodium sulfate solution for 15 hours, ensuring that the solution

temperature remains between 25 and 30 °C, with the solution being replaced every month. Afterward, the samples are removed from the solution for 30 minutes and exposed to the open air for one hour. Following this, they are placed back into the oven at 80 °C for 6 hours, and allowed to cool for 2 hours. This process completes one wet-dry cycle.

All the experiments in this study were conducted in a well-equipped construction materials laboratory. The laboratory is equipped with the standard devices required for conducting tests related to concrete, including equipment for measuring strength, permeability, and other quality control devices for materials. The materials used, including cement, sand, and aggregates, were directly sourced from reputable quarries and factories in the city of Qazvin. Prior to use, these materials were evaluated for their physical and chemical properties to ensure they meet the national and international standards required for the study.

The "cylindrical chamber" test is a precise method with wide application for measuring the permeability of concrete and other construction materials, both in the laboratory and in the field. To use the "cylindrical chamber" device, first, the concrete surface is thoroughly dried and any contaminants are removed. Then, a metal ring is bonded to the concrete surface using epoxy adhesive. After the adhesive has cured, the "cylindrical chamber" device is mounted onto the metal plate. The chamber is then completely filled with water and, by turning the manual lever, the desired pressure is applied to the water inside the device. The pressure value can be read from the gauge installed on the device. In this study, a water pressure of 5 bar was applied to the surface of the concrete specimens for 5 hours.

3. Discussion and results

According to the obtained data, the permeability of the Varzaneh channel concrete is very high (exceeding 25 mm), indicating significant water loss and the inefficiency of the channel's concrete lining. In addition to surface evaporation, this has resulted in a considerable reduction in the volume of water delivered to the city compared to the volume entering the channel, highlighting the importance of rehabilitating the concrete lining to mitigate these losses. Notably, the innovative cylindrical chamber test enables precise and in-situ assessment of concrete permeability without the need for coring or causing damage to the structure.

The initial wetting and drying cycles lead to a reduction in volume and penetration depth in the

¹ American Concrete Institute (ACI)



concrete samples compared to the control samples. This phenomenon can be attributed to various factors, which are explained scientifically here.

The reduction in water penetration volume with an increase in compressive strength is directly related to the compaction and improved microstructure of higher-strength concretes. Concretes with higher compressive strength, having greater density and fewer or smaller pores, provide fewer pathways for water to pass through, leading to a significant reduction in water permeability. In general, it can be concluded that increasing the compressive strength of concrete not only enhances durability and load-bearing capacity but also has a substantial effect on reducing water permeability, both under normal environmental conditions and during moisture cycles.

It is clear that concrete, especially at early ages, is affected by shrinkage due to drying. Table 6 presents data related to the shrinkage changes of concrete at different time intervals. In these tests, some of the samples were placed in environmental conditions (open air) from the beginning of mixing, while another group of samples were subjected to curing in water. It is noteworthy that the shrinkage of the concrete was measured on days 3, 7, 14, 28, 42 and 90.

According to the data, the shrinkage of the samples cured in water after 90 days was 0.175%, while for the samples without curing, the shrinkage was measured at 0.217%. In other words, wet curing reduced shrinkage by approximately 20% compared to the uncured samples. These results indicate that releasing the samples into the open air leads to a significant increase in shrinkage. In general, the increase in

shrinkage, especially at the early ages of concrete, is primarily due to the rapid loss of moisture. Previous studies have also confirmed this; for instance, one study demonstrated that the rapid loss of water from the capillary pores of hydrated cement leads to reduced water absorption at the surface and, ultimately, an increase in concrete shrinkage.

The reduction in penetration depth at higher strengths indicates further progress and development of hydration products, which leads to a more compact structure. The increase in compressive strength is dependent on the volume and type of the formed hydration products, and thus, it is related to the reactions between solid and liquid components.

4. Conclusion

With an increase in the number of severe wetting and drying cycles, the damage to concrete increases and its permeability rises accordingly. Specifically, the application of 100 wet-dry cycles resulted in a more than 17% increase in the volume of water penetrated into the concrete.

By plotting a three-dimensional diagram and investigating the relationship between compressive strength and permeability parameters, it was revealed that higher compressive strength leads to a reduction in both the depth and volume of water penetration in concrete.

Under wet-dry conditions, the water penetration volume for concrete with a compressive strength of 28.8 MPa was measured at 20.5 mm, whereas this value decreased to 11.2 mm for concrete with a compressive strength of 48 MPa.





بررسی تأثیر شرایط تر و خشک شدن مداوم بر استقامت کانال آبی شهرستان ورزنه

علی صابری ورزنه^{۱*}، محمود نادری^۲

۱- پژوهشگر پسا دکترا، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (نویسنده مسئول) Ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir
۲- استاد، گروه عمران، دانشکده دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.529392.3498>

مقاله پژوهشی

چکیده

ارزیابی دوام کانال‌های آبرسانی، به‌ویژه در شرایط حاد محیطی مانند تر و خشک شدن، اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این، توسعه آزمون‌های درجا که امکان ارزیابی سریع و مقرون‌به‌صرفه سازه‌ها را بدون نیاز به تخریب بتن فراهم کند، دارای نقش حیاتی است. در این پژوهش اثرات شرایط تر و خشک مداوم بر نفوذپذیری بتن و عملکرد کانال آبرسانی شهر ورزنه بررسی شد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، از روش "محفظه استوانه‌ای" استفاده شد که قابلیت اندازه‌گیری درجا و غیرمخرب نفوذپذیری بتن را دارد. نتایج نشان داد که در اثر شرایط تر و خشک، نفوذپذیری بتن به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. برای شبیه‌سازی رفتار بدنه بتنی کانال، اقدام به ساخت نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه شد و تأثیر چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن مداوم بر نفوذپذیری بررسی شد. همچنین با استفاده از بررسی ریز ساختمانی بتن، تأثیر شرایط فوق بررسی شد. نتایج حاصله بیانگر افزایش نفوذپذیری بتن تحت شرایط تر و خشک شدن به مقدار حدود ۱۷ درصد بود که تأثیر به‌سزایی بر افت استحکام بدنه بتنی کانال داشت. همچنین با استفاده از نمودارهای سه‌بعدی، رابطه بین مقاومت فشاری با پارامترهای نفوذپذیری تعیین شد. عمل‌آوری مناسب نیز باعث کاهش حدود ۲۰ درصدی ترک‌های جمع‌شدگی بتن شد.

واژه‌های کلیدی:
چرخه‌های تر و خشک،
کانال، نفوذپذیری، بتن



دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۸
اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

صابری ورزنه، ع.، نادری، م.، ۱۴۰۴، بررسی تأثیر شرایط تر و خشک شدن مداوم بر استقامت مسیر آبی شهرستان ورزنه. آب و فاضلاب، ۳۶ (۱)، ۴۲-۲۴. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.529392.3498>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

نفوذپذیری به عنوان یک عامل اساسی در تعیین عملکرد و دوام بتن شناخته می‌شود. ورود مواد مضر از طریق شکاف‌ها و ترک‌های میکروسکوپی موجود، فرایندهای شیمیایی و فیزیکی مختلفی را به وجود می‌آورد که در نهایت موجب تغییرات عمده‌ای در ساختار بتن می‌شود (Yildirim and Özhan, 2023). در تعریف معمول، نفوذپذیری به حرکت سیالات در داخل منافذ بتن تحت فشار خارجی اطلاق می‌شود. مطابق با تعریفی که مؤسسه بتن آمریکا ارائه داده، نفوذپذیری توانایی بتن برای عبور سیالات از طریق شبکه منافذ مرتبط با یکدیگر است (ACI, 2018). عواملی چون تغییرات شدید دما (Shen et al., 2024)، فشار زیاد آب (Zhang et al., 2024) نفوذ مواد شیمیایی مضر مانند سولفات و کلرید (Zhou et al., 2024) و یا اثرات سیکل‌های انجماد و ذوب (Zeng et al., 2023) می‌توانند بر خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری بتن تأثیرات منفی بگذارند (Zhao et al., 2023).

سازه‌های بتنی در طول دوره بهره‌برداری، در معرض آسیب‌های ناشی از شرایط مختلف مانند چرخه‌های تر و خشک شدن قرار می‌گیرند (Ting et al., 2021). اعمال چرخه‌های مرطوب باعث افزایش حجم و انبساط بتن می‌شود، در حالی که چرخه‌های خشک موجب انقباض بتن می‌شوند. این تغییرات متناوب، باعث ایجاد تغییرات دائمی در شکل بتن می‌شوند (Wu et al., 2017). چرخه‌های تر و خشک شدید، سبب ایجاد و گسترش ترک‌های مویی به صورت پیوسته می‌شوند و فرایند تجمع یون‌های مهاجم را تسریع می‌کنند که در نهایت منجر به کاهش زمان عمر مفید سازه می‌شود (Qu et al., 2021). چندین عامل می‌تواند بر عملکرد طولانی مدت بتن تحت شرایط چرخه‌های تر و خشک تأثیر بگذارد (Gang et al., 2015)، از جمله مدت زمان چرخه‌های تر و خشک، تعداد چرخه‌ها و نحوه خشک شدن بتن (Chen et al., 2022).

برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در استانداردهای موجود، عمق نفوذ آب به عنوان شاخص نفوذپذیری بتن استفاده می‌شود. این روش‌ها به تجهیزات پیچیده و زمان زیاد نیاز دارند و تنها در آزمایشگاه قابل اجرا هستند. در استانداردهای بین‌المللی، نمونه بتنی تحت فشار آب قرار می‌گیرد و سپس در زیر جک شکسته می‌شود تا عمق نفوذ آب اندازه‌گیری شود. در این پژوهش از آزمون در جای محفظه استوانه‌ای برای اندازه‌گیری نفوذپذیری استفاده شد

(Naderi, 2010). این آزمون علاوه بر اندازه‌گیری عمق نفوذ، حجم نفوذ آب را نیز بدون نیاز به شکستن بتن اندازه‌گیری کرده و در محل سازه قابل اجرا است (Naderi and Kaboudan, 2021).

ارزیابی دقیق دوام سازه‌های بتنی موجود، به‌ویژه زمانی که در معرض شرایط محیطی شدید مانند چرخه‌های تر و خشک قرار دارند، اهمیت زیادی دارد. در این راستا، توسعه و به‌کارگیری روش‌های غیرمخرب و درجا که امکان ارزیابی سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه شرایط سازه را بدون نیاز به آسیب رساندن به آن فراهم می‌آورند، بسیار حیاتی است. این آزمون‌ها با ارائه داده‌های کمی و کیفی در مورد ویژگی‌های بتن و میزان آسیب‌های وارد شده، فرایند تصمیم‌گیری در خصوص برنامه‌های نگهداری، تقویت ایمنی و افزایش عمر مفید سازه‌ها را تسهیل می‌کنند.

پژوهش‌های زیادی در خصوص تأثیر شرایط تر و خشک بر بتن انجام شده است که عمدتاً بر استفاده از روش‌های مخرب برای اندازه‌گیری نفوذپذیری متمرکز بودند. این روش‌ها به طور سنتی شامل آزمون‌های شکستن نمونه‌های بتنی و ارزیابی عمق نفوذ آب تحت فشار هستند. در پژوهشی مشخص شد که چرخه‌های تر و خشک باعث افزایش عمق نفوذ آب در بتن می‌شود (Liu et al., 2025).

در پژوهشی دیگر مشخص شد که چرخه‌های تر و خشک باعث کاهش سرعت موج اعمالی به بتن شده که نشان‌دهنده شروع تخریب در بتن است (Saliba et al., 2024).

همچنین در چند سال اخیر، پژوهش‌ها به سمت توسعه روش‌های غیرمخرب برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در شرایط تر و خشک حرکت کردند. برخی از این روش‌ها با استفاده از دستگاه‌های غیرمخرب مانند امواج مغناطیسی هسته‌ای با فرکانس پایین، رادیوگرافی و تصویربرداری الکتریکی (Chen and Wang, 2021) یا روش‌های حرارتی (Liu et al., 2020b)، به ارزیابی ویژگی‌های بتن پرداخته‌اند. این روش‌ها نسبت به روش‌های مخرب مزایای زیادی دارند، از جمله توانایی اندازه‌گیری درجا و عدم نیاز به آسیب رساندن به سازه‌های موجود.

با این حال تمامی این روش‌ها یا مخرب هستند یا به صورت غیرمستقیم اقدام به ارزیابی دوام بتن می‌کنند. در این پژوهش، برای ارزیابی نفوذپذیری کانال آب‌رسانی و همچنین نمونه‌های بتنی در شرایط حاد تر و خشک، از آزمون درجا و غیرمخرب محفظه



شد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. همچنین مشخصات آب مصرفی در جدول ۳ قابل مشاهده است. دانه بندی سنگ دانه ها طبق استاندارد (ASTM-C136 (2019) انجام شده است (شکل ۱). چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲۵۱۰ و ۲۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب آنها نیز به ترتیب برابر ۲/۶ و ۳/۲ درصد به دست آمد.

۲-۲- اجرای سیکل های تر و خشک روی نمونه

چرخه های تر و خشک طبق استاندارد (GB/T50082 (2009) به این صورت انجام شد: ابتدا نمونه های بتنی به مدت ۴۸ ساعت در دمای 80 ± 5 درجه سلسیوس در گرم کن نگهداری شدند. سپس نمونه ها در محلول ۵ درصد سولفات سدیم به مدت ۱۵ ساعت قرار گرفتند. در حالی که دمای محلول باید بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس باشد و هر ماه باید محلول تعویض شود.

پس از آن، نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه از محلول خارج شده و ۱ ساعت در فضای آزاد قرار گرفتند. سپس به مدت ۶ ساعت در گرم کن با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و بعد از آن، ۲ ساعت برای خنک شدن رها شدند. این فرایند یک چرخه تر و خشک را کامل می کند.

۲-۳- آزمون محفظه استوانه ای

آزمون محفظه استوانه ای یکی از روش های دقیق و پرکاربرد برای اندازه گیری نفوذ پذیری بتن و سایر مصالح ساختمانی، هم در محیط آزمایشگاه و هم در محل پروژه است. برای آغاز آزمون، سطح بتن مورد نظر شکل ۲-a ارائه شده است. برای آغاز آزمون، سطح بتن مورد نظر کاملاً خشک شده و هرگونه آلودگی سطحی به طور کامل پاک سازی می شود. در مرحله بعد، یک رینگ فلزی به وسیله چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می شود. پس از سخت شدن چسب، دستگاه محفظه استوانه ای روی صفحه فلزی مذکور نصب می شود.

همچنین، میزان حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی را می توان توسط میکرومتر تعبیه شده در بخش فوقانی دستگاه و در بازه های زمانی مختلف اندازه گیری و ثبت کرد. مقدار حجم آب نفوذی (V) طبق معادله ۱ محاسبه می شود

استوانه ای استفاده شد. در پژوهش های قبلی، از این آزمون برای بررسی نفوذ پذیری بتن در آزمایشگاه استفاده شده است. در پژوهشی با استفاده از آزمون محفظه استوانه ای مقدار نفوذ پذیری بتن های حاوی افزودنی به صورت آزمایشگاهی استفاده شده است (Naderi et al., 2024). نتایج آزمون نشان دهنده کاهش مقدار نفوذ پذیری با افزودن مواد کاهنده نفوذ به بتن است. در پژوهشی دیگر با استفاده از آزمون فوق تأثیر اکسید گرافن بر نفوذ پذیری بتن ارزیابی شد که حاکی از تأثیر افزودنی فوق بر کاهش نفوذ پذیری است (Safarkhani and Naderi, 2023). در پژوهشی دیگر با استفاده از نتایج آزمون محفظه استوانه ای اقدام به حل تحلیلی معادله دو بعدی نفوذ شده که نتایج نشان دهنده دقت مناسب آزمون فوق است (Kaboudan et al., 2021). در کل در پژوهش های انجام شده نشان داده شده که دقت آزمون محفظه استوانه ای برای ارزیابی نفوذ پذیری بتن، مناسب است (Naderi and Kaboudan, 2020). در گذشته پژوهشی در خصوص بررسی دوام کانال آب ورزنه انجام نشده است که دلیل اصلی آن نیز نبود دستگاهی است که به صورت درجا و بدون نیاز به تخریب بتن، قابلیت اندازه گیری نفوذ پذیری را داشته باشد. بنابراین در این پژوهش با استفاده از آزمون محفظه استوانه ای، به صورت مستقیم اقدام به ارزیابی دوام کانال آب رسانی و نمونه های بتنی تحت شرایط حادتر و خشک شد. این روش علاوه بر اندازه گیری عمق نفوذ آب در بتن، توانایی اندازه گیری حجم آب نفوذ کرده در بتن در واحد زمان را دارد که همین امر باعث کاربرد دستگاه فوق به صورت درجا و بدون تخریب بتن می شود. در پژوهش های قبلی تماماً مقدار عمق نفوذ آب به عنوان معیاری برای اندازه گیری نفوذ پذیری بتن معرفی شده است، اما در این پژوهش مقدار حجم آب معادل نفوذ کرده در بتن تعیین و به عنوان معیار نفوذ پذیری بررسی شد. با این معیار می توان با دقت مناسب نسبت به ارزیابی درجای دوام سازه های بتنی اقدام کرد. همچنین با تحلیل ریز ساختاری بتن، تأثیر شرایط فوق بر نفوذ پذیری بتن بررسی شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح مصرفی

از سیمان پرتلند تیپ ۲ و آب قابل شرب برای ساخت بتن استفاده



جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ (برگرفته از مشخصات کارخانه سیمان آبیک)

Table 1. The chemical specifications of type 2 cement (derived from the specifications of Abik Cement Factory)

Chemical composition	LOI	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Weight (%)	1.89	3.20	1.99	0.26	0.74	62.44	4.81	21.05	3.84

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان تیپ ۲ (برگرفته از مشخصات کارخانه سیمان آبیک)

Table 2. Physical specifications of type 2 cement (derived from the specifications of Abik Cement Factory)

Final setting time (min)	Initial setting time (min)	Blaine fineness (cm ² /gr)	Autoclave expansion (%)	Compressive strength (MPa)			
				28-day	7-day	3-day	2-day
212	153	3081	0.21	49.2	33.3	20.8	16

جدول ۳- مشخصات آب مصرفی

Table 3. Specifications of consumed water

Water type	Water source	Temperature	pH
Drinking water	Drinking water from Qazvin city	25 °C	7

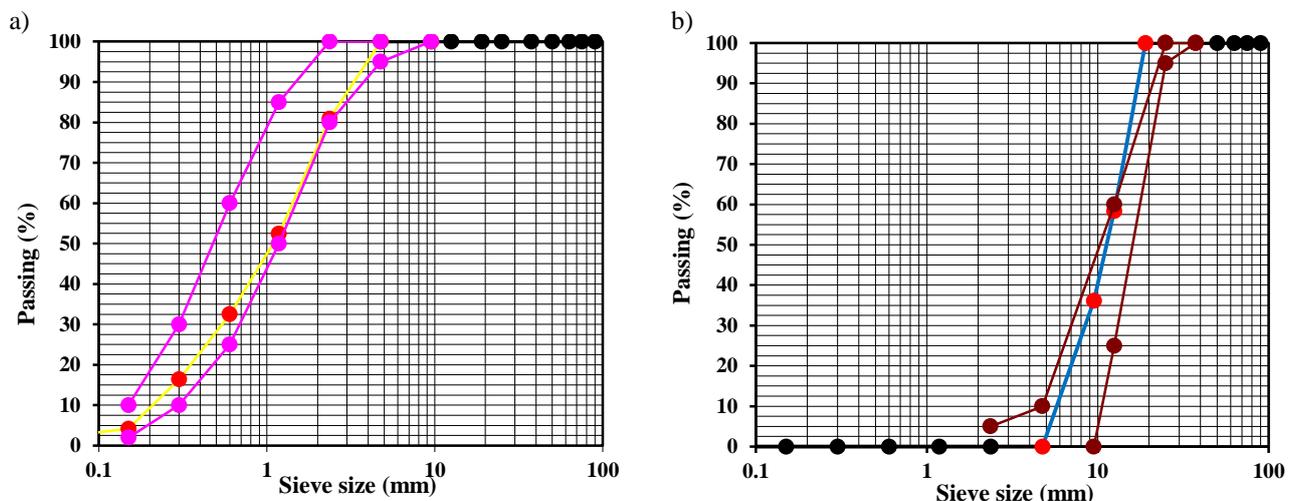


Fig. 1. Grading curves: a) fine and b) coarse

شکل ۱- نمودار دانه‌بندی: (a) ریزدانه و (b) درشت‌دانه

میکرومتر (میلی‌متر) و A سطح مقطع اعمال فشار (میلی‌متر مربع) است. سپس مطابق شکل ۲-b برای مقایسه آزمون محفظه استوانه‌ای با نتایج حاصل از آزمون BS-12390-8 (2019) نمونه به دو قسمت تقسیم شده و مقدار عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود.

$$V = h \times A \quad (1)$$

که در آن

V حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی (میلی‌متر مکعب)، h مقدار



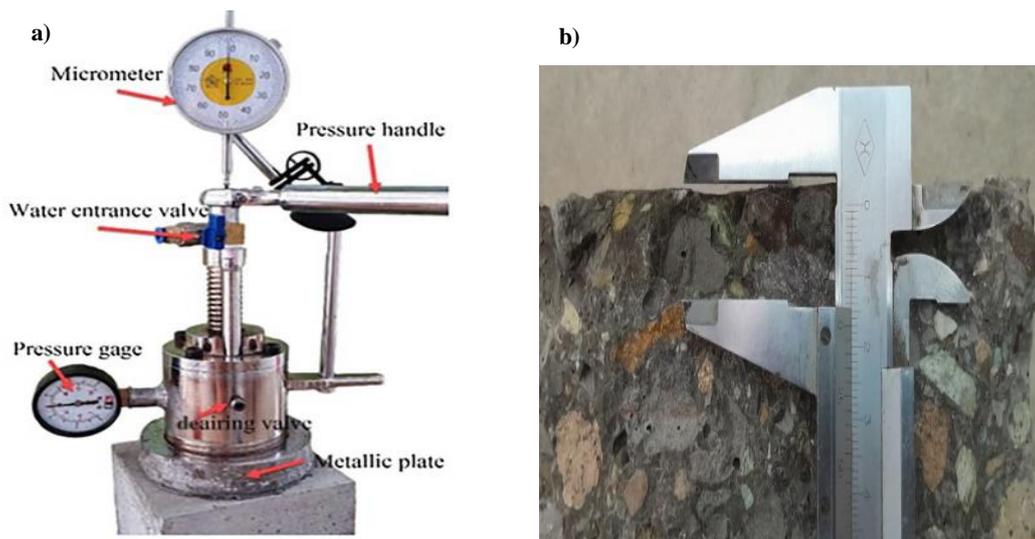


Fig. 2. Cylindrical chamber test: a) overview of the device and b) measurement of penetration depth

شکل ۲- آزمون محفظه استوانه‌ای: (a) نمای کلی دستگاه و (b) اندازه‌گیری عمق نفوذ

۲-۴- نسبت‌های اختلاط و روند انجام آزمون‌ها

نسبت‌های مخلوط نمونه‌های بتنی در جدول ۴ ارائه شده است. نسبت‌های داده شده برای طرح اختلاط‌ها بر اساس روش ملی طرح مخلوط بتن (BHRC, 2008) به صورت گام به گام به دست آمده است. البته در زمان ساخت بتن، سنگدانه‌ها در فضای آزاد به طور کامل خشک شده و آب خود را از دست داده‌اند. این در حالی است که برای تهیه بتن، سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک باید استفاده شود. به عبارت دیگر، زمانی که سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک^۲ در آیند، مقدار آب جذب شده توسط آنها به دقت قابل محاسبه است. در این پژوهش، نسبت‌های داده شده برای طرح اختلاط بر اساس سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک تنظیم شدند که این امر مطابق با استانداردهای مرسوم در طراحی مخلوط بتن بود. بنابراین مقدار جذب آب سنگدانه‌ها به صورت جداگانه محاسبه و در هنگام ساخت به بتن اضافه شد. بتن‌های استفاده شده در این پژوهش از رده‌های C25، C35 و C45 بود که به ترتیب با عنوان Mix1، Mix2 و Mix3 نامگذاری شد.

۲-۵- شرایط آزمایشگاه و محل تهیه مصالح

کلیه آزمایش‌های این پژوهش در یک آزمایشگاه مصالح ساختمانی

با توجه به استفاده از آزمون غیرمخرب محفظه استوانه‌ای برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی و کانال آب، مقایسه‌ای میان نتایج به دست آمده از این آزمون و روش تعیین عمق نفوذ آب انجام شده است.

قابلیت آزمایش در محل پروژه: آزمون استاندارد BS^۱ صرفاً به صورت آزمایشگاهی انجام می‌شود، در حالی که روش محفظه استوانه‌ای امکان اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن را به صورت درجا نیز فراهم می‌کند.

ماهیت غیرمخرب: در آزمون BS، نمونه بتن پس از انجام آزمایش تخریب می‌شود و امکان تکرار آزمون وجود ندارد، اما آزمون محفظه استوانه‌ای به دلیل ماهیت غیرمخرب خود، قابلیت انجام آزمایش‌های مکرر روی یک نمونه را دارد.

قابلیت حمل تجهیزات: تجهیزات مورد استفاده در آزمون BS عمدتاً غیرقابل حمل بوده و برای شرایط کارگاهی مناسب نیستند؛ در حالی که دستگاه محفظه استوانه‌ای سبک و به راحتی قابل جابه‌جایی است.

سرعت بالای ارزیابی: آزمون BS مستلزم صرف زمان حدود ۷۲ ساعت است، اما با روش محفظه استوانه‌ای می‌توان در مدت زمان کوتاه‌تری به نتایج مورد نظر دست یافت.

² Saturated Surface Dry (SSD)

¹ British Standard (BS)



جدول ۴- نسبت‌های مخلوط

Table 4. Mix ratios

Design number	Water ($\frac{Kg}{m^3}$)	Cement ($\frac{Kg}{m^3}$)	W/C	Sand ($\frac{Kg}{m^3}$)	Gravel ($\frac{Kg}{m^3}$)
Mix 1	211	381	0.55	879	699
Mix 2	198	440	0.45	862	686
Mix 3	191	516	0.37	838	667

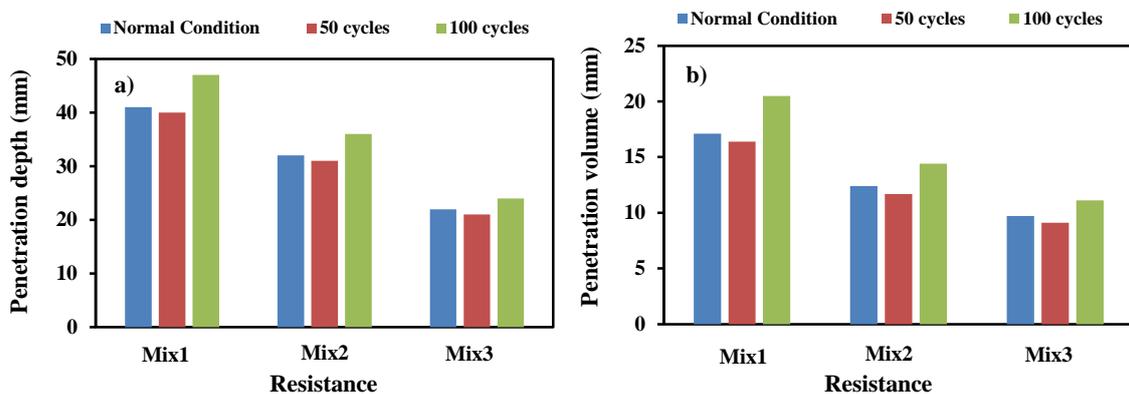


Fig. 3. Effect of Wet-Dry cycles on permeability: a) penetration depth and b) penetration volume

شکل ۳- تأثیر چرخه‌های تر و خشک بر نفوذپذیری: (a) عمق نفوذ و (b) حجم نفوذ

این تحلیل نه تنها عمق نفوذ آب در نمونه‌های مورد آزمون را در بر می‌گیرد، بلکه حجم کل آب نفوذی را نیز شامل می‌شود. بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها (مطابق با داده‌های ارائه شده در شکل ۳) نشان می‌دهد که قرار گرفتن نمونه‌های بتنی در معرض چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن، به‌طور محسوس باعث تغییر در میزان نفوذپذیری و خواص مکانیکی آنها می‌شود. نتیجه این بررسی می‌تواند در افزایش دوام سازه‌های بتنی که در معرض شرایط محیطی متناوب قرار دارند، نقش به‌سزایی داشته باشد.

در شکل ۳-a، میزان عمق نفوذ آب اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای برای نمونه‌های بتن با رده‌های مختلف مقاومت فشاری و پس از اعمال تعداد گوناگون چرخه‌های تر و خشک، نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۳-b، مقدار حجم نفوذیافته آب برای همین نمونه‌ها، تحت شرایط مشابه، ارائه شده است.

بر اساس داده‌های شکل ۳-a، افزایش مقاومت فشاری بتن موجب کاهش محسوس عمق نفوذ آب می‌شود؛ به‌طوری که عمق نفوذ برای بتن‌های Mix1، Mix2، و Mix3 به ترتیب ۴۱، ۳۲ و ۲۲ میلی‌متر است. این نتایج نشان می‌دهد بتن‌های با مقاومت بالا

مجهز انجام شد. آزمایشگاه مجهز به دستگاه‌های استاندارد موردنیاز برای انجام آزمون‌های مربوط به بتن، از جمله دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت، نفوذپذیری و سایر تجهیزات کنترل کیفیت مصالح بود. مصالح مصرفی شامل سیمان، شن و ماسه، مستقیماً از معادن و کارخانه‌های معتبر شهر قزوین تأمین شد و پیش از مصرف، از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ارزیابی شد تا مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی موردنیاز پژوهش باشند.

۳- تحلیل و تفسیر یافته‌ها

۳-۱- تحلیل نقش سیکل‌های تر و خشک شدن در تغییر

نفوذپذیری بتن

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، آزمون محفظه استوانه‌ای این امکان را فراهم می‌آورد که به‌طور هم‌زمان هر دو پارامتر کلیدی یعنی عمق نفوذ آب و حجم کل آب نفوذ کرده در بتن را به دقت اندازه‌گیری کند. این ویژگی، آزمون مذکور را به ابزاری جامع و مؤثر برای ارزیابی رفتار نفوذپذیری بتن در شرایط مختلف محیطی تبدیل کرده است. در این بخش، به بررسی دقیق تأثیر اعمال چرخه‌های متوالی تر و خشک بر خصوصیات نفوذپذیری بتن پرداخته می‌شود.



پایایی بتن مفید است، اما با گذشت زمان، این رسوبات که در روی سطح بتن تجمع کرده و متراکم شده است، موجب تخریب بتن می‌شود که این موضوع به پایایی بتن آسیب وارد می‌کند.

چرخه‌های ابتدایی تر و خشک شدن باعث کاهش حجم و عمق نفوذ در نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه شاهد می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلایل مختلفی مرتبط باشد که در اینجا به توضیح علمی این پدیده پرداخته شده است.

۳-۱-۱- تأثیر سیکل‌های تر و خشک بر تغییرات ساختار میکروسکوپی بتن

در فرایندهای تر و خشک شدن مداوم، چرخه‌ها می‌توانند موجب تغییرات ساختاری در بتن شوند. با هر سیکل تر و خشک، حجم آب موجود در منافذ میکروسکوپی بتن تغییر می‌کند و این تغییرات می‌تواند منجر به بازسازی ساختار میکروسکوپی بتن شود. در اثر این سیکل‌ها، خصوصاً در ابتدا، منافذ کوچکتر و شبکه‌های میکروسکوپی به هم فشرده‌تر می‌شوند که ممکن است باعث کاهش عمق نفوذ آب و در نتیجه کاهش نفوذپذیری شود. به عبارت دیگر، در شروع سیکل‌های تر و خشک، به دلیل انقباض و انبساط سطحی بتن، حجم و عمق نفوذ کاهش می‌یابد.

۳-۱-۲- اثر آب‌بندی ناشی از افزایش ترکیبات هیدراته بتن

با گذشت سیکل‌های تر و خشک، امکان افزایش میزان هیدراسیون در بتن نیز وجود دارد. این امر به‌ویژه در بتن‌های با سیمان پرتلند می‌تواند سبب کاهش نفوذپذیری شود. در ابتدای سیکل‌های تر و خشک، ممکن است آب موجود در منافذ بتن به جز برخی از منافذ بزرگ، به سمت منافذ کوچکتر و ریزتر منتقل شود و موجب آب‌بندی و افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب شود؛ بنابراین، عمق نفوذ در نمونه‌هایی که تحت سیکل‌های اندک تر و خشک قرار گرفته‌اند، می‌تواند کاهش یابد.

به طور کلی، روند تغییرات حجم نفوذ آب در بتن تحت تأثیر سولفات دو مرحله اصلی را شامل می‌شود. در مرحله نخست، حجم نفوذ کاهش می‌یابد که این امر عمدتاً به دلیل نفوذ یون‌های سولفات سدیم و واکنش آن با ترکیبات سیمان، منجر به تشکیل محصولات فرسایشی و پر شدن منافذ داخلی بتن می‌شود. این فرایند باعث مسدود شدن بخشی از راه‌های نفوذ و کاهش موقت حجم نفوذ آب

به دلیل ساختار متراکم‌تر، نفوذپذیری کمتری دارند. با این حال، پس از اعمال ۱۰۰ چرخه تر و خشک، عمق نفوذ آب در تمامی نمونه‌ها افزایش یافته که درصد این افزایش در بتن‌های با مقاومت کمتر بیشتر است.

شکل ۳-b نیز افزایش قابل توجهی را در حجم نفوذ آب پس از سیکل‌های تر و خشک نشان می‌دهد که این افزایش برای بتن‌های با مقاومت پایین‌تر، شدیدتر بوده است. دلیل این امر آن است که افزایش اندک در عمق نفوذ آب منجر به رشد قابل توجه حجم آب نفوذی می‌شود. در نتیجه، اثرگذاری چرخه‌های تر و خشک بر بتن‌های ضعیف‌تر چشمگیرتر و حساسیت آن‌ها نسبت به تخریب محیطی بیشتر است. این نتایج لزوم توجه به دوام بتن در شرایط متناوب تر و خشک، به‌ویژه برای بتن‌های رده پایین را تأکید می‌کند.

افزون بر این، در بتن‌های با ساختار متراکم‌تر، نفوذ یون‌های سولفات و صدمات ناشی از چرخه‌های تر و خشک کندتر اتفاق می‌افتد، اما در شرایط تداوم سیکل‌ها پدیده‌هایی مانند ترک خوردگی، پوسته‌پوسته شدن و کاهش جرم نیز رخ می‌دهد که در بتن‌های ضعیف‌تر زودتر و شدیدتر بروز می‌کند. بنابراین، اهمیت مقاوم‌سازی و انتخاب بتن مناسب برای شرایط نامساعد محیطی بسیار زیاد است.

با افزایش چرخه‌های تر و خشک و ورود محصولات آسیب‌زنده (SO_4^{2-}) به داخل بتن، چگالی نمونه‌های بتن تا حدی افزایش پیدا می‌کند. زمانی که ناحیه آسیب دیده نتواند مقدار رشد تنش کریستال موجود را تحمل کند، ترک‌های ریز جدیدی ایجاد می‌شود که موجب تجمع محصولات انبساطی شده و بتن دچار آسیب می‌شود. سپس بتن به‌صورت تدریجی به سمت تخریب می‌رود (Rodriguez-Navarro et al., 2000).

SO_4^{2-} یون مهاجمی است که از محلول به داخل بتن نفوذ می‌کند و موجب ایجاد تعاملات فیزیکی و شیمیایی شده که در نتیجه اترینگیت و گچ تولید شده که این تولیدات باعث تخریب تدریجی بتن می‌شود (Guo et al., 2019)، اما با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که چرخه‌های پایین تر و خشک باعث کاهش مقدار نفوذپذیری بتن شده است؛ زیرا در ابتدا منافذ ریز و درشت موجود در سطح بتن کاهش پیدا می‌کند که موجب کاهش مقدار نفوذپذیری و افزایش مقدار مقاومت بتن می‌شود که البته این موضوع برای



خواهد شد.

در مرحله دوم، با ادامه واکنش‌های شیمیایی، محصولات فرسایشی مانند اترینگیت و گچ به تدریج افزایش یافته و خاصیت انبساطی آن‌ها منجر به فشردگی دیواره‌های منافذ و ایجاد ترک در ساختار بتن می‌شود. با افزایش محصولات سولفاتی در طول زمان، این ترک‌ها گسترش یافته و در نهایت موجب افزایش حجم نفوذ آب می‌شوند (Liu et al., 2020a)؛ بنابراین، ابتدا کاهش و سپس افزایش حجم نفوذ، منعکس‌کننده تغییرات ریزساختاری بتن تحت تأثیر محصولات انبساط‌پذیر ناشی از حمله سولفاتی است.

۲-۳- رابطه مقاومت فشاری با پارامترهای نفوذپذیری

شکل ۴ نمودار سه‌بعدی را نشان می‌دهد که رابطه بین مقاومت فشاری بتن (برحسب مگاپاسکال) و دو شاخص نفوذپذیری عمق نفوذ (میلی‌متر) و حجم نفوذ آب (میلی‌لیتر) را به تصویر می‌کشد. این سطوح با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره استخراج شده‌اند و هدف آن‌ها تحلیل تأثیر نفوذپذیری بر مقاومت فشاری و ارزیابی هم‌بستگی میان این متغیرها است. در شکل ۴، نمودار سه‌بعدی مربوط به بتن نمایش داده شده و

سطح برازش‌یافته با معادله ۲ تعریف می‌شود

$$Z = 69.63 - 0.43x - 1.14y \quad (2)$$

که در آن

x عمق نفوذ (میلی‌متر)، y حجم نفوذ (میلی‌لیتر) و z مقاومت فشاری (مگاپاسکال) است.

ضرایب منفی بیانگر آن هستند که افزایش عمق یا حجم نفوذ با کاهش مقاومت فشاری همراه است. این موضوع نشان می‌دهد که ورود رطوبت تأثیر منفی بر مقاومت بتن دارد.

در جدول ۵ مقدار مقاومت فشاری و حجم آب نفوذ کرده در بتن‌های مختلف قابل مشاهده است. جدول ارائه شده، تأثیر مقاومت بتن را بر حجم نفوذ آب در دو شرایط تر و خشک و عادی و همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نشان می‌دهد. با بررسی داده‌ها مشخص می‌شود که با افزایش رده مقاومتی بتن، یعنی از Mix1 به Mix3، مقاومت فشاری به صورت چشم‌گیری افزایش یافته و از ۲۸/۸ به ۴۸ مگاپاسکال رسیده است. هم‌زمان، حجم نفوذ آب چه در شرایط تر و خشک و چه در شرایط عادی، کاهش

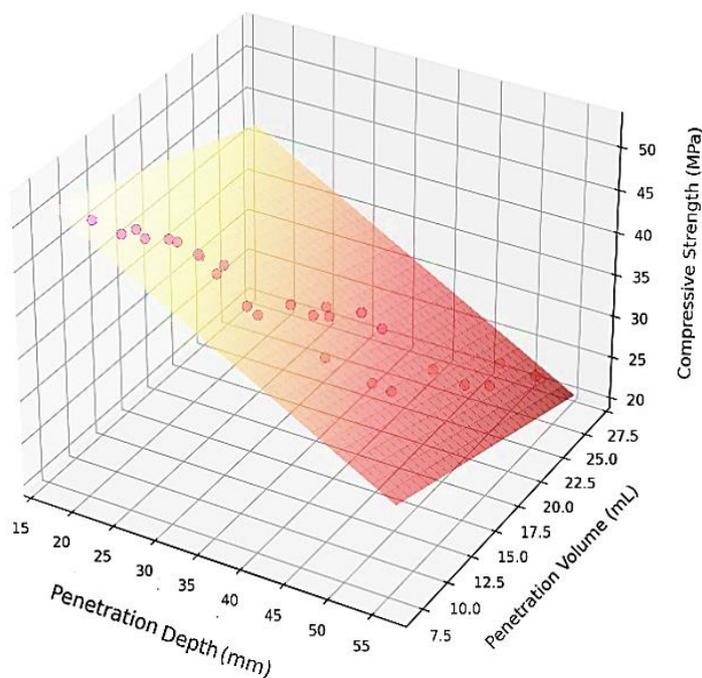


Fig. 4. Analysis of the correlation between parameters

شکل ۴- تحلیل هم‌بستگی بین پارامترها



جدول ۵- مقدار مقاومت فشاری و حجم آب نفوذ کرده در بتن

Table 5. Compressive strength values and volume of water penetration in concrete

Type	28 Day compressive strength (MPa)	Volume of water penetration under normal conditions (ml)	Volume of water penetration under wet and dry conditions (ml)
Mix 1	28.8	17.1	20.5
Mix 2	40.6	12.4	14.4
Mix 3	48	9.7	11.2

جدول ۶- درصد جمع شدگی بتن در سنین مختلف

Table 6. Concrete shrinkage percentage at different ages

Curing (day)	Shrinkage test age (%)					
	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	42 Days	90 Days
Free space	0.109	0.143	0.171	0.194	0.204	0.217
7 Days	0.052	0.085	0.122	0.151	0.163	0.175

بر اساس داده‌های جدول ۶، میزان جمع شدگی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب پس از ۹۰ روز برابر با ۰/۱۷۵ درصد و این مقدار برای نمونه‌های بدون عمل‌آوری (نگهداری شده در هوای آزاد) ۰/۲۱۷ درصد اندازه‌گیری شد. به عبارت دیگر، عمل‌آوری مرطوب باعث کاهش جمع شدگی به میزان حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون عمل‌آوری شده است. این نتایج نشان می‌دهد که رهاسازی نمونه‌ها در فضای آزاد، منجر به افزایش محسوس جمع شدگی می‌شود. به طور کلی، افزایش جمع شدگی به‌ویژه در سنین ابتدایی بتن، عمدتاً به دلیل از دست رفتن سریع رطوبت است (Saberi Varzaneh and Naderi, 2021). پژوهش‌های پیشین نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند؛ به عنوان مثال، در پژوهشی نشان داده شده است که خروج سریع آب از منافذ مویینه سیمان هیدراته شده، منجر به کاهش آب جذب سطحی و در نهایت افزایش جمع شدگی بتن می‌شود (Naderi and Saberi Varzaneh, 2020).

در شکل ۵ نیز ترک خوردگی در سطح بتن بدنه کانال قابل مشاهده است که می‌تواند به دلیل عمل‌آوری نامناسب یا عدم عمل‌آوری بتن بدنه کانال در هنگام گیرش سیمان رخ داده باشد.



Fig. 5. Cracking in concrete channel body

شکل ۵- ترک خوردگی در بتن بدنه کانال

قابل توجهی پیدا کرده است. به طور مثال، حجم نفوذ آب در شرایط تر و خشک برای بتن با مقاومت فشاری ۲۸/۸ مگاپاسکال معادل ۲۰/۵ میلی‌لیتر است که این مقدار برای بتن با مقاومت فشاری ۴۸ مگاپاسکال به ۱۱/۲ میلی‌لیتر کاهش یافته است.

کاهش حجم نفوذ آب با افزایش مقاومت فشاری، ارتباط مستقیم با فشردگی و ریزساختار بهتر بتن‌های با مقاومت فشاری بالاتر دارد (Alyami et al., 2024). به طوری که بتن‌های با مقاومت فشاری بیشتر، با داشتن تراکم بیشتر و منافذ کمتر یا کوچکتر، مسیرهای کمتری برای عبور آب فراهم می‌کنند و این امر منجر به کاهش قابل توجه نفوذپذیری در برابر آب می‌شود (He et al., 2024). به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت فشاری بتن، علاوه بر بالا بردن دوام و تحمل بار، اثر قابل توجهی بر کاهش نفوذپذیری آب چه در شرایط محیطی عادی و چه تحت چرخه‌های رطوبتی دارد.

۳-۳- تأثیر عمل‌آوری بر ترک‌های جمع شدگی

واضح است که بتن، به‌ویژه در سنین اولیه، تحت تأثیر جمع شدگی ناشی از خشک شدن قرار می‌گیرد. جدول ۶ داده‌های مربوط به تغییرات جمع شدگی بتن در بازه‌های زمانی مختلف را ارائه می‌دهد. در این آزمایش‌ها، بخشی از نمونه‌ها از ابتدای ساخت در شرایط محیطی (هوای آزاد) قرار گرفتند، در حالی که گروه دیگری از نمونه‌ها تحت عمل‌آوری در آب بودند. شایان ذکر است که اندازه‌گیری جمع شدگی بتن در روزهای ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ انجام شد (جدول ۶).



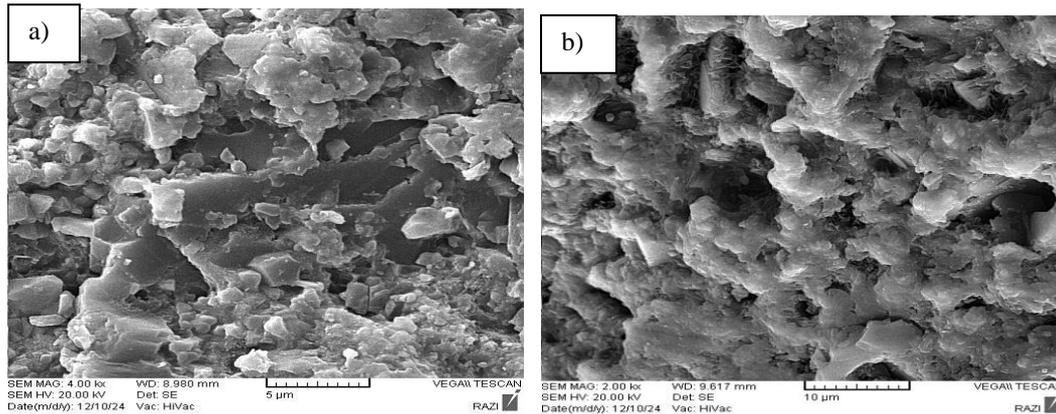


Fig. 6. Effect of severe conditions on porosity: a) normal condition and b) wet-dry condition

شکل ۶- تأثیر شرایط حاد بر تخلخل: (a) شرایط عادی و (b) شرایط حادتر و خشک

باعث باقی ماندن یک ناحیه مرزی متخلخل در بتن می شود و در نهایت موجب کاهش مقاومت در برابر حملات شیمیایی شده و سایر آسیب های مشابه می شود (Alexander et al., 2017).

۳-۵- ارزیابی درجای نفوذپذیری کانال آب

پیش از به کارگیری آزمون محفظه استوانه ای به صورت درجا، لازم است از دقت مناسب نتایج آن اطمینان حاصل شود. برای این منظور، رابطه بین نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه ای و روش تعیین عمق نفوذ آب با استفاده از تحلیل رگرسیون و رسم نمودار (شکل ۷) بررسی شد. نتایج نشان می دهد که بین این دو روش، رابطه خطی قوی با ضریب همبستگی 0.98 برقرار است که بیانگر دقت و قابلیت اعتماد بالای آزمون محفظه استوانه ای در ارزیابی نفوذپذیری بتن است؛ بنابراین، این آزمون می تواند به عنوان روشی قابل اتکا برای اندازه گیری نفوذپذیری درجای سازه های بتنی استفاده شود.

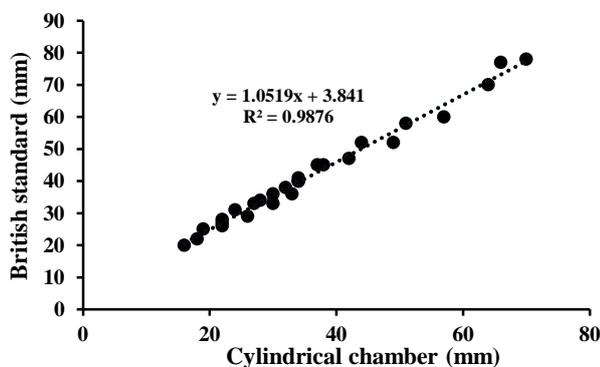


Fig. 7. Relationship between different methods

شکل ۷- ارتباط بین روش های مختلف

۳-۴- بررسی ریزساختار بتن

در این بخش نتایج حاصل از عکس برداری SEM^۱ قابل مشاهده است. نمونه های بتنی تحت عمل آوری معمولی و نمونه های قرار گرفته تحت 100 چرخه حادتر و خشک مقایسه شدند. در شکل ۶ تأثیر شرایط حادتر و خشک بر تخلخل بتن نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود تخلخل موجود در بتن بر اثر اعمال شرایط حادتر و خشک دچار افزایش شده که این موضوع سبب افزایش مقدار نفوذپذیری بتن شده است. کاهش مقدار عمق نفوذ در مقاومت های بالاتر، نشانگر پیشرفت و توسعه بیشتر محصولات هیدراسیون است که منجر به یک ساختار متراکم تر می شود. افزایش مقاومت فشاری به حجم و نوع محصولات هیدراسیون تشکیل شده وابسته است، بنابراین به واکنش های میان ترکیبات جامد و مایع برمی گردد (Teriqet et al., 2019). توسعه روند هیدراسیون سیمان باعث پر شدن منافذ و فضاهای خالی داخلی بتن توسط محصولات هیدراسیون می شود. روند سخت شدگی و متراکم شدن بتن بلافاصله پس از ریختن بتن در قالب آغاز شده و در طی این روند، هیدراسیون باعث به هم چسبیدن سنگدانه های بتن می شود (Siddiqui et al., 2013). عدم وجود رطوبت کافی در سطح بتن، موجب خشک شدن بتن و افزایش منافذ ریز می شود که در نتیجه، باعث هیدراسیون ناقص و کاهش مقدار مقاومت فشاری و افزایش عمق نفوذ می شود (Springenschmid, 2007). همچنین عدم وجود رطوبت کافی،

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)



باید رابطه بین حجم و عمق نفوذ آب در بتن تعیین شود. این رابطه امکان برآورد حجم نفوذ آب و در نتیجه، ارزیابی نفوذپذیری بتن را بدون نیاز به شکست نمونه فراهم می‌سازد.

استاندارد (DIN 1048-5 (1991) محدوده‌هایی را برای ارزیابی نفوذپذیری بر اساس عمق نفوذ آب در نظر گرفته است؛ به نحوی که عمق نفوذ کمتر از ۳۰ میلی‌متر بیانگر نفوذپذیری کم و بیش از ۶۰ میلی‌متر نشان‌دهنده نفوذپذیری زیاد است. در همین راستا، با استفاده از داده‌های جدول ۷، حجم معادل آب نفوذ کرده برای هر رده مشخص شده است: حجم کمتر از ۱۲ میلی‌لیتر به‌عنوان نفوذپذیری پایین و بیش از ۲۵ میلی‌لیتر به‌عنوان نفوذپذیری بالا در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از رابطه بین حجم و عمق نفوذ آب به‌دست آمده از آزمون محفظه استوانه‌ای، نفوذپذیری کانال آبرسانی شهر ورزنه به‌صورت درجا اندازه‌گیری شد.

شهر ورزنه در شرق استان اصفهان و در حاشیه تالاب بین‌المللی گاوخونی واقع شده است. کانال آبرسانی ورزنه به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی مدیریت منابع آب این منطقه، وظیفه انتقال آب از رودخانه زاینده‌رود به اراضی کشاورزی و سایر مصارف شهری را بر عهده دارد. این کانال با طول قابل توجه و ساختار عمدتاً بتنی، نقش مهمی در تأمین آب منطقه ایفا می‌کند. با توجه به اقلیم خشک و کم‌آب ورزنه و اهمیت جلوگیری از هدررفت آب در مسیرها، بررسی وضعیت نفوذپذیری و کارایی بدنه بتنی این کانال اهمیت ویژه‌ای دارد. انتخاب این محل به‌دلیل چالش‌های موجود در تأمین آب و نیاز به ارتقای بهره‌وری سامانه انتقال آب انجام شده است.

در شکل ۹ نمونه‌ای از آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. مطابق داده‌های به‌دست آمده، نفوذپذیری بتن کانال ورزنه بسیار بالا (بیش از ۲۵ میلی‌لیتر) بوده که نشان‌دهنده هدررفت قابل توجه آب و ناکارآمدی بدنه بتنی کانال است. این موضوع در کنار تبخیر سطحی، باعث کاهش چشمگیر آب منتقل شده به شهر نسبت به آب ورودی به کانال شده است که اصلاح بدنه بتنی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش این تلفات ایفا کند. شایان ذکر است، روش نوین محفظه استوانه‌ای این امکان را فراهم کرده تا بدون نیاز به مغزه‌گیری و آسیب به سازه، نفوذپذیری بتن به‌صورت دقیق و درجا ارزیابی شود.

با توجه به شکل ۷، رابطه خطی به‌دست آمده بین نتایج حاصل از آزمون استاندارد و آزمون درجا برابر معادله ۳ است

$$y = 1.0519x + 3.841 \quad (3)$$

که در آن

x نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای و y نتایج حاصل از آزمون استاندارد است. با توجه به ضریب هم‌بستگی بالا بین پارامترهای مذکور، می‌توان با دقت مناسب و با انجام آزمون محفظه استوانه‌ای مقدار عمق نفوذ آب در بتن را به‌صورت درجا اندازه‌گیری کرد.

برای ارزیابی برازش مدل رگرسیون خطی بین نتایج آزمایش محفظه استوانه‌ای و روش استاندارد BS مجموعه‌ای از ابزارهای آماری به‌کار گرفته شد. نمودار رگرسیون (شکل ۸) نشان‌دهنده یک رابطه خطی قوی بین دو روش آزمایش است. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر مدل و بررسی مفروضات آماری، نمودار باقیمانده‌ها ترسیم شدند. نمودار باقیمانده‌ها (شکل ۴) توزیعی تصادفی حول محور صفر را نشان می‌دهد که بیانگر رعایت مفروضات خطی بودن و یکنواختی واریانس باقیمانده‌ها (هم‌واریانس) است. عدم وجود هرگونه الگو یا روند سیستماتیک در نمودار باقیمانده‌ها، صحت به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی را بیشتر تأیید می‌کند.

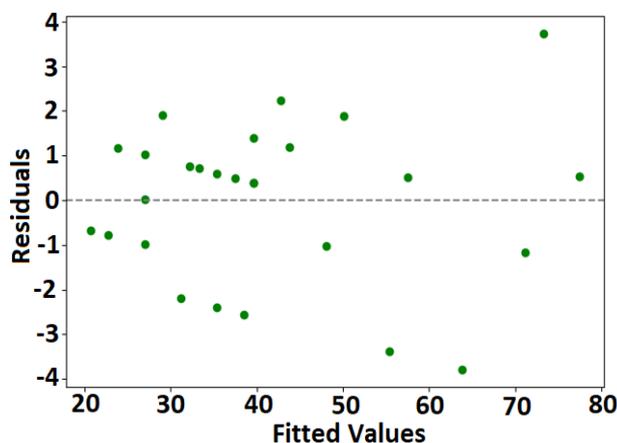


Fig. 8. Residuals plot

شکل ۸- نمودار باقیمانده‌ها

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، آزمون محفظه استوانه‌ای بدون تخریب نمونه، امکان اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن را فراهم می‌کند. برای سنجش این ویژگی به‌صورت درجا در سازه‌های بتنی، ابتدا



جدول ۷- تعیین حجم نفوذ آب

Table 7. Determination of water penetration volume

Low		High	
Depth of penetration (mm)	Volume of penetration (ml)	Depth of penetration (mm)	Volume of penetration (ml)
16	7.1	61	25.2
18	7.7	64	27.3
28	11.9	92	43
Less than 30 mm	Less than 12 ml	Greater than 60 mm	Greater than 25 ml

نفوذپذیری بتن، می‌تواند به بهبود مدیریت و بهره‌برداری از این سازه‌ها کمک کند. در این پژوهش، اثر چرخه‌های تر و خشک بر نفوذپذیری بتن و عملکرد کانال آبرسانی شهر ورزنه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که خشک‌سالی‌های اخیر موجب افزایش آسیب‌پذیری و کاهش کارایی بدنه بتنی کانال شده و منجر به هدررفت قابل توجه آب شده است. همچنین، ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و حرارت در زمان گیرش بتن و سایر عوامل محیطی، سهم زیادی در کاهش دوام و افزایش نشست آب دارند که در بررسی‌های میدانی مستندسازی شده‌اند. با توجه به ماهیت مخرب و صرفاً آزمایشگاهی بودن عمده آزمون‌های استاندارد، در این پژوهش روش محفظه استوانه‌ای به عنوان یک آزمون غیرمخرب و قابل اجرا به صورت درجا برای سنجش نفوذپذیری بتن استفاده شد.

در ابتدا برای بررسی دقت آزمون محفظه استوانه‌ای، نتایج حاصل از این آزمون با نتایج به دست آمده از آزمون مخرب آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به ضریب هم‌بستگی بالا بین نتایج حاصله (۹۸ درصد)، بنابراین اطمینان حاصل شد که آزمون محفظه استوانه‌ای قادر به ارزیابی نفوذپذیری سازه‌های بتنی به صورت درجا است. برای انجام این کار از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد و به منظور ارزیابی دقیق‌تر مدل و بررسی مفروضات آماری، نمودار باقیمانده‌ها ترسیم شدند.

سپس نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شد و با استفاده از آزمون فوق، هم مقدار عمق نفوذ آب و هم مقدار حجم نفوذ آب در بتن تحت شرایط حاد تر و خشک بررسی شد. نتایج حاصله بیانگر افزایش نفوذپذیری بتن تحت شرایط تر و خشک شدن مداوم به مقدار حدود ۱۷ درصد بود که تأثیر به‌سزایی بر افت استحکام بدنه بتنی کانال داشت. پس از آن تأثیر شرایط حاد تر و خشک و همچنین تأثیر عمل‌آوری بر ترک‌های جمع‌شدگی روی بتن با استفاده از



Fig. 9. In-situ evaluation

شکل ۹- ارزیابی درجا

۳-۶- جمع‌بندی و پیشنهادها

در این پژوهش با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای، به صورت مستقیم اقدام به ارزیابی دوام کانال آبرسانی و نمونه‌های بتنی تحت شرایط حاد تر و خشک شد. برای این کار ابتدا نمونه‌های بتنی با رده‌های مقاومتی مختلف تهیه شد. سپس تحت شرایط معمولی و چرخه‌های حاد تر و خشک قرار گرفت. آزمون‌های نفوذپذیری و مقاومت فشاری روی آن‌ها انجام شد. با توجه به نتایج حاصله، اقدام به بررسی نفوذپذیری کانال آبرسانی مذکور شد.

ارزیابی دوام کانال‌های آبرسانی، به‌ویژه تحت شرایط محیطی سخت همچون چرخه‌های متوالی تر و خشک، اهمیت زیادی دارد. توسعه روش‌های غیرمخرب و درجا برای سنجش سریع و اقتصادی



بتن به مقدار بیش از ۱۷ درصد شده است.

- با رسم نمودار سه بعدی و بررسی رابطه مقاومت فشاری با پارامترهای نفوذپذیری مشخص شد که با افزایش مقاومت مقدار عمق و حجم نفوذ آب به داخل بتن کاهش یافته است.

- حجم نفوذ آب در شرایط تر و خشک برای بتن با مقاومت فشاری ۲۸/۸ مگاپاسکال معادل ۲۰/۵ میلی لیتر است که این مقدار برای بتن با مقاومت فشاری ۴۸ مگاپاسکال به ۱۱/۲ میلی لیتر کاهش یافته است.

- شرایط تر و خشک شدن مداوم کانال آب رسانی شهر ورزنه باعث اعمال آسیب به بدنه کانال شده و مقدار نفوذپذیری را افزایش داده است. مقدار حجم آب نفوذ کرده در نقاط مختلف بدنه کانال آب رسانی ورزنه بالای ۲۵ میلی لیتر است که در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد.

- میزان جمع شدگی نمونه های عمل آوری شده در آب پس از ۹۰ روز برابر با ۰/۱۷۵ درصد و این مقدار برای نمونه های بدون عمل آوری (نگهداری شده در هوای آزاد) ۰/۲۱۷ درصد اندازه گیری شده است. به عبارت دیگر، عمل آوری مرطوب باعث کاهش جمع شدگی به میزان حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه های بدون عمل آوری شده است.

- با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، حجم آب نفوذ کرده در بتن که بیش از ۲۵ میلی لیتر باشد به عنوان بتن با نفوذپذیری بالا در نظر گرفته می شود.

- بر اساس تحلیل رگرسیونی انجام شده، بین نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه ای و روش تعیین عمق نفوذ آب، ارتباط خطی قوی با ضریب همبستگی ۰/۹۸ مشاهده شد. این همبستگی بالا، دقت و اعتبار روش محفظه استوانه ای را در ارزیابی نفوذپذیری بتن تأیید می کند.

۵- قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۰۴۰۹ انجام شد.

آزمایش جمع شدگی و عکس برداری SEM بررسی شد. نتایج حاصله بیانگر کاهش حدود ۲۰ درصدی جمع شدگی نمونه تحت عمل آوری مناسب است. همچنین نمودارهای سه بعدی برای بررسی رابطه بین مقاومت فشاری با پارامترهای نفوذپذیری ترسیم شد که بیانگر افزایش نفوذپذیری با کاهش مقاومت فشاری بتن است.

برای انجام آزمون درجا روی کانال آب، مقدار معادل حجم آب نفوذ کرده در بتن بر اساس عمق نفوذ آب تعیین شد. سپس آزمون محفظه استوانه ای روی بتن بدنه کانال آب استفاده شد و نتایج نشان داد که بتن بدنه کانال دارای نفوذپذیری زیادی است (بیش از ۲۵ میلی لیتر) که باعث هدر رفتن زیاد آب می شود.

در انتها پیشنهاد می شود علاوه بر ارزیابی نفوذپذیری بتن بدنه کانال آب، با استفاده از آزمون های درجا مقدار مقاومت فشاری آن نیز بررسی و مشخص شود که تأثیر شرایط حاد محیطی چه اثری روی مشخصات مکانیکی آن گذاشته است. همچنین پیشنهاد می شود مطالعه جامعی برای مقاوم سازی و افزایش دوام بتن بدنه کانال انجام شود و به صورت عملی اقدام به اصلاح آن شود.

همچنین عوامل دیگری مانند ترک های ایجاد شده در جدار کانال بتنی، ناشی از افت و حرارت بتن هنگام گیرش و شرایط محیطی کانال نیز می توانند نقش مهمی در هدررفت آب ایفا کنند که لازم است بررسی شوند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از آزمون محفظه استوانه ای، به صورت مستقیم اقدام به ارزیابی دوام کانال آب رسانی و نمونه های بتنی تحت شرایط حاد تر و خشک شد. برای این کار ابتدا نمونه های بتنی با رده های مقاومتی مختلف تهیه شد. سپس تحت شرایط معمولی و چرخه های حاد تر و خشک قرار گرفت. آزمون های نفوذپذیری و مقاومت فشاری روی آن ها انجام شد. با توجه به نتایج حاصله، اقدام به بررسی نفوذپذیری کانال آب رسانی مذکور شد.

- با افزایش تعداد چرخه های حاد تر و خشک، آسیب وارده به بتن بیشتر شده و مقدار نفوذپذیری بتن افزایش یافته است، به گونه ای که اعمال ۱۰۰ چرخه تر و خشک باعث افزایش مقدار حجم نفوذ در



References

- 12390-8.; B.S. 2019. *Testing Hardened Concrete: Depth of Penetration of Water under Pressure*. British Standards Institution London, UK.
- ACI-18, 2018. *Concrete Terminology*, American Concrete Institute, Farmington Hills. USA.
- Alexander, M., Bentur, A. and Mindess, S., 2017. *Durability of Concrete: Design and Construction 20*. 1st Edition. ISBN 9781138746749. CRC Press. Boca Raton, London, New York. <https://doi.org/10.1201/9781315118413>.
- Alyami, Y., Ferreira, D. and Castro-Gomes, J., 2024. Relationships between density, porosity, compressive strength, and permeability of cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 25, e024264. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e024264>.
- ASTM C136-19. 2019. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. [Link]
- Building and Housing Research Center (BHRC), 2008. *The National Method for Concrete Mix Design*. Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Chen, L. and Wang, Z., 2021. Non-destructive testing for evaluating concrete permeability: a review of techniques and applications. *Construction and Building Materials*, 265, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120130>.
- Chen, L., Zhang, Y. and Wu, Z., 2022. Impact of drying-wetting cycles on the mechanical properties and permeability of concrete: a comprehensive study. *Cement and Concrete Research*, 149, 106526. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106526>.
- DIN 1048-5. 1991. *In Testing Concrete: Testing of Hardened Concrete (Specimens Prepared in Mould)*. Germany. [Link]
- Gang, X., Yun-pan, L., Yi-biao, S. and Ke, X., 2015. Chloride ion transport mechanism in concrete due to wetting and drying cycles. *Structural Concrete*, 16(2), 289-296. <https://doi.org/10.1002/suco.201400035>.
- GB/T50082. 2009. *Standard for Test Methods of Long-Term Performance and Durability of Ordinary Concrete*. China Architecture and Building Press, Beijing (China).
- Guo, J. J., Wang, K., Guo, T., Yang, Z. Y. and Zhang, P., 2019. Effect of dry-wet ratio on properties of concrete under sulfate attack. *Materials*, 12(17), 2755. <https://doi.org/10.3390/ma12172755>.
- He, J., Xu, S., Sang, G., Wu, Y. and Liu, S., 2024. Enhancing the mechanical properties and water permeability of pervious planting concrete. *Materials*, 17(10), 2301. <https://doi.org/10.3390/ma17102301>.
- Kaboudan, A., Naderi, M. and Afshar, M., 2021. The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete. *Journal of Building Engineering*, 34, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102012>.
- Liu, F., Zhang, T., Luo, T., Zhou, M., Zhang, K. and Ma, W., 2020a. Study on the deterioration of concrete under dry-wet cycle and sulfate attack. *Materials*, 13(18), 4095. <https://doi.org/10.3390/ma13184095>.
- Liu, F., Zhang, X. and Li, L., 2020b. Application of non-destructive methods for evaluating concrete permeability under wet-dry cycles. *Journal of Non-Destructive Testing*, 19(2), 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116753>.
- Lü, C., Liu, D., Ding, Y., Lü, X., Zhou, Z., Mu, Sh. et al., 2025. Effect of early dry-wet cycles on the mechanical performance and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC) with varying metakaolin (MK) contents. *Construction and Building Materials*, 490, 142471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142471>.
- Naderi, M., 2010. *Determine of Concrete, Stone, Mortar, Brick, and Other Construction Materials Permeability with Cylindrical Chamber Method*, C.A.I.P. office, Editor. Iran. (In Persian).



- 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), 2225-2241. <https://doi.org/10.1520/JTE20190578>.
- Naderi, M. and Kaboudan, A., 2021. Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101928>.
- Naderi, M. and Saberi Varzaneh A., 2020. Curing and shrinkage effect on the pmm/concrete bond, using “Friction-transfer” and “Pull-off” Methods. *Ferdowsi Civil Engineering*, 33(1), 85-100. <https://doi.org/10.22067/civil.v1i33.82639>. (In Persian).
- Naderi, M., Saberi Varzaneh, A. and Parhizkari, M., 2024. Measuring the permeability and compressive strength of concretes containing additives in freeze–thaw conditions without breaking the sample. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(8), 04024202. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16435>.
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W. and Yu, T., 2021. Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: a critical review. *Journal of Building Engineering*, 35, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102074>.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E. and Sebastian, E., 2000. How does sodium sulfate crystallize? implications for the decay and testing of building materials. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1527-1534. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00381-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00381-1).
- Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., 2021. Practical and theoretical studies of dhesion between repair layers with concrete and steel substrates. A thesis submitted for the PhD. in civil engineering in the field of structural engineering. Faculty of Technical and Engineering Department of Civil Engineering. Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (In Persian)
- Safarkhani, M. and Naderi, M., 2023. Enhanced impermeability of cementitious composite by different content of graphene oxide nanoparticles. *Journal of Building Engineering*, 72, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106675>.
- Saliba, J., Kouta, N. and Saiyouri, N., 2024. Effect of wetting/drying cycles on the durability of flax fibers reinforced earth concrete. *Construction and Building Materials*, 445, 137924, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137924>.
- Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H. et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108643>.
- Siddiqui, M. S., Nyberg, W., Smith, W., Blackwell, B. and Riding, K. A., 2013. Effect of curing water availability and composition on cement hydration. *ACI Materials Journal*, 110(3), 315-322. [Link].
- Springenschmid, R., 2007. *Betontechnologie für die Praxis*, 1st ed.; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany. [ISBN 3899321618]
- Teriqet, A., Mohammadi, M. and Medras Y., 2019. Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 34(4), 82-57. <https://doi.org/10.24200/j30.2019.1446>.
- Ting, M. Z. Y., Wong, K. S., Rahman, M. E. and Meheron, S. J., 2021. Deterioration of marine concrete exposed to wetting-drying action. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123383>.
- Wu, Z., Wong, H. S. and Buenfeld, N. R., 2017. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and Concrete Research*, 98, 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.006>.
- Yildirim, 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), 48-59. <https://doi.org/10.38088/jise.1174927>.



- 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, 108086. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108086>.
- 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*, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100385>.
- Zhao, X., Zeng, W., 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, 108042. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108042>.
- Zhou, L., Zhang, J., 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, 134369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134369>.

