

Research Article

Comparison of In-situ ‘Cylindrical Chamber’ Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal

Ali Saberi Varzaneh^{✉1}, Mahmood Naderi²

1. Postdoc researcher, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

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

(✉) Corresponding Author: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Received: 3 June 2025	Saberi Varzaneh, A., Naderi, M., (2025). Comparison of In-situ ‘Cylindrical Chamber’ Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal. V.26, No.99, P: 95-110
Revised: 20 September 2025	https://doi.org/10.22092/idser.2025.369716.1623
Accepted: 26 September 2025	
Available Online: 18 October 2025	

Extended Abstract**Introduction**

This study aimed to evaluate the permeability of a water supply canal and to quantify water losses arising from the inefficiency of the concrete lining. The “cylindrical chamber” test was proposed and implemented as an in-situ, non-destructive method. A total of 54 concrete specimens—27 water-cured and 27 cured under ambient conditions—were tested using the cylindrical chamber method under a constant pressure of 5 bar for 5 hours. To validate the results, the BS EN 12390-8 standard test was also performed on the same specimens, and regression analysis was conducted between the two methods. The results showed a correlation coefficient of 0.98, indicating high accuracy of the in-situ test. For field applications, direct measurement of penetration depth is impractical, as it is inherently destructive and requires core extraction from the structural element. To overcome this limitation, one of the key advantages of the cylindrical chamber method was employed—its ability to measure the total volume of water infiltrating the concrete surface over a fixed time under a constant hydraulic head. Statistical analysis of the differences between this study and reference data, using mean absolute percentage error (MAPE) and linear correlation coefficient (R^2), showed that the mean infiltration volume differed by less than 10%, with $R^2 = 0.97$. These results confirm the low deviation and strong correlation, indicating the accuracy and reliability of the cylindrical chamber test for classifying concrete permeability. In-situ measurements at 11 selected points along the Varzaneh city water supply canal revealed infiltration volumes exceeding 25 mL at all locations, falling within the high-permeability range and signifying substantial water losses. Mercury intrusion porosimetry and SEM imaging further showed that the absence of curing increased porosity and total pore volume by 7% and 69.4%, respectively.

Methodology

The cylindrical chamber method is a precise and versatile technique for quantifying the permeability of concrete and similar construction materials under laboratory or field conditions. The testing procedure comprised the following steps:

1. **Surface preparation:** The concrete surface was dried to a constant mass, and all surface contaminants were removed to ensure proper adhesion.
2. **Fixture installation:** A steel annular ring was bonded to the prepared concrete surface using epoxy adhesive. After full curing of the adhesive, the cylindrical chamber was mounted securely on the metal fixture.
3. **Water pressurization:** The chamber was filled with de-aired water, and the internal pressure was applied using a calibrated hand-operated lever. The imposed water pressure—**5 bar (0.5 MPa)**—was continuously maintained and monitored via the gauge installed on the apparatus.

4. **Testing duration:** Pressure was sustained for **5 hours** on the exposed concrete surface. This method allows quantification of water infiltration without sample extraction, thereby preserving the structural integrity of the tested element.

Results and Discussion

Selected outcomes of the in-situ cylindrical chamber tests on the Varzaneh canal are summarized in Table 6. While numerous measurements were performed along the entire length of the canal, representative results are reported here to illustrate key trends. The findings confirm that the concrete lining of the Varzaneh water supply canal exhibits very high hydraulic permeability, significantly exceeding recommended thresholds. In the evaluated sections, the infiltration volumes surpassed 25 mL, classifying them in the high-permeability range per the adopted criteria. Such elevated permeability is directly associated with excessive seepage losses, contributing to increased water demand and reduced delivery efficiency. These observations strongly suggest that the measured reduction in outflow is not the result of unauthorized water extraction along the canal's route. Rather, the dominant factor is the inadequate impermeability of the concrete lining, which permits substantial leakage through the canal body.

Conclusions

The proposed cylindrical chamber method showed a strong linear correlation ($R^2 = 0.98$) with the British standard, enabling accurate in-situ permeability measurement without core extraction. Field tests on the Varzaneh water channel indicated predominantly high permeability (>25 mL), causing considerable water loss despite adequate inflow. An inverse relationship between compressive strength and water penetration depth was observed, with curing greatly reducing porosity and total pore volume. The method eliminates destructive testing, though its applicability should be validated under different climates, materials, and structural conditions.

Keywords: Permeability, flow reduction, concrete, in-situ test.



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369716.1623>

نوع مقاله: پژوهشی

مقایسه نتایج آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

علی صابری ورزنه^۱، محمود نادری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی نفوذپذیری یک کانال آبرسانی و شناسایی میزان تلفات آب ناشی از ناکارایی بتن بدنه به اجرا در آمده است. آزمون "محفظه استوانه‌ای" نیز به صورت درجا و غیرمخرب پیشنهاد و اجرا شده است. در مجموع ۵۴ نمونه بتنی شامل ۲۷ نمونه عمل‌آوری شده در آب و ۲۷ نمونه عمل‌آوری شده در شرایط محیطی، تحت آزمون "محفظه استوانه‌ای" با فشار ثابت ۵ بار به مدت ۵ ساعت قرار گرفتند. برای صحت‌سنجی نتایج، آزمون استاندارد BS EN 12390-8 نیز روی همان نمونه‌ها و تحلیل رگرسیونی دو روش اجرا شد. نتایج تحقیق نشان داد ضریب همبستگی بین دو روش برابر ۰/۹۸ است که نشان از دقت مناسب نتایج آزمون درجا. برای کاربردهای میدانی، اندازه‌گیری مستقیم عمق نفوذ امکان‌پذیر نیست، زیرا اندازه‌گیری مستقیم ذاتاً روشی است مخرب و نیازمند مغزه‌گیری از عضو سازه‌ای است. به منظور رفع این محدودیت، از یکی از مزایای کلیدی روش محفظه استوانه‌ای استفاده شد: قابلیت اندازه‌گیری حجم کل آب نفوذ کرده به سطح بتن در بازه زمانی مشخص تحت هد هیدرولیکی ثابت. تحلیل آماری اختلاف نتایج با استفاده از شاخص‌های میانگین درصد خطا و ضریب همبستگی خطی نشان داد که اختلاف میانگین حجم نفوذ بین آنچه از این مطالعه به دست آمده است و داده‌های مرجع کمتر از ۱۰ درصد است و ضریب همبستگی معادل ۰/۹۷ به دست آمد. این نتایج اختلاف کم و همبستگی بالای داده‌ها را تأیید می‌کند و بیانگر دقت و اعتبار روش آزمون محفظه استوانه‌ای در تعیین رده‌بندی نفوذپذیری بتن است. اندازه‌گیری درجا روی ۱۱ نقطه منتخب از کانال آب شهر ورزنه نشان داد که نفوذپذیری در تمام نقاط بیش از ۲۵ میلی‌لیتر است و در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. این مقادیر بیانگر هدررفت قابل توجه آب است. با آزمون جیوه و عکسبرداری SEM مشاهده شد که عمل‌آوری نشدن باعث افزایش تخلخل و حجم کلی منافذ موجود در بتن به ترتیب برابر ۷ و ۶۹/۴ درصد است.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری، کاهش دبی، بتن، آزمون درجا

مقدمه

فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی نامطلوب را فعال کند و نفوذپذیری بتن یکی از پارامترهای کلیدی تعیین‌کننده عملکرد مکانیکی و دوام آن محسوب می‌شود. مسیرهای ورود عوامل تخریب‌زا اغلب به صورت ترک و ریزشکاف‌های موجود در شبکه ماتریس سیمانی شکل می‌گیرد که این امر می‌تواند موجب تغییرات عمقی در ساختار داخلی بتن شود (Yildirim & ÖZHAN, 2023). از دیدگاه مکانیک محیط‌های متخلخل، نفوذپذیری بیانگر حرکت سیال (مایع یا گاز) درون حفره و مجاری بتن تحت اثر گرادیان فشار

^۱ پژوهشگر پسادکتر، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
([Email: ali.saberi@edu.ikiu.ac](mailto:ali.saberi@edu.ikiu.ac)) نویسنده مسئول.

^۲ پروفیسور، گروه عمران، دانشکده دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

علاوه بر سنجش عمق نفوذ، قابلیت اندازه‌گیری حجم کل سیال نفوذ کرده به بتن را نیز فراهم می‌سازد (Naderi, & Kaboudan, 2021a). ویژگی شاخص این روش آن است که نمونه نیازی به تخریب یا برش ندارد و آزمون مستقیماً روی سطح سازه یا نمونه موجود در محل اجرا می‌گردد. این سیستم شامل یک محفظه استوانه‌ای آب‌بند است که روی سطح مورد آزمون نصب می‌شود و جریان آب تحت فشار کنترل‌شده در مدت معین به داخل بافت بتن هدایت می‌گردد؛ پس از آن با استفاده از اندازه‌گیری دقیق حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن، میزان نفوذپذیری ارزیابی می‌شود. توضیحات فنی و جزییات اجرایی کامل این آزمون در بخش "آزمون‌های آزمایشگاهی" ارائه خواهد شد. مطالعات پیشین که فقط به صورت آزمایشگاهی بوده‌اند نشان داده‌اند که نتایج این آزمون با روش استاندارد برای بتن‌های حاوی افزودنی و فاقد آن دارای ضریب همبستگی حدود ۹۶ درصد هستند که نشان از دقت مناسب آزمون فوق است (Naderi & Kaboudan, 2020). با استفاده از این روش مشخص گردید که استفاده از پوزولان‌ها موجب کاهش محسوس نفوذپذیری در بتن می‌شود (Naderi et al., 2021).

تا پیش از این پژوهش، مطالعه‌ای جامع در خصوص ارزیابی دوام و نفوذپذیری کانال آبرسانی ورزنه صورت نگرفته بود که علت اصلی آن محدودیت تجهیزات میدانی برای سنجش برجا و بدون تخریب بتن بوده است. در این مطالعه، ابتدا نمونه‌های بتنی با سه رده مقاومتی C25، C35 و C45 تهیه شدند. پس از آن نمونه‌ها در دو حالت متمایز عمل‌آوری قرار گرفتند: گروه نخست در حوضچه‌های حاوی آب با کنترل دمایی مشخص برای عمل‌آوری مرطوب، و گروه دوم در محیط آزاد به‌منظور شبیه‌سازی قرارگیری در معرض عوامل جوی طبیعی. از این رو با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نسبت به بررسی عمل‌آوری مناسب بر نفوذپذیری بتن اقدام کرد. به‌منظور تحلیل ساختار داخلی و ویژگی‌های تخلخل، بخشی از نمونه‌ها با استفاده از آزمون نفوذ جیوه ارزیابی شدند. برای بررسی تاثیر عمل‌آوری بر نفوذپذیری

خارجی است. بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط «مؤسسه بتن آمریکا»، این ویژگی معیاری از توانایی بتن برای عبور دادن سیال یا گاز در حجم خود به‌شمار می‌آید (ACI, 2018). شرایط محیطی یا دمایی شدید مانند چرخه‌های انجماد و ذوب مکرر (Zeng et al., 2023a)، حمله یون‌های سولفات و کلرید (Zhang et al., 2024a; Zeng et al., 2023b)، اعمال فشارهای هیدرواستاتیکی بالا (Zhang et al., 2024b) و قرارگیری در دماهای بسیار زیاد (Shen et al., 2024) می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری مصالح شود. اهمیت این شاخص در سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها و مخازن ذخیره آب که تحت فشار داخلی زیاد قرار دارند دوچندان است. در چنین محیط‌هایی، نوسان‌های حرارتی سالیانه می‌تواند موجب افزایش تراکم، تعداد و عرض ترک‌ها و منافذ گردد و به‌دنبال آن نفوذپذیری افزایش و ظرفیت بتن برای تحمل بارهای وارده کاهش یابد (Kou & Poon, 2014).

برای سنجش نفوذپذیری بتن، روش‌های متعددی وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و روش دبی ثابت اشاره کرد. در استانداردهای BS EN 12390-8 و DIN 1048-5، عمق نفوذ به عنوان معیاری کمی برای ارزیابی قابلیت عبور آب از بتن معرفی شده است، در حالی که روش دبی ثابت بیشتر در مورد بتن‌هایی با تراوایی بالا کاربرد دارد (Chandruppa & Biligiri, 2016). اجرای این استانداردها مستلزم استفاده از تجهیزات گوناگون و صرف زمان قابل توجه است که می‌تواند هزینه آزمایش‌ها را افزایش دهد. به علاوه، این روش‌ها عمدتاً محدود به محیط‌های آزمایشگاهی است و امکان سنجش برجا را فراهم نمی‌سازند. مطابق استاندارد بریتانیا، نمونه‌های بتنی تحت فشار آب معادل ۵ بار قرار می‌گیرند و با دستگاه جک بتن‌شکن گسیخته می‌شوند تا بیشینه عمق نفوذ اندازه‌گیری و به عنوان شاخص نفوذپذیری استفاده گردد.

در این تحقیق، به جای روش‌های مذکور از آزمون "محفظه استوانه‌ای" (Naderi, 2010) استفاده شده است که

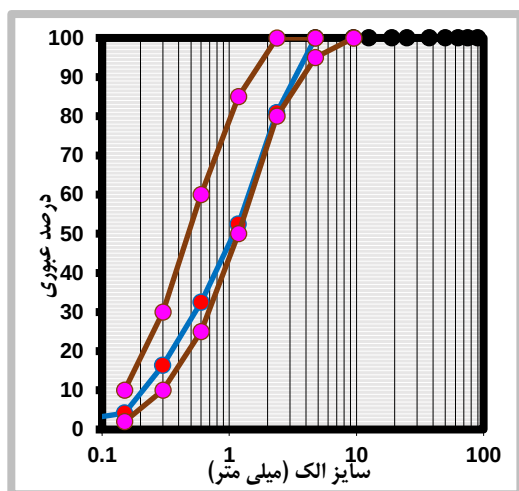
برابر با ۲۵۱۰ و ۲۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و میزان جذب آب آن‌ها نیز به ترتیب ۲/۶ و ۳/۲ درصد اندازه‌گیری گردید (ASTM C128, 2015; ASTM C127, 2015). شکل (۱) الگوی توزیع اندازه ذرات مصالح را نمایش می‌دهد؛ در این نمودار، خط آبی معرف منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های به‌کاررفته در این تحقیق است و محدوده‌های مجاز مندرج در استاندارد مربوط با خطوط قرمز رنگ مشخص شده است. به‌منظور آب‌بندی محل آزمون در روش "محفظه استوانه‌ای"، از چسب رزین اپوکسی استفاده شد. این ماده دارای مقاومت فشاری و برشی معادل ۷۰ و ۱۵ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته برابر با ۱۲۷۵۰ مگاپاسکال است که پایداری مکانیکی و چسبندگی بالایی را در شرایط آزمایشگاهی و میدانی تأمین می‌کند.

بتن، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. در این فرآیند، با استفاده از دستگاه مخصوص، تصویرها با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت در شرایط خلا تهیه گردید تا جزئیات ساختار شکنی سطحی و ترک‌های ریز آشکار شود. پس از تأیید صحت عملکرد روش «محفظه استوانه‌ای» برای سنجش نفوذپذیری بتن در محل، از این روش برای ارزیابی میدانی دوام کانال آبرسانی استفاده شد.

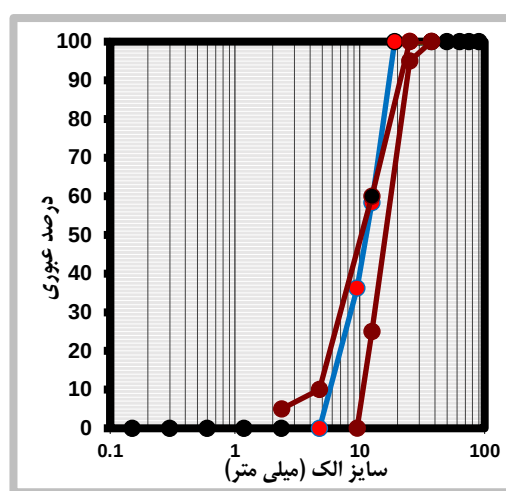
مواد و روش‌ها

مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌های بتنی این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ ۲ و آب شرب مطابق الزام کیفی استفاده گردید. اساس دانه‌بندی مصالح سنگی دستورالعمل استاندارد ASTM C136 بود. نتایج تعیین ویژگی‌های فیزیکی نشان داد که چگالی اشباع با سطح خشک شدن و ماسه به ترتیب



ب) سنگدانه‌های ریز
(b) Fine Aggregates



الف) سنگدانه‌های درشت
(a) Coarse Aggregates

شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Gradation curve of aggregate materials

است که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در مطالعه ساختار داخلی خمیر سیمان هیدراته، ملات و بتن به کار گرفته شده است (Wei et al., 2023). در این پژوهش، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۲۰ میلی‌متر تهیه شد و در معرض آزمون MIP قرار گرفتند. فرایند آزمون با اعمال فشار جیوه از مقدار اولیه ۰/۱۴ مگاپاسکال تا حداکثر ۲۲۸ مگاپاسکال دنبال شد.

تحلیل ساختار تخلخل از طریق آزمون نفوذ تحت فشار جیوه

ریزساختار بتن، شامل اندازه و توزیع منافذ و میزان تخلخل تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار فیزیکی و مکانیکی آن دارد. تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه (MIP) یکی از روش‌های معتبر برای بررسی ویژگی‌های شبکه منافذ در مواد سیمانی

دستگاه MIP به صورت خودکار داده‌ها را ثبت و محاسبه می‌کند که مهم‌ترین خروجی‌های آن عبارت‌اند از: حجم کل حفره‌ها، سطح ویژه، درصد تخلخل کلی و توزیع اندازه منافذ (شکل ۲).

فشار پایین امکان ورود جیوه را به منافذ بزرگتر فراهم می‌سازد، در حالی که نفوذ به منافذ بسیار ریز تنها در فشارهای بالا میسر است. این بازه فشار، گستره‌ای از اندازه منافذ را از حدود ۱۴۰ میکرومتر تا تقریباً ۱۰ نانومتر پوشش می‌دهد که شامل اکثر اندازه حفره‌های متداول در بتن است.



شکل ۲- دستگاه مورد استفاده برای آزمون تخلخل‌سنجی جیوه

Fig. 2. Apparatus used for the mercury intrusion porosimetry test

مدت ۵ ساعت روی سطح نمونه‌ها اعمال گردید؛ این مدت زمان پیش‌تر به عنوان شرایط مناسب برای تعیین نفوذپذیری بتن با استفاده از این روش معرفی شده است (Naderi, & Kaboudan, 2021b).

ویژگی شاخص این آزمون، امکان اندازه‌گیری حجم کل سیال نفوذ کرده به بتن، بدون نیاز به شکستن نمونه است. برای این منظور، میکرومتر نصب‌شده در بخش بالایی دستگاه کاهش ارتفاع ستون آب داخل محفظه را با دقت بر حسب میلی‌متر ثبت می‌کند. لازم است تأکید شود مقدار ثبت‌شده با نماد h در رابطه (۱) بیانگر «افت ارتفاع آب در مخزن تحت فشار» است. حجم آب نفوذ کرده (V) با ضرب کردن این مقدار در سطح مقطع اعمال فشار (A) محاسبه می‌شود:

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

که در آن:

- V : حجم آب نفوذ کرده به نمونه (میلی‌متر مکعب).
- h : کاهش ارتفاع ستون آب در محفظه (میلی‌متر).
- A : سطح مقطع ناحیه تحت فشار (میلی‌متر مربع).

ارزیابی ویژگی‌های نفوذپذیری با استفاده از محفظه استوانه‌ای

آزمون «محفظه استوانه‌ای» یکی از روش‌های دقیق و کاربردی برای تعیین نفوذپذیری بتن و دیگر مصالح ساختمانی است که قابلیت اجرا را در محیط آزمایشگاهی و نیز به صورت برجا دارد. نمای کلی این دستگاه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. اجرای آزمون مستلزم آماده‌سازی کامل سطح آزمون است؛ بدین منظور، ابتدا سطح بتن خشک و از هرگونه گرد و غبار یا آلودگی پاک می‌شود. پس از آن یک رینگ فلزی با استفاده از چسب اپوکسی به سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۳-ب). پس از حصول اطمینان از سخت شدن کامل چسب، واحد اصلی دستگاه محفظه استوانه‌ای روی صفحه فلزی متصل به رینگ نصب می‌گردد (شکل ۳-ج). مخزن دستگاه، پس از نصب شدن، با آب پرخواهد شد و فشار موردنظر با اهرم دستی اعمال می‌شود. میزان فشار به کمک گیج تعبیه‌شده روی بدنه دستگاه پایش می‌شود. در این پژوهش، فشار ثابت ۵ بار به

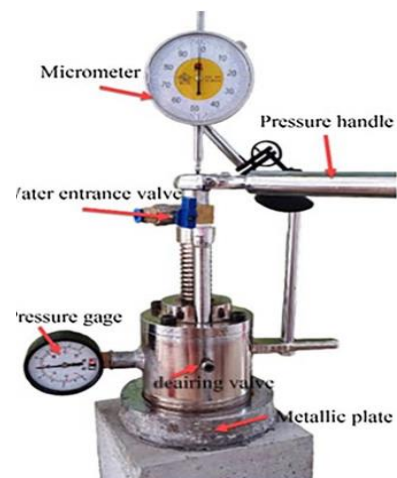
مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی



ج) استقرار دستگاه روی صفحه فلزی
(c) Positioning the apparatus on the metal plate



ب) اتصال رینگ فلزی به سطح نمونه
(b) Attachment of the metal ring to the specimen surface



الف) نمای کلی
(a) General view

شکل ۳- مراحل آماده‌سازی و اجرای آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 3. Steps of preparation and execution of the cylindrical chamber test

بارگذاری، طبق فرآیند نشان داده شده در شکل (۴-ب)، نمونه به وسیله جک شکست بتن گسیخته می‌شود و سپس حداکثر عمق نفوذ آب در مقطع شکسته شده با ابزار اندازه‌گیری دقیق ثبت می‌گردد.

نسبت‌های اختلاط و فرآیند اجرای آزمون‌ها ترکیب طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

اندازه‌گیری نفوذپذیری بر اساس استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8)

در شکل (۴-الف)، نمای کلی دستگاه آزمون نفوذپذیری منطبق با استاندارد بریتانیا و نحوه جایگذاری نمونه بتنی در قالب آن قابل مشاهده است. در این روش، نمونه استوانه‌ای یا منشوری بتن داخل محفظه آزمون قرار می‌گیرد و فشار هیدرواستاتیکی ثابت معادل ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت بر سطح نمونه اعمال می‌شود. پس از اتمام دوره



ب) سنجش عمق نفوذ آب پس از شکست نمونه
(b) Measurement of water penetration depth after specimen failure



الف) نمای کلی دستگاه استاندارد بریتانیا
(a) General view of the British standard apparatus

شکل ۴- مراحل اجرای آزمون نفوذپذیری بر مبنای استاندارد BS EN 12390-8

Fig. 4. Steps for performing the permeability test based on BS EN 12390-8 standard

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

Table 1. Mix design of concrete specimens

شماره طرح Mix design number	آب Water ($\frac{Kg}{m^3}$)	سیمان Cement ($\frac{Kg}{m^3}$)	نسبت آب به سیمان W/C	ماسه Sand ($\frac{Kg}{m^3}$)	شن Gravel ($\frac{Kg}{m^3}$)
C25	۲۱۱	۳۸۱	۰/۵۵	۸۷۹	۶۹۹
C35	۱۹۸	۴۴۰	۰/۴۵	۸۶۲	۶۸۶
C45	۱۹۱	۵۱۶	۰/۳۷	۸۳۸	۶۶۷

تحلیل و بررسی نتایج

آزمایشگاهی و نیز سازه‌های موجود، مقایسه‌ای میان نتایج این آزمون و روش استاندارد بریتانیا صورت گرفته است. در ابتدای این بخش، جدول (۲) به‌طور خلاصه مزایای به‌کارگیری روش «محفظه استوانه‌ای» در مقایسه با روش استاندارد بریتانیا را ارائه می‌دهد.

مقایسه کارایی آزمون «محفظه استوانه‌ای» و روش استاندارد بریتانیا
با توجه به استفاده از روش غیرمخرب «محفظه استوانه‌ای» برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در نمونه‌های

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌ها و کاربردهای روش محفظه استوانه‌ای و آزمون نفوذپذیری بر اساس استاندارد بریتانیا

Table 2. Comparison of the characteristics and applications of the cylindrical chamber method and the permeability test based on the British standard

توضیحات برای آزمون BS EN 12390-8 Description of BS EN 12390-8 test	روش BS BS method	روش "محفظه استوانه‌ای" Cylindrical chamber method	مزیت‌ها Advantages
تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ است.	×	✓	قابلیت اجرای درجای آزمایش
آزمون BS دارای تجهیزات گرانی است.	×	✓	هزینه اندک دستگاه
در آزمون BS نمونه شکسته می‌شود و دیگر قابلیت تکرارشدن آزمون وجود ندارد.	×	✓	قابلیت تکرار شدن آزمون
تجهیزات آزمون BS قابل حمل نیستند.	×	✓	سبک بودن و قابل حمل بودن
نمونه باید شکسته شود تا عمق نفوذ بر اساس آزمون BS اندازه‌گیری گردد.	×	✓	آزمونی غیر مخرب
در آزمون BS به حداقل ۷۲ ساعت زمان نیاز است.	×	✓	دسترسی به نتایج در مدت کوتاه
آزمون BS فقط در آزمایشگاه قابل اجرا خواهد بود.	×	✓	قابلیت اجرای آزمون در مکان‌هایی که نمونه‌گیری ممکن نیست
با توجه به تجهیزات، آزمون BS فقط روی نمونه‌هایی با ابعاد خاص قابل اجراست.	×	✓	قابلیت اجرای آزمون روی هر سطح شیب‌دار

جدول حاصل میانگین سه تکرار آزمون است. بخشی از نمونه‌ها تا زمان اجرای آزمایش در آب عمل‌آوری و بخش دیگر در شرایط محیط آزاد نگهداری شده‌اند. به‌طور کلی، برای افزایش دقت ارزیابی مجموعاً ۵۴ نمونه مکعبی بتن آزمایش شده‌اند.

در ادامه، مقادیر عمق نفوذ حاصل از دو روش آزمون فوق با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جدول (۳) میانگین عمق نفوذ آب را در بتن‌های دارای رده‌های مقاومتی متفاوت نمایش می‌دهد که با استفاده از آزمون‌های «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا به دست آمده‌اند. هر عدد ارائه‌شده در

مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

جدول ۳- مقادیر عمق نفوذ آب در بتن حاصل از آزمون‌های «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا

Table 3. Water penetration depths in concrete obtained from the cylindrical chamber test and the British standard test

رده مقاومتی Strength class	عمل‌آوری Curing	سن بتن (روز) Concrete age (days)	عمق نفوذ بر اساس آزمون "محفظه استوانه‌ای" (میلی متر) Water penetration depth according to cylindrical chamber test (mm)	عمق نفوذ بر اساس استاندارد بریتانیا (میلی متر) Water penetration depth according to British standard (mm)
C25	آب	۲۸	۴۱	۴۸
		۹۰	۳۰	۳۶
C35	آب	۲۸	۳۲	۳۷
		۹۰	۲۵	۲۹
C45	آب	۲۸	۲۲	۲۸
		۹۰	۱۹	۲۱
C25	فضای آزاد	۲۸	۶۶	۷۵
C35	فضای آزاد	۲۸	۵۳	۵۸
C45	فضای آزاد	۲۸	۳۷	۴۱

همان‌گونه که از داده‌های ارائه‌شده در جدول (۳) بررسی ارتباط بین نتایج دو آزمون و تعیین ضریب همبستگی برمی‌آید، مقادیر عمق نفوذ آب به‌دست‌آمده از دو روش آزمون، یعنی "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا، به یکدیگر نزدیک هستند. با این حال، نتایج به‌دست آمده از استاندارد بریتانیا اندکی بالاتر از مقادیر ثبت‌شده در آزمون «محفظه استوانه‌ای» است؛ این اختلاف را می‌توان به تفاوت در شرایط بارگذاری نسبت داد، زیرا در استاندارد بریتانیا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب قرار می‌گیرند، در حالی که حداکثر مدت آزمون محفظه استوانه‌ای حدود ۵ ساعت است (Naderi & Kaboudan, 2021). به‌منظور

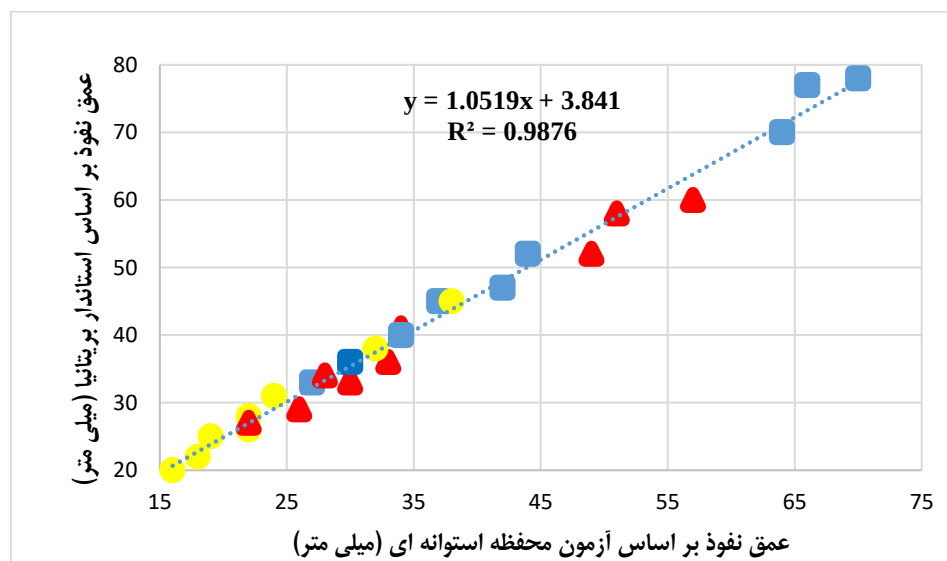


Fig. 5. Correlation between the cylindrical chamber method and the British standard

آب و عمق نفوذ آب در بتن می‌توان مقدار نفوذپذیری بتن سازه‌های موجود را بدون نیاز به تخریب بتن اندازه‌گیری کرد. در استاندارد BS EN 12390-8، دسته‌بندی خاصی به‌منظور ارزیابی نفوذپذیری بتن‌ها وجود ندارد. اما در استاندارد DIN 1048-5 محدوده‌ای خاص مطابق جدول (۴) برای ارزیابی نفوذپذیری بتن ارائه شده است. طبق استاندارد DIN 1048-5، نمونه‌های مکعبی بتن با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر مربع آزمایش می‌شوند. در این روش، یکی از وجوه نمونه که قرار است در معرض فشار آب قرار گیرد هموار و تمیز می‌شود و پس از آن نمونه به‌گونه‌ای در محفظه آزمون نصب می‌گردد که تماس آب صرفاً با این وجه برقرار شود. فشار هیدرواستاتیک ثابت معادل ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت بر سطح نمونه اعمال می‌شود، در حالی که دیگر وجوه توسط آب‌بند و واشرهای مقاوم از تماس با آب محافظت شده‌اند. در پایان زمان آزمایش، نمونه‌ها از محفظه خارج و شکسته می‌شوند و سطح مقطع به‌دست آمده بررسی می‌گردد. محدوده مرطوب‌شده در بافت بتن تشخیص داده می‌شود و عمق نفوذ آب ثبت می‌گردد.

بر اساس نتایج تحلیل رگرسیونی ارائه‌شده در شکل (۵)، رابطه‌ای خطی مشخص بین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا مشاهده می‌شود که دارای ضریب همبستگی ۹۸ درصد است. این مقدار بالا نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی میان دو روش است و دلالت بر آن دارد که آزمون «محفظه استوانه‌ای» برای برآورد عمق نفوذپذیری بتن دقت قابل توجهی دارد. بنابراین، می‌توان این روش را به‌عنوان ابزاری کارآمد نه‌تنها در ارزیابی نمونه‌های آزمایشگاهی، بلکه برای سنجش نفوذپذیری بتن در شرایط درجا و روی سازه‌های بتنی موجود نیز به‌کار گرفت.

ارزیابی میدانی نفوذپذیری در کانال آب

همانگونه که گفته شد، آزمون محفظه استوانه‌ای قابلیت اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن را بدون شکستن نمونه‌ها دارد. اما ابتدا باید رابطه بین حجم نفوذ آب و عمق نفوذ آب در بتن تعیین گردد. زیرا برای اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری سازه‌های بتنی موجود به‌صورت درجا، نیاز به بررسی حجم نفوذ آب در بتن خواهد بود. با داشتن رابطه بین حجم نفوذ

جدول ۴- محدوده مجاز نفوذپذیری آب در بتن بر اساس استاندارد DIN 1048-5

Table 4. Permissible range of water permeability in concrete according to DIN 1048-5 standard

نفوذپذیری	کم	متوسط	زیاد
Permeability	Low	Medium	High
عمق نفوذ (mm)	کمتر از ۳۰ میلی‌متر	۳۰ - ۶۰ میلی‌متر	بیشتر از ۶۰ میلی‌متر

می‌شود، بتن‌هایی با حجم نفوذ آب کمتر از ۱۲ میلی‌لیتر در رده کم‌نفوذپذیر، حجم بین ۱۲ تا ۲۵ میلی‌لیتر در رده نفوذپذیری متوسط و حجم بیش از ۲۵ میلی‌لیتر در رده پرنفوذ طبقه‌بندی شده‌اند. به‌منظور ارزیابی کمی صحت این طبقه‌بندی، مقادیر به‌دست‌آمده در این مطالعه با داده‌های منتشرشده از تحقیقات پیشین روی بتن‌های معمولی (Naderi & Kaboudan, 2021a; Naderi & Kaboudan, 2020) مقایسه گردید.

همان‌گونه که در جدول (۴) نشان داده شده است، استاندارد DIN 1048-5 محدوده‌های نفوذپذیری بتن را بر اساس عمق نفوذ آب در نمونه تعیین می‌کند. بر این اساس، در این بخش معادل حجمی آب نفوذ کرده به بتن بر مبنای طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول (۴) محاسبه و گزارش شده است. جدول (۵) مقادیر اندازه‌گیری‌شده عمق نفوذ و حجم متناظر آب نفوذی را برای نمونه‌های بتنی با مقاومت‌های فشاری مختلف، سنین گوناگون، و شرایط متفاوت عمل‌آوری ارائه می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های جدول (۵) استنباط

مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

جدول ۵- ارتباط عمق و حجم نفوذ آب در بتن سازه‌های بتنی اجراشده درجا

Table 5. Relationship between water penetration depth and volume in cast-in-place concrete structures

کم Low		متوسط Medium		زیاد High	
عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)	عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)	عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)
۱۶	۷/۱	۳۰	۱۲	۶۱	۲۵/۲
۱۸	۷/۷	۳۳	۱۲/۴	۶۴	۲۷/۳
۱۹	۷/۷	۳۴	۱۲/۶	۶۶	۲۹/۲
۲۲	۷/۹	۳۷	۱۶/۷	۶۶	۲۹/۶
۲۳	۸/۲	۴۲	۱۷/۲	۷۰	۳۱/۷
۲۴	۱۰/۲	۴۴	۱۷/۵	۷۳	۳۰/۸
۲۴	۱۰/۹	۴۷	۱۸	۷۷	۳۵/۵
۲۵	۱۱/۶	۴۹	۲۰/۲	۷۹	۳۶/۲
۲۶	۸/۶	۵۱	۲۰/۸	۸۴	۳۶/۹
۲۷	۱۱/۱	۵۷	۲۲	۸۸	۴۲/۴
۲۸	۱۱/۹	۵۹	۲۴/۴	۹۲	۴۳
کمتر از ۳۰ میلی متر		۳۰ - ۶۰ میلی متر	۱۲ - ۲۵ میلی لیتر	بیشتر از ۶۰ میلی متر	بیشتر از ۲۵ میلی لیتر

می‌دهد. نفوذپذیری نقاط مختلف کانال آبرسانی ورزنه بالای ۲۵ میلی‌لیتر است که طبق نتایج به‌دست آمده در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. به عبارتی، دبی آب ورودی به کانال آبرسانی ورزنه احتمالاً مناسب بوده است و هیچ فردی در میانه راه از آب کانال سوء استفاده نمی‌کرده است. اما این مناسب نبودن بدنه بتنی کانال آبرسانی است که باعث هدر رفتن مقدار زیادی آب می‌شده و از این رو آب رسیده به شهر ورزنه بسیار کمتر از آب ورودی به کانال بوده است. روباز بودن کانال و بخار شدن آب نیز تاثیر قابل توجهی داشته است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که امکان داشت با اصلاح بدنه بتنی کانال آب از هدر رفت زیاد آب جلوگیری کرد و اعتراض‌ها در شهر ورزنه به دلیل کمبود آب بسیار کمتر دیده می‌شد. تا پیش از این تحقیق باید برای اندازه‌گیری نفوذپذیری سازه‌ها یا المان‌های بتنی موجود، ابتدا مغزه‌ای استاندارد از بتن جدا و در آزمایشگاه از لحاظ نفوذپذیری آزمایش می‌شد که این امر باعث آسیب‌دیدگی سازه می‌گردید. اما اکنون می‌توان با به‌دست آوردن مقدار حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن، مقدار نفوذپذیر بتن را با دقت بالایی اندازه‌گیری کرد.

تحلیل آماری اختلاف نتایج با استفاده از شاخص‌های میانگین درصد خطا و ضریب همبستگی خطی (R^2) نشان می‌دهد که اختلاف میانگین حجم نفوذ بین این مطالعه و داده‌های مرجع کمتر از ۱۰ درصد است و ضریب همبستگی معادل ۰/۹۷ به‌دست آمد. این نتایج اختلاف کم و همبستگی بالای داده‌ها را تأیید می‌کند و بیانگر دقت و اعتبار روش آزمون محفظه استوانه‌ای در تعیین رده‌بندی نفوذپذیری بتن است.

با بهره‌گیری از رابطه بین حجم و عمق نفوذ آب، که از آزمون «محفظه استوانه‌ای» به‌دست آمده است، نفوذپذیری کانال آبرسانی موجود شهر ورزنه به‌صورت درجا ارزیابی گردید. نمونه‌هایی از آزمایش‌های میدانی روی این کانال در شکل (۶) نمایش داده شده است.

نتایج حاصل از اجرای آزمون "محفظه استوانه‌ای" روی سازه‌های بتنی موجود در جدول (۶) ارائه شده است. آزمایش‌های فراوانی به‌صورت درجا اجرا اما در این تحقیق تعداد محدودی از نتایج ارائه گردیده است. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، کانال آب ورزنه نفوذپذیری بسیار زیادی دارد که مناسب نیست. نفوذپذیری بالای کانال آب باعث هدر رفتن آب می‌شود و مصرف آب را افزایش



شکل ۶- اجرای آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" روی سازه‌های بتنی موجود

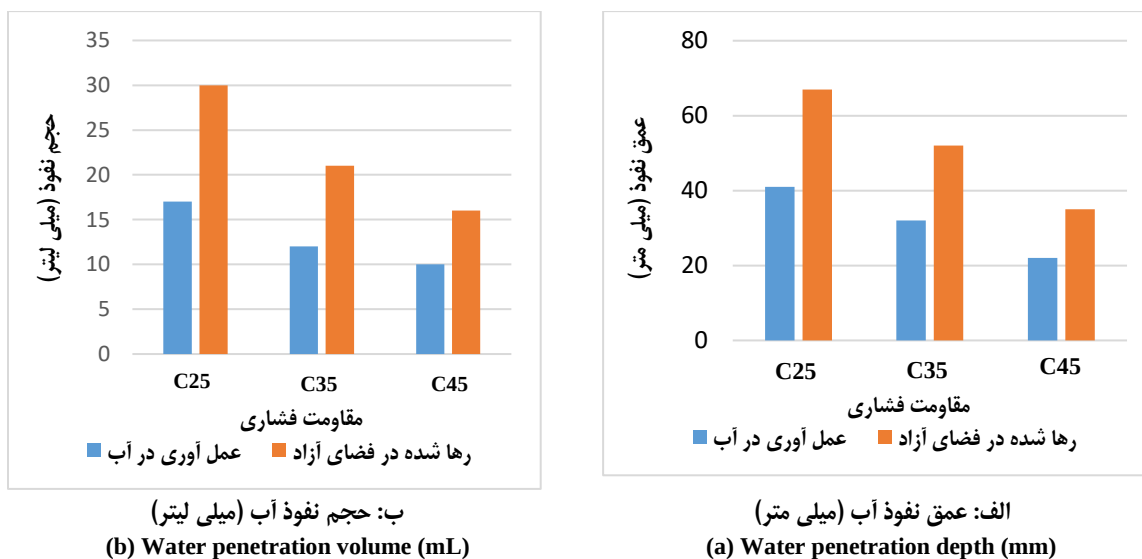
Fig. 6. Performing the in-situ cylindrical chamber test on existing concrete structures

جدول ۶- نفوذپذیری سازه‌های بتنی موجود به صورت درجا

Table 6. Permeability of existing concrete structures measured in-situ

حجم نفوذ آب (میلی لیتر)	گستره نفوذپذیری
Water penetration volume (mL)	Permeability range
۲۸	زیاد
۲۸/۶	زیاد
۲۹/۱	زیاد
۳۲/۵	زیاد
۳۲/۷	زیاد
۳۴/۱	زیاد
۳۸/۴	زیاد
۳۸/۹	زیاد
۴۱/۶	زیاد
۴۲/۲	زیاد
۴۲/۶	زیاد

تأثیر عمل‌آوری و مقاومت بر مشخصات مرتبط با نفوذپذیری
 آب در بتن و حجم آب نفوذ در بتن است. از این رو در این قسمت مقدار عمق نفوذ و حجم نفوذ آب در بتن با رده‌های همان‌طور که پیش از این گفته شد، یکی از مزیت‌های آزمون "محفظه استوانه‌ای" اندازه‌گیری همزمان عمق نفوذ شده است شکل (۷).



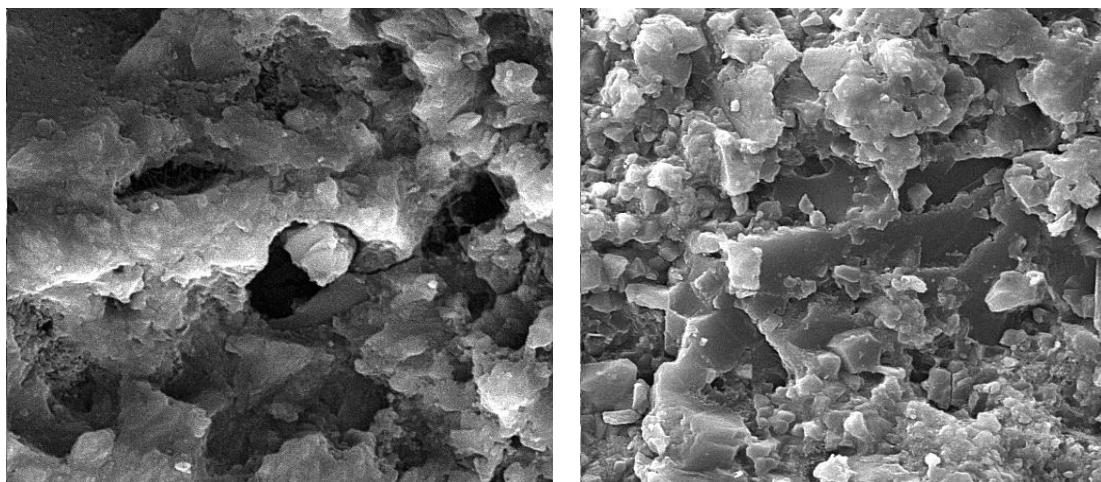
شکل ۷- تاثیر مقاومت و عمل آوری بر حجم نفوذ آب
Fig. 7. Effect of strength and curing on water penetration volume

در شکل (۷-الف) مقدار عمق نفوذ آب در بتن با رده‌های مقاومتی مختلف و تحت شرایط مختلف عمل آوری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت فشاری، مقدار عمق نفوذ آب در بتن کاهش داشته است. عمق نفوذ آب در بتن عمل آوری شده در آب با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۴۱، ۳۲ و ۲۲ میلی‌متر است به سخی دیگر عمق نفوذ در بتن با رده مقاومتی C25 حدود ۱/۸۶ برابر عمق نفوذ در بتن با رده مقاومتی C45 است. در مقایسه بتن‌های عمل آوری شده در آب و بتن‌های رها شده در فضای آزاد مشاهده می‌شود که عمق نفوذ آب در بتن‌های رها شده در فضای آزاد با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب ۶۳/۴، ۶۲/۵ و ۵۹/۱ درصد افزایش داشته است.

کاهش مقدار عمق نفوذ در مقاومت‌های بالاتر نشانگر پیشرفت و توسعه بیشتر محصولات هیدراسیون است که منجر به ساختاری متراکم‌تر می‌شود. افزایش مقاومت فشاری به حجم و نوع محصولات هیدراسیون تشکیل شده وابسته است و از این رو به واکنش‌های میان ترکیبات جامد و مایع برمی‌گردد (Teriqet et al., 2019). توسعه روند هیدراسیون سیمان باعث پر شدن منافذ و فضاهای خالی داخلی بتن توسط محصولات هیدراسیون می‌شود. روند سخت شدگی و متراکم شدن بتن بلافاصله پس از ریختن بتن در قالب آغاز و طی این روند، هیدراسیون باعث به هم چسبیدن

سنگدانه‌های بتن می‌شود (Taylor, 1997). نبودن رطوبت کافی در سطح بتن، موجب خشک شدن بتن و افزایش منافذ ریز می‌شود که در نتیجه، باعث هیدراسیون ناقص و کاهش مقدار مقاومت فشاری و افزایش عمق نفوذ می‌شود (Kosmatka et al., 2002; Siddiqui et al., 2013). نداشتن رطوبت کافی همچنین باعث باقی ماندن ناحیه مرزی متخلخل در بتن و سرانجام موجب کاهش مقاومت در برابر حملات شیمیایی و دیگر آسیب دیدگی‌های مشابه می‌گردد (Springenschmid, 2007; Alexander et al., 2017).

مانند آنچه برای عمق نفوذ آب در بتن رخ داد، برای حجم نفوذ آب در بتن نیز اتفاق افتاده است. مطابق شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود که حجم نفوذ آب در بتن عمل آوری شده در آب با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۱۷، ۱۲ و ۱۰ میلی‌لیتر است به عبارتی، حجم نفوذ در بتن با رده مقاومتی C25 حدود ۱/۷ برابر حجم نفوذ در بتن با رده مقاومتی C45 است. در مقایسه بتن‌های عمل آوری شده در آب و بتن‌های رها شده در فضای آزاد مشاهده می‌شود که حجم نفوذ آب در بتن‌های رها شده در فضای آزاد با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب ۷۶/۵، ۷۵ و ۶۰ درصد افزایش داشته است. در اینجا نتایج حاصل از عکسبرداری SEM قابل مشاهده است شکل (۸).



الف: بتن عمل‌آوری شده در آب
(a) Water-cured concrete
ب: بتن رها شده در فضای آزاد
(b) Air-exposed concrete

شکل ۸- تاثیر شرایط حاد یخ و ذوب یخ بر تخلخل با استفاده از عکسبرداری SEM

Fig. 8. Effect of severe freeze-thaw conditions on porosity using SEM imaging

نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری در آب و رها شده در فضای آزاد مقایسه شده‌اند. در شکل (۸) تاثیر شرایط مختلف عمل‌آوری بر تخلخل بتن نشان داده شده است. در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود که بتن دارای یکپارچگی و نظم خاصی است و تخلخل زیادی در آن مشاهده نمی‌شود. اما در شکل (۸-ب) مشاهده می‌گردد که نمونه ارائه شده به دلیل عمل‌آوری ناکافی، باعث ایجاد شبکه‌های گسترده‌ای از منافذ ریز در ریزساختار بتن شده‌اند. منافذ مذکور که در تصویر قابل مشاهده‌اند، تأثیرات زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌گذارند. این تأثیرات به‌ویژه باعث افزایش قطر منافذ و افزایش نفوذپذیری در بتن می‌شود.

در ادامه برای بررسی بیشتر اثرهای منفی عمل‌آوری نشدن بر حجم منافذ و تخلخل بتن، نتایج حاصل از آزمون جیوه بررسی شده است. با استفاده از آزمایش جیوه می‌توان

مشخصه‌های زیادی از ساختار منافذ را به‌دست آورد، مانند تخلخل و حجم کلی منافذ. در جدول (۷)، مشخصات مذکور برای بتن C45 قابل مشاهده است. با توجه به جدول (۷)، مشاهده می‌شود که تخلخل و حجم کلی منافذ با رعایت نکردن عمل‌آوری، افزایش داشته است. مقدار تخلخل برای بتن C45 در شرایط عمل‌آوری در آب برابر ۱۱/۲ درصد است در صورتی که همین مشخصه در بتن بدون عمل‌آوری برابر ۱۸/۲ درصد شده است. به عبارتی، تخلخل بتن C45 بدون عمل‌آوری حدود ۷ درصد افزایش داشته است. عمل‌آوری نشدن باعث افزایش مقدار حجم کلی منافذ بتن C45 مقدار ۶۹/۴ درصد شده است. افزایش منافذ و تخلخل در بتن یکی از دلایل اصلی نفوذپذیری بتن است که در این بخش بررسی شده است.

جدول ۷- مشخصات منافذ در شرایط مختلف

Table 7. Pore characteristics under different conditions

شرایط عمل‌آوری Curing conditions	حجم کلی منافذ (mm ³ /gr) Total pore volume	تخلخل (%) Porosity
آب	۴۹	۱۱/۲
فضای آزاد	۸۳	۱۸/۲

نتیجه‌گیری

عمل‌آوری شده با رده‌های مقاومتی C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۳۲، ۴۱ و ۲۲ میلی‌متر بوده و عمق نفوذ در بتن C25 حدود ۱۰۸۶ برابر بتن C45 است. آزمون‌های MIP و عکسبرداری SEM نیز نشان دادند که عدم عمل‌آوری باعث افزایش تخلخل و حجم کلی منافذ به ترتیب به میزان ۷ و ۴/۶۹ درصد می‌شود. شاخص‌سازی نفوذپذیری بر مبنای حجم آب، علاوه بر حذف نیاز به استخراج مغزه و تخریب سازه، امکان ارزیابی سریع و دقیق بتن را فراهم می‌آورد. با این حال، این مطالعه محدود به سازه‌های آبی موجود در شرایط اقلیمی مشابه ورزنه و ترکیب مصالح مورد استفاده بوده و تعمیم نتایج به سازه‌های با ترکیبات یا شرایط محیطی متفاوت نیازمند مطالعات تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به بررسی اثرات چرخه‌های شدید یخ‌زدگی ذوب، تغییرات دمایی و ترکیب‌های سیمانی مختلف بر نفوذپذیری بتن، و همچنین توسعه مدل‌های پیش‌بینی نفوذپذیری در مقیاس سازه‌های بزرگ، بپردازد.

بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون، بین روش «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی ۹۸ درصد مشاهده شد که بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن بدون نیاز به تخریب سازه است. با استفاده از این روش، نفوذپذیری کانال آبرسانی ورزنه به صورت درجای ارزیابی شد و مشخص گردید که در اغلب نقاط، حجم آب نفوذ کرده بیش از ۲۵ میلی‌لیتر و در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. این امر حاکی از آن است که هرچند دبی آب ورودی به کانال مناسب بوده، ضعف کیفی بدنه بتنی موجب هدررفت قابل توجه آب شده و میزان آب ورودی به شهر کمتر از مقدار اولیه بوده است. طبقه‌بندی نفوذپذیری بر اساس حجم آب نفوذی نشان داد که کمتر از ۱۲ میلی‌لیتر نشانگر بتن کم‌نفوذ، ۱۲ تا ۲۵ میلی‌لیتر بتن با نفوذپذیری متوسط و بیش از ۲۵ میلی‌لیتر بتن با نفوذپذیری بالا است. همچنین ارتباط معکوسی بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب مشاهده شد؛ به‌طوری‌که عمق نفوذ در بتن‌های

تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۰۴۰۹ به‌انجام رسیده است. This work is based upon research funded by Iran National Science foundation (INSF) under project No. 4030409.

مراجع

- ACI, ACI (2018); Concrete Terminology, ACI CT-18. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. (2017). Durability of concrete: design and construction (Vol. 20). CRC Press.
- ASTM C127-15 (2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128-15 (2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C136-19 (2019); Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- BS EN 12390-8; (2019). Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure. British Standards Institution London, UK .
- Chandrappa, A.K. & Biligiri, K.P. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, Construction and Building Materials, 123, 627-637.
- DIN 1048-5, (1991). In Testing concrete: testing of hardened concrete (specimens prepared in mould). German standard.

- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). Design and control of concrete mixtures Skokie, IL: Portland Cement Association. Vol. 5420. 60077-1083.
- Kou, S.C. & Poon, M. (2014). Etxeberria, Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 53, 73-82.
- Naderi, M. Kaboudan, A. and Kargarfard, K. (2022). Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 25-43.
- 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.
- 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.
- Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Investigating the effect of strength, time and amount of water pressure, and direction on concrete permeability. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 52(9), 2379-2398.
- 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.
- 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.
- Siddiqui, M. S., Nyberg, W., Smith, W., Blackwell, B., & Riding, K. A. (2013). Effect of curing water availability and composition on cement hydration. *ACI Materials Journal*, 110(3), 315-322.
- Springenschmid, R. (2007). *Betontechnologie für die Praxis*, 1st ed.; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany.
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* London: Thomas Telford. Book. (Vol. 2, p. 459).
- 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), 82-57.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.