

تأثیر عوامل تشکیل دهنده بتن بر نفوذ آب‌های سطحی

محمود نادری*، علیرضا کبودان

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

نفوذپذیری بتن
سنگدانه و خمیر سیمان
تحلیل رگرسیونی
پیچش
محفظه استوانه‌ای

خلاصه: بتن یکی از مصالحی است که در ساخت سازه‌های هیدرولیکی مصرف زیادی دارد. با توجه به اهمیت کم تراوا بودن چنین سازه‌هایی، نفوذپذیری به عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر عمر مفید و دوام آنها به شمار می‌رود. لذا، در این مقاله، تأثیر عوامل تشکیل دهنده بتن، یعنی سنگدانه، خمیر سیمان، مرز بین این دو و همچنین مقاومت سطحی بتن بر نفوذ آب سطحی به داخل بتن ارائه شده است. برای این مطالعات، نمونه‌های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، با بکارگیری انواع سنگدانه‌ها از قبیل گرانیات، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف ساخته شدند. این نمونه‌های بتنی، دارای سیمان پرتلند نوع ۲، دوده سیلیس، خاکستر بادی، ژئولیت و پودر سنگ آهک نیز بودند. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن به ترتیب از روش‌های محفظه استوانه‌ای و پیچش استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نفوذپذیری سنگ صخره از نفوذپذیری بتن ساخته شده با سنگدانه‌های حاصل از همان سنگ صخره، کمتر است. همچنین مشاهده گردید که نفوذپذیری خمیر سیمان سخت شده، بیشتر از نفوذپذیری بتن ساخته شده از همان خمیر سیمان است. به علاوه، تحلیل رگرسیونی نتایج مربوط به مقادیر نفوذپذیری سنگ‌های صخره، خمیر سیمان، ناحیه انتقال و مقاومت سطحی بتن‌ها نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از معادله رگرسیونی ارائه شده، حجم آب نفوذی به درون نمونه‌های بتنی را پیش‌بینی کرد. همچنین مشاهده شد که در مقایسه با سایر پارامترهای در نظر گرفته شده، خمیر سیمان و مقاومت سطحی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر نفوذپذیری بتن دارند.

۱- مقدمه

آن بستگی دارند. به همین دلیل بررسی تأثیر عوامل تشکیل دهنده بتن شامل نوع سنگدانه‌ها و سیمان بر نفوذپذیری آن از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱-۵]. سنگدانه‌ها یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده بتن هستند که تقریباً ۷۰ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند. آنها توسط خمیره سیمان احاطه شده‌اند و با افزایش طول مسیر جریان و قطع کردن ارتباط داخلی منافذ شبکه مویینه در خمیره سیمان، می‌توانند به عنوان عامل مهمی برای تعیین دوام بتن محسوب شوند. از طرفی، با توجه به نفوذپذیری کم سنگدانه‌ها و احاطه شدن آنها توسط خمیره سیمان، بررسی اثر خمیره سیمان بر نفوذپذیری بتن نیز بسیار

یک سازه بتنی علاوه بر دارا بودن مشخصات مکانیکی مطلوب، باید از دوام مناسبی نیز برخوردار باشد تا بتواند در طول عمر مفید سرویس‌دهی خود سطح قابل قبولی از عملکرد را ارائه نماید. بنابراین برای طراحی یک سازه بتنی باید عوامل تأثیرگذار بر دوام طولانی مدت آن نیز در نظر گرفته شود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط محققین، نفوذپذیری به عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر دوام بتن معرفی شده است. این ادعا به این دلیل است که بسیاری از عوامل خرابی بتن به حرکت رطوبت در منافذ

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir



نفوذناپذیرتر می‌شود [۱۴]. از خاکستر بادی نیز به طور وسیع در طرح مخلوط بتن به عنوان ماده جایگزین سیمان استفاده می‌شود. یکی از دلایل استفاده از این ماده در بتن، کاهش تولید حرارت و مشخصات دوامی بهتر بتن حاوی آن است. خاکستر بادی به علت دارا بودن خواص پوزولانی، سبب بهبود ریزساختار بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری آن می‌شود [۱۵]. از جمله مواد دیگر پر کاربرد جایگزین سیمان می‌توان به پودر سنگ آهک اشاره کرد. این ماده به علت سطح مخصوص بالای ذرات آن، سبب پر شدن فضاهای خالی بین ذرات سیمانی شده و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد [۱۶].

با توجه به مطالبی که در بالا مورد اشاره واقع شدند، ارزیابی عوامل مؤثر بر نفوذ آب به داخل بتن، به دلیل تأثیر آن بر دوام بتن دارای اهمیت ویژه‌ای است. از این رو در این مقاله اثر نوع سنگدانه و سیمان بر نفوذپذیری بتن بررسی شده است. ضمن اینکه نفوذپذیری بتن با مد نظر قرار دادن نفوذپذیری سنگدانه‌ها و خمیره سیمان، مرز بین این دو (ناحیه انتقال) و مقاومت سطحی بتن با استفاده از تحلیل رگرسیون تخمین زده شده است. از دیگر نوآوری‌های مقاله کنونی می‌توان به استفاده از روش‌های محفظه استوانه‌ای [۱۷] و پیش‌پیش [۱۸] برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن اشاره نمود. لازم به ذکر است که این روش‌ها بر خلاف بسیاری از روش‌های معمول که قابلیت انجام آزمایش‌ها در محل سازه را ندارند، امکان انجام آزمایش‌ها هم در محل سازه و هم در آزمایشگاه را فراهم می‌نمایند.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- آزمایش محفظه استوانه‌ای

در این مقاله، روش محفظه استوانه‌ای برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی بکار گرفته شده است [۱۷]. مهم‌ترین مزیت این روش بر سایر روش‌های موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری مانند روش تدوین شده در استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8) که تنها در آزمایشگاه قابل استفاده هستند، می‌توان به امکان انجام آزمایش هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه اشاره کرد. قابلیت انجام آزمایش در سطوح مختلف مانند سطوح قائم، افقی و شیب‌دار و محل‌هایی که نمونه‌گیری مشکل است، از مزایای این روش است. عدم وجود محدودیت برای ابعاد نمونه‌ای که قرار است نفوذپذیری آن ارزیابی

مهم است. باید توجه داشت که خمیره سیمان بسته به نوع مواد تشکیل‌دهنده‌اش، می‌تواند به میزان قابل توجهی بر نفوذپذیری ناحیه انتقال نیز تأثیرگذار باشد [۶، ۷].

در ارتباط با تأثیر سنگدانه‌ها بر نفوذپذیری بتن پژوهش‌هایی به انجام رسیده است که نشان می‌دهند بتن‌های دارای سنگدانه‌های بازالت و آهکی کمترین نفوذپذیری را داشته و استفاده همزمان از سنگدانه‌های بازالت، آهک، دیاباز و اندزیت در ساخت بتن موجب کاهش عمق نفوذ آب می‌شود [۸]. همچنین در مقاله‌ای گزارشی شده است که بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی، نفوذپذیری و تخلخل بیشتری نسبت به بتن دارای سنگدانه‌های گرانیتی دارد [۹]. محققینی گزارشی کرده‌اند که طرح مخلوطی که در آن مقدار ماسه بیشتر از مقدار شن باشد، به دلیل ساختار متراکم‌تر آن، نفوذپذیری کمتری دارد [۱۰]. به علاوه، محققینی با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در اثر فشار وارده به این نتیجه رسیدند که برای یک طرح مخلوط بتنی معلوم، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی دارای سنگدانه‌های با دانه‌بندی‌های مختلف با هم متفاوت است که بیانگر تأثیر چشمگیر اثر دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر نفوذپذیری بتن است [۱۱].

علاوه بر مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر نوع سنگدانه بر نفوذپذیری بتن، پژوهش‌هایی نیز در زمینه تأثیر افزودنی‌ها بر نفوذپذیری بتن انجام شده است. نتایج منتشره در مقاله‌ای نشان می‌دهند که نفوذپذیری مخلوط شاهد $10^{-14} \times 1/8$ متر بر ثانیه بود، در حالی که نفوذپذیری بتن حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی، کمتر از $10^{-17} \times 1$ متر بر ثانیه محاسبه شد [۱۲]. در مقاله‌ای دیگر، محققین گزارشی کرده‌اند که دوده سیلیسی با پر کردن خلل و فرج سبب کاهش تخلخل بتن و بهبود دوام آن می‌شود. همچنین بکارگیری دوده سیلیسی در بتن می‌تواند به طور مؤثر نرخ تخریب آن در برابر عوامل مخرب را کاهش دهد [۱۳]. زئولیت افزودنی دیگری است که با کاهش تخلخل و بهبود ساختار ناحیه انتقال بین ماتریس سیمان و سنگدانه باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که زئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. خواص پوزولانی زئولیت‌ها، همانند دوده سیلیسی، به علت وجود SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی آنها است. این ترکیبات با $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ایجاد شده در طول هیدراسیون سیمان واکنش داده و ژل ثانویه C-S-H تولید می‌کنند. در نتیجه ریزساختار بتن بهبود یافته و بتن



(ب) دستگاه "محفظه استوانه‌ای"



(الف) نمونه‌های بتنی آماده شده برای آزمایش "محفظه استوانه‌ای"



(پ) سنگ‌های صخره آماده شده برای انجام آزمایش "محفظه استوانه‌ای"

شکل ۱. «دستگاه و آزمایش محفظه استوانه‌ای».

Fig. 1. "Cylindrical chamber" test and apparatus- (a) Concrete specimens prepared for "Cylindrical chamber" test, (b) "Cylindrical chamber" apparatus, and (c) Rocks prepared for "Cylindrical chamber" test

صفحه پایه تثبیت می‌شود. پس از تثبیت دستگاه بر روی محل انجام آزمایش، محفظه آن با مایع مورد نظر پر شده و با بستن شیر ورودی مایع و چرخاندن اهرم دستی، فشار مورد نظر به آب داخل محفظه اعمال می‌شود که با استفاده از گیج تعبیه شده بر دستگاه مقدار آن قابل قرائت است (در این تحقیق فشار آبی برابر با ۵ بار به مدت ۵ ساعت به نمونه‌ها وارد شد). حفره‌ای نیز در محفظه فشار جهت خروج هوای محبوس شده احتمالی در دستگاه تعبیه شده است. مقدار نفوذ مایع در نمونه را می‌توان از طریق میکرومتر تعبیه شده بر روی دستگاه در زمان‌های مختلف قرائت کرد. با استفاده از قرائت‌های میکرومتر در زمان‌های ثبت شده و سطحی که آب از آن به نمونه نفوذ می‌کند (سطح داخلی صفحه پایه)، مقدار حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی و متوسط نرخ نفوذ آب در هر لحظه از زمان قابل محاسبه است. یادآور می‌شود که با بکارگیری روش‌های آزمایشگاهی

شود، قابلیت حمل دستگاه، امکان انجام آزمایش به دفعات، هزینه اندک دستگاه آزمایش از مزایای دیگر این روش هستند. همچنین با محاسبه حجم مایع نفوذ کرده به محل آزمایش شده، نیازی به شکستن نمونه مورد بررسی برای اندازه‌گیری عمق نفوذ نیست که این امکان در روش‌های معمول دیگر مانند استاندارد بریتانیا وجود ندارد. شایان ذکر است که اعتبار و صحت نتایج به دست آمده با بکارگیری روش محفظه استوانه‌ای در پژوهشی که توسط محققین مقاله کنونی صورت گرفت، ارزیابی شده است [۱۹، ۲۰].

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای ارزیابی نفوذپذیری با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای، به سطح تقریبی برابر با ۱۵ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر نیاز است. در این روش صفحه فلزی پایه توسط چسب اپوکسی بر روی سطح نمونه چسبانده شده و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، دستگاه آزمایش بر روی



(ب) صفحه‌های فلزی جدا شده از سطح نمونه بتنی



(الف) آزمون "پیچش"



(پ) سنگ‌های صخره آماده شده برای آزمون "پیچش"

شکل ۲- روش پیچش

Fig. 2. "Twist-off" method- (a) "Twist-off" test, (b) Metallic base plates separated from concrete surface, and (c) Rocks prepared for "Twist-off" test

با ملات معمولی قابل ترمیم است. گزارش شده است که رابطه خطی بین گشتاور پیچشی به دست آمده با استفاده از آزمایش پیچش و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی وجود دارد و با داشتن مقدار گشتاور پیچشی، مقاومت فشاری را می‌توان محاسبه کرد [۲۱]. نحوه اندازه‌گیری مقاومت سطحی با استفاده از این روش، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- مشخصات مصالح و طرح مخلوط نمونه‌های بتنی

در آزمایش‌های صورت گرفته، نفوذپذیری نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه بتنی و خمیره سیمان با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و سنگ‌های صخره با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای اندازه‌گیری شد. مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی نیز با استفاده از روش پیچش اندازه‌گیری گردید. همچنین، برای ساخت بتن‌های مورد مطالعه از سنگدانه‌های گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف و مواد جایگزین سیمان

موجود برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مانند روش استاندارد بریتانیا این متغیرها قابل محاسبه نیستند.

۲-۲- آزمون پیچش

در این روش، ابتدا استوانه‌های فلزی با ابعاد مشخص توسط چسب اپوکسی بر روی سطح نمونه چسبانده شده و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، با استفاده از یک دستگاه پیچش‌سنج، لنگر پیچشی لازم برای جدا کردن صفحه‌های فلزی از سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود. پس از جدا شدن صفحه‌ها، به طور چشمی محل جدا شدن صفحه از نمونه بررسی شده تا اطمینان حاصل شود که جداسازی از سطح بتن باشد. در صورتی که جداسازی از سطح چسب باشد، نتایج آزمایش نامعتبر خواهد بود [۱۸].

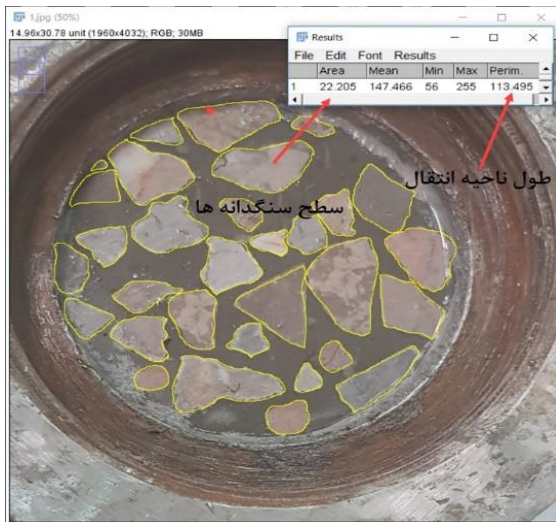
از این روش می‌توان در محل سازه نیز استفاده کرد. همچنین خرابی جزئی به وجود آمده در اثر جدا شدن صفحه فلزی به سادگی

جدول ۱. طرح‌های مخلوط نمونه‌های بتنی آزمایش شده برای یک متر مکعب بتن
Table 1. Concrete mix designs of the tested concrete specimens per cubic meter of concrete

نوع سنگدانه	نوع ماده جایگزین سیمان	سیمان پرتلند نوع ۲ (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (درصد کل وزن مواد سیمانی)	سنگدانه (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان
گرانیت	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۷۸۸	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		
اندزیت	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۷۲۳	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		
سیلیس	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۶۷۱	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		
آهک	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۶۷۷	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		
مرمر	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۶۵۱	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		
توف	-	۳۵۰	۱۷۵	-	۱۴۹۵	۰/۵
	دوده سیلیس	۳۱۵		۰/۷۵		
	خاکستر بادی			-		
	زئولیت			۰/۵۵		
	پودر سنگ آهک			-		

برای ساخت نمونه‌های بتنی بکار گرفته شدند. طرح‌های مخلوط بتنی بکار گرفته شده، در جدول ۱ آورده شده است. این طرح‌ها به گونه‌ای محاسبه شده‌اند که از حجم یکسانی از سنگدانه‌ها برای ساخت بتن‌ها استفاده شود. شایان ذکر است که در این مقاله از نتایج

دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک استفاده شد. مقدار جایگزینی این مواد برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان پرتلند نوع ۲ بود. سنگدانه‌های مصرفی نیز در حالت اشباع با سطح خشک بودند و پس از شکستن سنگ‌های صخره در دستگاه سنگ‌شکن،



شکل ۳. اندازه‌گیری سطح سنگدانه‌ها و طول ناحیه انتقال.
Fig. 3. Measuring aggregates surface area and length of interfacial transition zone

حجم آب نفوذی خمیر سیمان (میلی‌لیتر)، L طول ناحیه انتقال در سطح برش خورده و F_s مقاومت سطحی (مگاپاسکال) نمونه‌های بتنی است. C_1, C_2, C_3 و C_4 نیز ضرایب ثابت متغیرهای مورد بررسی در مدل رگرسیونی هستند. C_5 نیز مقدار ثابت معادله است. با توجه به اینکه آب از سطح بتن به درون آن نفوذ می‌کند، متغیر مقاومت سطحی در معادله (۱) در نظر گرفته شده است. سطح بتن نیز شامل سنگدانه‌ها و خمیر سیمان است. در نتیجه این معادله با در نظر گرفتن نسبت سطحی سنگدانه‌ها و خمیر سیمان در نفوذپذیری آنها ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حاصل از روش محفظه استوانه‌ای

در شکل ۴ تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره و نمونه‌های خمیر سیمان نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که در ابتدای آزمایش، آب با سرعت بیشتری به داخل سنگ‌های صخره و نمونه‌های خمیر سیمان نفوذ می‌کند و با افزایش زمان از سرعت نفوذ آب کاسته می‌شود، زیرا منافذ بیشتری با آب پر می‌شوند. با بررسی تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره می‌توان دریافت که کمترین حجم آب نفوذی مربوط به سنگ گرانیت و بیشترین آن مربوط به سنگ توف است. سنگ‌های مرمر، آهک، سیلیس و اندزیت نیز به ترتیب در رده‌های

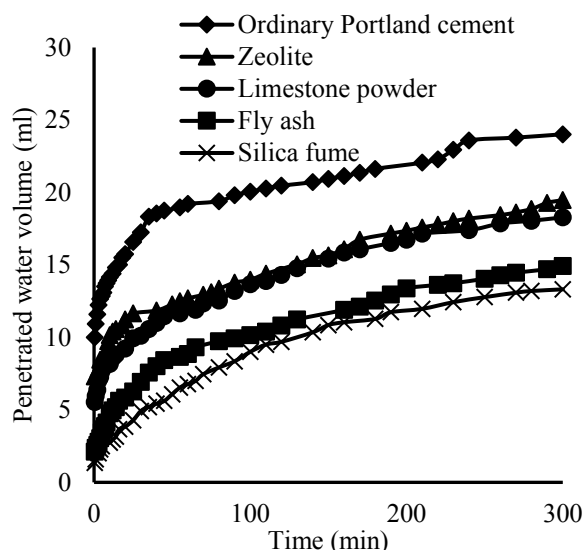
به دست آمده از ۸۲ آزمایش محفظه استوانه‌ای برای نمونه‌های بتنی، خمیر سیمان و سنگ‌های صخره و همچنین ۱۲۳ آزمایش پیش‌برای نمونه‌های بتنی استفاده شده است. همچنین سعی گردید تا با فراهم آوردن شرایط یکسان برای ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، نتایج دقیق‌تری برای تحلیل و بررسی حاصل شود. ضریب تغییرات به دست آمده برای نتایج حاصله از این آزمایش‌ها که کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شدند نیز بیانگر این مطلب هستند.

برای ارزیابی دقیق نفوذپذیری مورد نظر، مساحت سنگدانه‌ها در سطح بتن اندازه‌گیری شد. بنابراین دانه‌بندی سنگدانه‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که سطح آنها برای اندازه‌گیری قابل تشخیص باشد. بدین منظور از سنگدانه‌های رد شده از الک ۰/۷۵ اینچ و مانده روی الک ۰/۵۰ اینچ استفاده شد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن‌ها، ۳ سانتی‌متر از ارتفاع نمونه‌های بتنی مورد نظر توسط دستگاه برش بریده شد و از این سطح برای ارزیابی نفوذپذیری استفاده گردید. همچنین از نتایج نفوذپذیری به دست آمده برای ۶۰ نمونه بتنی مکعبی برای انجام تحلیل رگرسیونی استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای ارزیابی نفوذپذیری، فشار آبی برابر با ۵ بار به مدت ۵ ساعت به سطح نمونه‌های بتنی وارد شد.

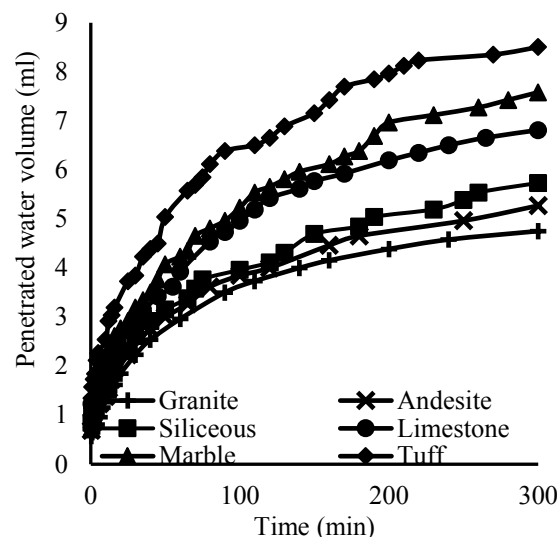
برای اندازه‌گیری سطح سنگدانه‌ها و خمیر سیمان و طول مرز بین این دو از برنامه آنالیز تصویر استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا طول مشخصی روی کولیس انتخاب گردید و مقدار آن به عنوان طول مقیاس به برنامه معرفی شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در عکس با توجه به این طول انجام می‌شود. سپس به کمک برنامه آنالیز تصویر سطح سنگدانه‌ها و خمیر سیمان و طول ناحیه انتقال محاسبه شد. بدین منظور محیط سنگدانه‌ها در سطح نفوذ با منحنی‌هایی مشخص گردید (شکل ۳). محیط این منحنی‌ها برابر با طول ناحیه انتقال در سطح نفوذ آب (L) و سطح آنها برابر با سطح سنگدانه‌هاست (S_a). سطح خمیر سیمان (S_p) نیز از تفاضل سطح سنگدانه‌ها از سطح داخلی صفحه فلزی پایه (S_b) به دست می‌آید. در این پژوهش، معادله (۱) برای تخمین حجم آب نفوذی پیشنهاد شده است:

$$V = C_1 \frac{S_a}{S_b} V_a + C_2 \frac{S_p}{S_b} V_p + C_3 L + C_4 F_s + C_5 = C_1 C_a + C_2 C_p + C_3 L + C_4 F_s + C_5 \quad (1)$$

در رابطه بالا V_a حجم آب نفوذی سنگ صخره (میلی‌لیتر)، V_p



(ب) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های خمیرهای سیمان



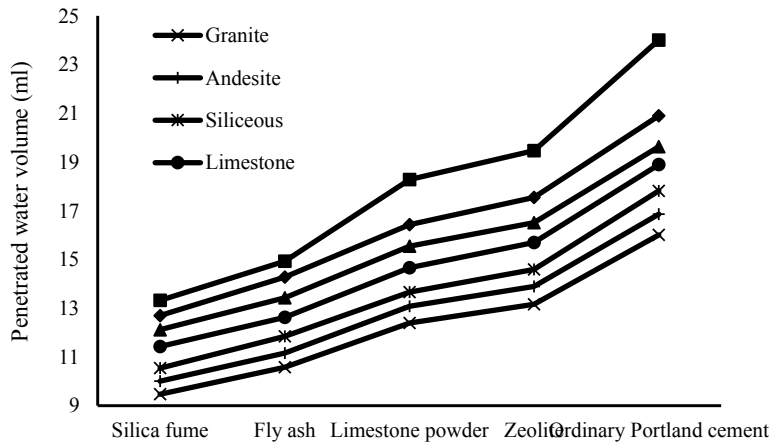
(الف) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره

شکل ۴. تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره و نمونه‌های خمیر سیمان

Fig. 4. Variation of penetrated water volume against time for rocks and cement paste specimens- (a) Variation of penetrated water volume against time for rocks, (b) Variation of penetrated water volume against time for cement paste specimens

پوزولانی ندارد و عمدتاً به عنوان یک ماده پرکننده، نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. البته پودر سنگ آهک سبب تغییر شیمیایی واکنش هیدراسیون نیز می‌شود. در اثر واکنش کلسیم‌کربنات آن با آلومینات‌های سیمان، کربوآلومینات تشکیل شده که باعث جلوگیری یا تأخیر در تبدیل اترینگایت-مونوسولفوآلومینات می‌شود. در نتیجه اترینگایت تثبیت شده و حجم محصولات هیدراسیون افزایش می‌یابد. در شکل ۵ حجم‌های آب نفوذی پس از ۵ ساعت برای خمیرهای سیمان و نمونه‌های بتنی ساخته شده با استفاده از مواد افزودنی و سنگدانه‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌ها و خمیرهای سیمان نفوذناپذیرتر از نفوذپذیری کمتری برخوردار هستند. همچنین مقایسه اشکال ۴ و ۵ نشان می‌دهد که سنگ‌های صخره، به دلیل ساختار متراکم‌تر، نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ صخره دارند. ناحیه مرزی بین خمیر سیمان و سنگدانه نیز سبب افزایش نفوذپذیری بتن‌ها می‌شود. این ناحیه دارای ساختار متخلخل‌تری نسبت به بتن، خمیر سیمان و سنگدانه‌ها است. بنابراین انتخاب سنگ صخره مناسب در طرح مخلوط بتن می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش نفوذپذیری آن داشته باشد. از نتایج دیگری که با بررسی شکل ۵ می‌توان به آن اشاره کرد، بیشتر بودن

دوم تا پنجم از نظر بیشترین حجم آب نفوذی به داخل سنگ‌های صخره قرار دارند. ساختار متراکم‌تر برای یک سنگ صخره سبب نفوذپذیری کمتر آن سنگ صخره می‌شود. در مورد نمونه‌های خمیر سیمان، بیشترین حجم آب نفوذی مربوط به نمونه دارای سیمان پرتلند نوع ۲ و کمترین حجم آب نفوذی مربوط به نمونه‌ای است که در آن ۱۰ درصد وزن سیمان پرتلند نوع ۲ با دوده سیلیسی جایگزین شده است. نمونه‌های حاوی مواد افزودنی زئولیت، پودر سنگ آهک و خاکستر بادی نیز در مرتبه‌های دوم تا چهارم از نظر بیشترین حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های خمیر سیمان قرار دارند. همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که جایگزین کردن ۱۰ درصد وزن سیمان با مواد افزودنی مورد مطالعه، سبب کاهش حجم آب نفوذی نسبت به نمونه بدون افزودنی شده است. در ارتباط با خمیرهای سیمان حاوی پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت، واکنش پوزولانی سبب ایجاد ساختار متراکم‌تر می‌شود. در این واکنش ذرات پوزولان‌ها با کلسیم هیدروکسید تولید شده از واکنش سیمان پرتلند معمولی واکنش داده و تولید ژل ثانویه C-S-H می‌کند. این ژل خاصیت پرکنندگی منافذ را دارد. ضمن اینکه مواد پوزولانی استفاده شده به دلیل سطح مخصوص بالایی که دارند، فضای خالی بین ذرات سیمانی را پر می‌کنند. شایان ذکر است که پودر سنگ آهک خاصیت



شکل ۵. حجم آب نفوذی به داخل خمیرهای سیمان و بتن‌های حاوی سنگدانه‌های و افزودنی‌های مختلف.

Fig. 5. Penetrated water volume into the cement pastes and concretes, containing different types of aggregates and admixtures

جدول ۲. آماره‌های توصیفی برای مدل رگرسیونی
Table 2. Descriptive statistics for the regression models

متغیر	تعداد مشاهدات	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف استاندارد
حجم آب نفوذی (میلی‌لیتر) (V)	۶۰	۹/۲۴	۲۱/۲۴	۱۴/۲۵	۲/۹۲
حاصل ضرب نسبت سطح سنگدانه‌ها به سطح کل در حجم آب نفوذی سنگ صخره (میلی‌لیتر) (C_a)	۶۰	۲/۳۲	۶/۶۶	۴/۰۵	۱/۱۱
حاصل ضرب نسبت سطح خمیر سیمان به سطح کل در حجم آب نفوذی خمیر سیمان (میلی‌لیتر) (C_p)	۶۰	۳/۰۴	۱۲/۱۶	۶/۷۴	۲/۳۳
طول ناحیه انتقال (سانتی‌متر) (L)	۶۰	۹۷/۵۰	۱۶۲/۹۲	۱۳۴/۱۹	۱۶/۹۸
مقاومت سطحی (مگاپاسکال) (F_s)	۶۰	۴/۷۰	۱۳/۳۷	۹/۴۳	۲/۰۹

قابل مشاهده است. در این شکل پراکندگی بالایی برای متغیرهای مستقل مختلف مورد بررسی مشاهده می‌شود. در نتیجه انتظار می‌رود که مشکل هم‌خطی در مدل رگرسیونی وجود نداشته باشد. البته این مورد باید بررسی شود. مورد دیگری که بررسی آن برای مدل رگرسیونی ضروری است، نرمال بودن توزیع متغیر حجم آب نفوذی برای نمونه‌های بتنی است. در شکل ۷ هیستوگرام حجم‌های آب نفوذی برای نمونه‌های بتنی به همراه توزیع نرمال آنها رسم شده است. همان‌گونه که این شکل دیده می‌شود، حجم‌های آب نفوذی دارای توزیع تقریباً نرمالی هستند.

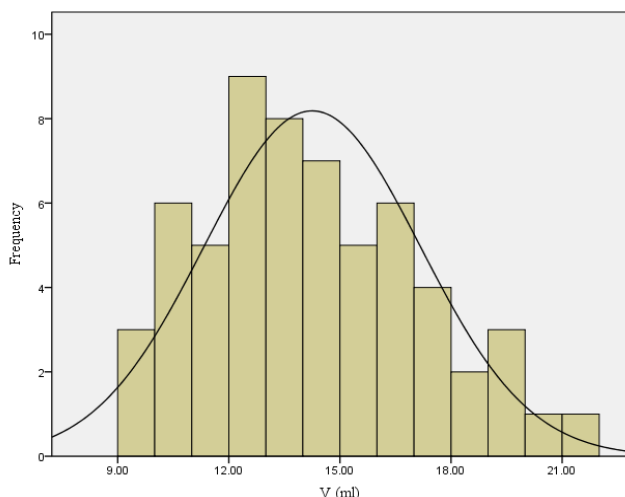
برای بررسی دقیق‌تر نرمال بودن توزیع حجم آب نفوذی از آزمون کشیدگی و چولگی استفاده شده است. برای اینکه حجم‌های آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی دارای توزیع نرمال باشند، باید مقادیر محاسبه شده برای چولگی و کشیدگی این متغیر در بازه (۲، -۲) قرار داشته باشند. مقادیر درج شده در جدول ۳ نشان می‌دهند که

نفوذپذیری خمیر سیمان از نفوذپذیری نمونه بتنی ساخته شده با همان خمیر سیمان است. همان‌طور که گفته شد، ناحیه انتقال نفوذپذیری بیشتری نسبت به دو فاز سنگدانه و خمیر سیمان دارد و سبب افزایش نفوذپذیری بتن می‌شود. اما با توجه به اینکه سنگدانه‌ها حجم قابل توجهی از بتن را تشکیل می‌دهند، نفوذپذیری کمتری برای بتن‌ها نسبت به خمیر سیمان استفاده شده در همان بتن‌ها حاصل شده است.

۴-۲- نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی برای تخمین حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی

در جدول ۲ آماره‌های توصیفی برای متغیرهای در نظر گرفته شده در مدل رگرسیونی شامل مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف استاندارد و تعداد مشاهدات انجام شده آورده شده است.

ماتریس پراکنش برای متغیرهای مورد بررسی نیز در شکل ۶



شکل ۷. هیستوگرام برای متغیر حجم آب نفوذی.
Fig. 7. Histogram of penetrated water volume

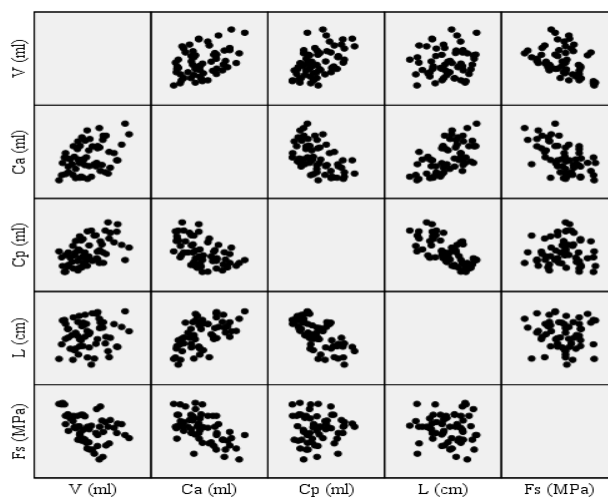
جدول ۳. مقادیر چولگی و کشیدگی برای حجم آب نفوذی
Table 3. Skewness and kurtosis values of penetrated water volume

کشیدگی	چولگی	متغیر
-۰/۴۸۴	۰/۴۲۸	حجم آب نفوذی (میلی لیتر)

جدول ۴. ضرایب همبستگی برای روابط بین متغیرها
Table 4. Correlation coefficients for the relationships between the variables

	V (ml)	Ca (ml)	Cp (ml)	L (cm)	F _s (MPa)
V (ml)	۱/۰۰۰	۰/۳۹۶	۰/۴۸۹	۰/۱۰۰	-۰/۴۰۶
Ca (ml)	۰/۳۹۶	۱/۰۰۰	-۰/۵۱۶	۰/۵۷۱	-۰/۵۶۷
Cp (ml)	۰/۴۸۹	-۰/۵۱۶	۱/۰۰۰	-۰/۶۶۴	-۰/۰۰۱
L (cm)	۰/۱۰۰	۰/۵۷۱	-۰/۶۶۴	۱/۰۰۰	-۰/۰۶۸
F _s (MPa)	-۰/۴۰۶	-۰/۵۶۷	-۰/۰۰۱	-۰/۰۶۸	۱/۰۰۰

R^2 و R^2 تعدیل شده بیانگر آن است که متغیرهای مستقل مناسبی برای مدل رگرسیونی انتخاب شده‌اند. یکی از شروط لازم برای مدل رگرسیونی این است که بین خطاهای حاصله برای مدل رگرسیونی همبستگی وجود نداشته باشد، به عبارتی دیگر خطاها استقلال داشته باشند. این شرط با بررسی مقدار آماره دوربین-واتسون ارزیابی می‌شود. برای مثال در مدل اول آماره دوربین-واتسون برابر با ۱/۸۰۱ محاسبه شده است. در صورتی که این آماره در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ باشد، باقیمانده‌ها مستقل هستند. بنابراین شرط مستقل بودن خطاها برای هر دو مدل برقرار است.



شکل ۶. ماتریس پراکنش برای متغیرهای مدل رگرسیونی.
Fig. 6. Scatter matrix for the variables of regression model

حجم‌های آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی دارای توزیع نرمالی هستند.

ضرایب همبستگی پیرسون برای متغیرهای مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده‌اند. با بررسی اعداد مندرج در این جدول دیده می‌شود که بیشترین مقدار برای قدر مطلق ضریب همبستگی برابر با ۰/۶۶۴ (به غیر از مقادیر قطری که برابر با ۱/۰۰۰ هستند) و کمترین مقدار قدر مطلق این ضریب برابر با ۰/۰۰۱ است.

در این مقاله، از روش حذف پسرو (Backward Method) برای انجام تحلیل رگرسیونی استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا متغیرهایی که بیشترین تأثیر را بر این مدل رگرسیونی دارند وارد معادله مربوطه کرده و به تدریج از مدل حذف می‌گردند.

در جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج آماری به دست آمده از تحلیل رگرسیونی شامل ضرایب همبستگی، ضرایب تعیین، مقادیر تعدیل شده آنها و آماره دوربین-واتسون آورده شده است. منظور از مدل یک در این جدول، مدلی است که در آن تمامی متغیرهای انتخابی در تحلیل رگرسیونی شرکت داده شده‌اند. در مدل دوم نیز با توجه به مدل اول، تنها متغیرهایی وارد تحلیل رگرسیونی شده‌اند که بیشترین تأثیر را بر حجم آب نفوذی دارند. در مدل دوم متغیر مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی از تحلیل رگرسیونی حذف شده است. برای مثال ضریب تعیین تعدیل شده برای مدل اول که برابر با ۰/۹۱۱ محاسبه شده است، بیانگر آن است که متغیرهای مستقل ۹۱/۱ درصد از تغییرات حجم آب نفوذی را پیش‌بینی می‌کنند. کمتر بودن تفاضل

جدول ۵. خلاصه‌ای از نتایج آماری مربوط به مدل رگرسیونی
Table 5. A brief summary of the results for the regression model

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	آماره دوربین-واتسون
a ₁	۰/۹۵۸	۰/۹۱۷	۰/۹۱۱	۱/۸۰۱
b ₂	۰/۹۵۶	۰/۹۱۳	۰/۹۰۹	۱/۷۲۰

(a) متغیرهای مستقل: Constant, F_s (MPa), C_p (ml), L (cm), Ca (ml)
(b) متغیرهای مستقل: Constant, C_p (ml), L (cm), Ca (ml)

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس برای مدل رگرسیونی
Table 6. The results of the variance analysis of the regression model

Model	Sum of Squares	F	Sig.
Regression	۴۶۲/۸۰۸	۱۵۲/۷۱۹	۰/۰۰۰
۱ Residual	۴۱/۶۶۹		
Total	۵۰۴/۴۷۷		
Regression	۴۶۰/۷۲۹	۱۹۶/۵۸۴	۰/۰۰۰
۲ Residual	۴۳/۷۴۹		
Total	۵۰۴/۴۷۷		

در جدول ۶ نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای این مدل رگرسیونی نشان داده شده است. در این جدول منبع تغییرات متغیر وابسته در دو منبع رگرسیون (Regression) و باقیمانده (Residual) قابل مشاهده است. سطر Total نیز برابر با مجموع مقادیر برای دو منبع ذکر شده است. در ستون‌های سوم تا پنجم نیز به ترتیب مجموع مربعات، آماره فیشر و سطح معناداری این آماره آورده شده‌اند. هر چه مقدار مجموع مجذور باقیمانده‌ها کوچکتر از مجموع مجذورهای رگرسیون باشد، قدرت تبیین‌گری بالاتری در توضیح متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل دیده می‌شود. برای مثال برای مرحله اول مجموع مجذور باقیمانده‌ها برابر با ۴۱/۶۶۹ محاسبه شده است که کوچکتر از مجموع مجذورهای رگرسیون با مقداری برابر با ۴۶۲/۸۰۸ است. آماره F که از تقسیم میانگین مجذورهای رگرسیون (MSR) بر میانگین مجذور باقیمانده‌ها (MSE) محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده این است که آیا متغیرهای مستقل قادر به پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته هستند یا خیر. سطح معناداری مربوط به این آماره برای این مدل رگرسیونی، قبل و پس از حذف متغیر مقاومت سطحی تقریباً برابر با صفر است. بنابراین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی مناسب خواهد بود.

در جدول ۷ ضرایب غیر استاندارد و استاندارد شده برای متغیرهای مدل رگرسیونی، آماره t ، سطح معناداری این آماره، آماره تحمل و عامل تورم واریانس برای هر یک از متغیرها برای هر دو مرحله از این تحلیل رگرسیونی آورده شده است. با توجه به اعداد مندرج در این جدول، معادلات به دست آمده برای تخمین حجم آب نفوذی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$V = 2.146 \frac{S_a}{S_b} V_a + 1.504 \frac{S_p}{S_b} V_p + 0.075L + 0.122F_s - 15.779 \quad (2)$$

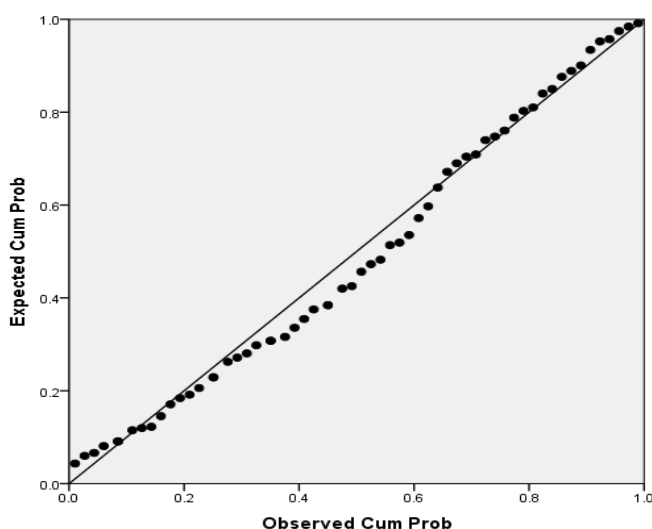
$$V = 1.952 \frac{S_a}{S_b} V_a + 1.472 \frac{S_p}{S_b} V_p + 0.078L - 14.077 \quad (3)$$

آماره t در جدول ۷ اهمیت نسبی حضور متغیرهای مستقل را در مدل رگرسیونی نشان می‌دهد. در این جدول دیده می‌شود که مقدار معناداری مربوط به متغیر مقاومت سطحی در ستون آخر، برابر با ۰/۱۰۳ محاسبه شده که بزرگتر از ۰/۰۵ است. بنابراین می‌توان این متغیر را از مدل حذف کرد، زیرا تأثیر قابل توجهی بر تغییرات حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی ندارد. به همین دلیل است که این متغیر در مرحله دوم این مدل رگرسیونی حذف شده است. علت این مطلب این است که عوامل متفاوتی بر نفوذپذیری و مقاومت سطحی تأثیرگذار هستند. نفوذپذیری به ریزساختار نمونه بتنی، ارتباط و پیوستگی منافذ و مقدار حجمی منافذ نفوذپذیر بستگی دارد. در صورتی که مقاومت سطحی نشان‌دهنده مقاومت سطح در برابر جدا شدن صفحه‌های فلزی است که به چسبندگی صفحه‌های فلزی و سطح بتن بستگی دارد.

از آنجا که متغیرهای مستقل واحدهای متفاوتی دارند، برای ارزیابی سهم هر متغیر مستقل در تبیین تغییرات یا واریانس متغیر وابسته از ضرایب استاندارد شده استفاده می‌شود. برای مرحله اول از جدول ۷ که شامل تمامی متغیرهای مستقل انتخابی است، مشاهده می‌شود که بیشترین ضریب استاندارد شده مربوط به متغیر $\frac{S_p}{S_b} V_p$

جدول ۷. ضرایب به دست آمده برای مدل رگرسیونی
Table 7. Coefficients obtained for the regression model

Model	ضرایب استاندارد		آماره t	سطح معناداری	بررسی هم خطی		
	B	Beta			عامل تورم واریانس	آماره تحمل	
Constant	-۱۵/۷۷۹		-۸/۵۳۹	۰/۰۰۰			
۱	C_a (ml)	۲/۱۴۶	۰/۸۱۶	۱۲/۴۰۵	۰/۰۰۰	۰/۳۴۷	۲/۸۸۴
	C_p (ml)	۱/۵۰۴	۱/۱۹۹	۲۱/۶۸۴	۰/۰۰۰	۰/۴۹۱	۲/۰۳۵
	L (cm)	۰/۰۷۵	-۰/۴۳۵	۷/۶۷۱	۰/۰۰۰	۰/۴۶۷	۲/۱۴۱
	F_s (MPa)	۰/۱۲۲	-۰/۰۸۸	۱/۶۵۷	۰/۱۰۳	۰/۵۳۷	۱/۸۶۲
Constant	-۱۴/۰۷۷		-۹/۰۲۵	۰/۰۰۰			
۲	C_a (ml)	۱/۹۵۲	۰/۷۴۳	۱۵/۰۹۹	۰/۰۰۰	۰/۶۴۰	۱/۵۶۲
	C_p (ml)	۱/۴۷۲	۱/۱۷۴	۲۱/۷۴۵	۰/۰۰۰	۰/۵۳۲	۱/۸۸۱
	L (cm)	۰/۰۷۸	-۰/۴۵۴	۸/۰۶۹	۰/۰۰۰	۰/۴۸۸	۰/۰۴۸

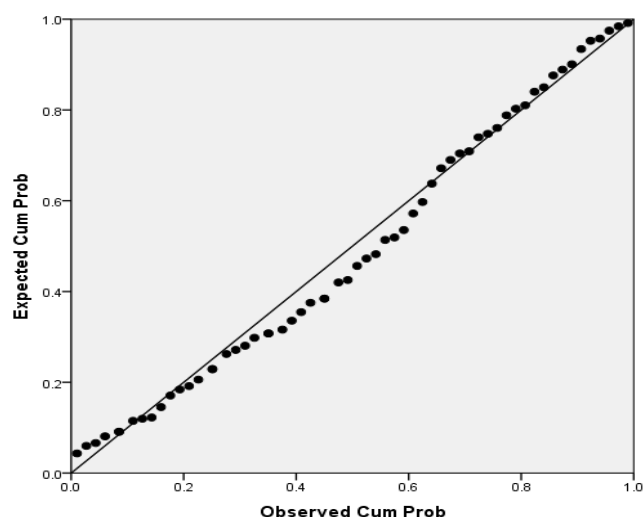


شکل ۹. نمودار مقادیر باقیمانده‌های استاندارد در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده استاندارد.

Fig. 9. Diagram of standardized residuals against standardized predicted values

در دو ستون آخر جدول ۷ دیده می‌شوند، برای بررسی وجود هم خطی در مدل رگرسیونی هستند. اگر بیشترین مقدار عامل تورم واریانس بزرگتر از ۱۰ باشد، هم خطی اثر نامطلوبی در مدل برای تخمین متغیر وابسته خواهد داشت. در جدول ۷ مشاهده می‌شود که بیشترین عامل تورم واریانس در مرحله اول و دوم تحلیل رگرسیونی به ترتیب برابر با ۲/۸۸۴ و ۱/۸۸۱ محاسبه شده‌اند. بنابراین هم خطی مشکلی برای مدل رگرسیونی ایجاد نمی‌کند.

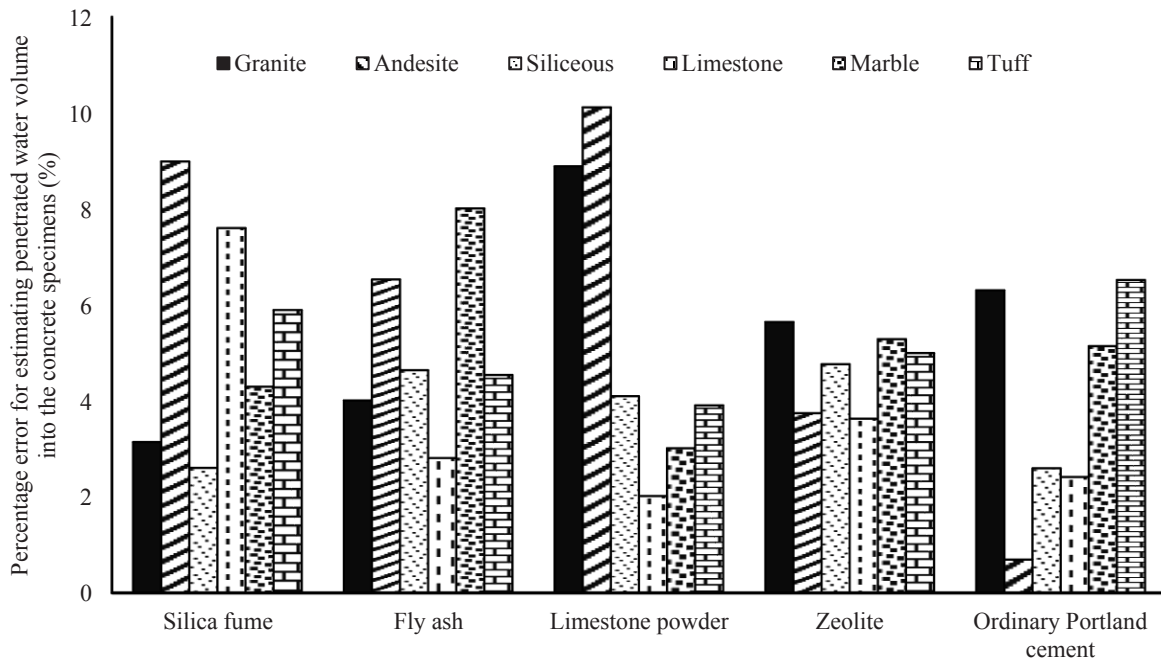
برای بررسی نرمال بودن و همسانی باقیمانده‌ها اشکال ۸ و ۹ رسم شده‌اند. در شکل ۸ هرچه نقاط نزدیک‌تر به محور قطری باشند،



شکل ۸. بررسی نرمال بودن باقیمانده‌ها.
Fig. 8. Evaluation of the normality of residuals

برابر با ۱/۱۹۹ محاسبه شده است. بنابراین این متغیر بیشترین تأثیر را بر حجم آب نفوذی نمونه‌های بتنی دارد. این عدد بیانگر این است که با ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرهای مستقل، افزایشی به مقدار ۲/۰۹ میلی‌لیتر برای متغیر $\frac{S_p}{S_b} V_p$ (۲/۰۹ = انحراف استاندارد متغیر $\frac{S_p}{S_b} V_p$) که معادل با ۱ واحد افزایش در متغیر استاندارد شده آن است، موجب افزایش حجم آب نفوذی به مقدار ۱/۱۹۹ برابر انحراف استاندارد آن (۲/۹۲ = انحراف استاندارد حجم آب نفوذی) می‌شود. متغیرهای F_s ، L و $\frac{S_a}{S_b} V_a$ نیز به ترتیب در مرتبه‌های بعدی از نظر بیشترین تأثیر بر متغیر حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی قرار دارند.

آماره تحمل و عامل تورم واریانس (معکوس آماره تحمل) نیز که



شکل ۱۰. میانگین قدر مطلق درصد خطا برای پیش‌بینی حجم آب نفوذی با در نظر گرفتن متغیرهای C_a ، C_p ، L و F_s
Fig. 10. The average of absolute percentage errors for estimating penetrated water volume, considering the variables of C_a , C_p , L , and F_s

اندزیت و سیمان پرتلند نوع ۲ محاسبه شده است. میانگین خطاها نیز برابر با ۴/۸۹ درصد است.

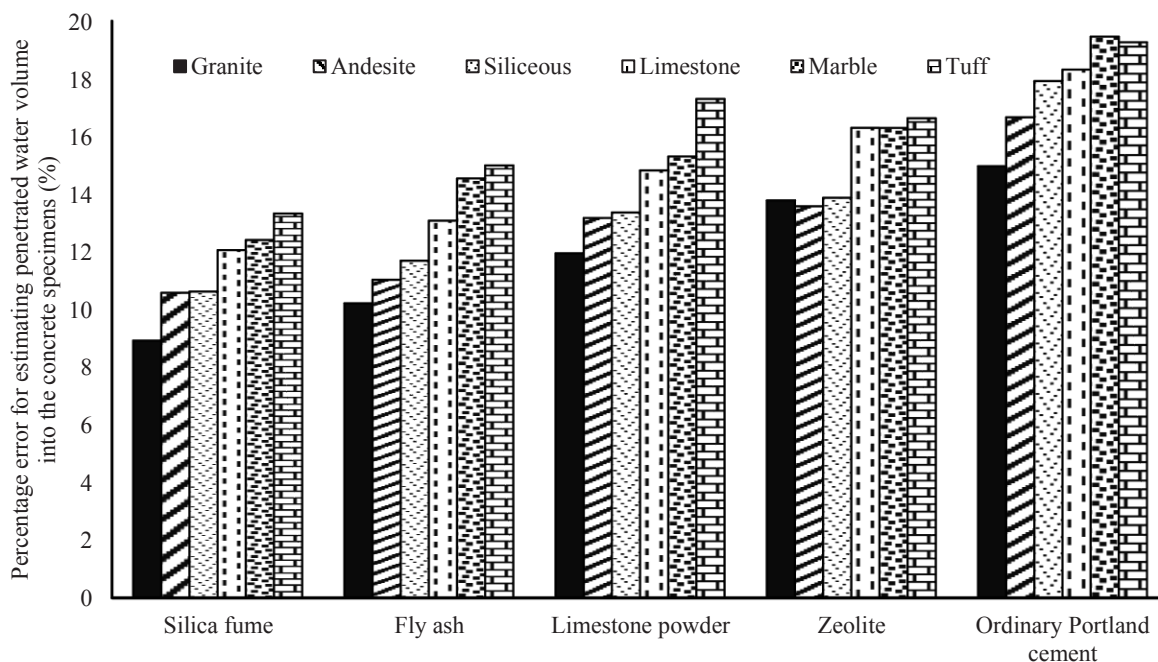
در شکل ۱۱ نیز میانگین قدر مطلق درصد خطاها برای پیش‌بینی حجم آب نفوذی بدون در نظر گرفتن متغیر مقاومت سطحی نشان داده شده است. برای این مدل کمینه و بیشینه خطا به ترتیب برابر با ۱۹/۴۶ و ۸/۹۱ درصد محاسبه شده‌اند. میانگین خطاها نیز برابر با ۱۴/۲۱ درصد است. مشاهده می‌شود که با حذف متغیر مقاومت سطحی از مدل رگرسیونی، میانگین خطاها به مقدار ۹/۳۲ درصد افزایش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر اثر عوامل تشکیل‌دهنده بتن بر نفوذپذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که سنگ صخره از نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ صخره برخوردار است. به علاوه، خمیر سیمان از بتن ساخته شده حاوی همان خمیر سیمان نفوذپذیرتر است. همچنین، یک تحلیل رگرسیونی با مد نظر قرار دادن نفوذپذیری سنگ‌های صخره و خمیرهای سیمان، طول ناحیه انتقال و مقاومت سطحی بتن‌ها برای تخمین حجم آب نفوذی به نمونه‌های

احتمال تجمعی شده به احتمال تجمعی مورد نظر نزدیک‌تر است و معادله رگرسیونی دقیق‌تر می‌تواند متغیر وابسته را پیش‌بینی کند. همچنین تجمع نقاط حول محور قطری نشان‌دهنده نرمال بودن باقیمانده‌هاست. در این شکل ۸ مشاهده می‌شود که نقاط رسم شده حول محور قطری توزیع شده‌اند و باقیمانده‌ها نرمال هستند. همچنین الگوی خاصی برای نمودار رسم شده در شکل ۹ مشاهده نمی‌شود که بیانگر همسان بودن واریانس خطاها است. در این شکل منحنی لس (loess) که خط هموار عبوری از یک سری نقاط پراکنده را نشان می‌دهد رسم شده است. منحنی لس نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی استاندارد شده و باقیمانده‌های استاندارد شده تقریباً حول خطی با مقدار صفر پراکنده شده‌اند.

در شکل ۱۰ میانگین قدر مطلق درصد خطاهای محاسبه شده برای تخمین حجم آب نفوذی برای مدلی که شامل تمام متغیرهای مستقل انتخابی است، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مدل رگرسیونی با دقت بسیار بالایی حجم آب نفوذی را با توجه به مقادیر متغیرهای مستقل تخمین می‌زند. بیشترین خطا برای تخمین حجم آب نفوذی برابر با ۱۰/۱۲ درصد برای نمونه بتنی دارای سنگدانه‌های اندزیت و پودر سنگ آهک است. کمترین خطا نیز برابر با ۰/۶۹ درصد برای نمونه بتنی دارای سنگدانه‌های



شکل ۱۱. میانگین قدر مطلق درصد خطا برای پیش‌بینی حجم آب نفوذی با در نظر گرفتن متغیرهای C_a ، C_p و L_s .
Fig. 11. The average of absolute percentage errors for estimating penetrated water volume, considering the variables of C_a , C_p , and L

سهم خمیر سیمان در حجم آب نفوذی، ml	C_p
مقاومت سطحی، MPa	F_s
طول ناحیه انتقال در سطح نفوذ، cm	L
سطح سنگدانه‌ها در سطح نفوذ، cm^2	S_a
سطح خمیر سیمان در سطح نفوذ، cm^2	S_p
سطح داخلی صفحه فلزی پایه، cm^2	S_b
حجم آب نفوذی به نمونه‌های بتنی، ml	V
حجم آب نفوذی به سنگ صخره، ml	V_a
حجم آب نفوذی به نمونه‌های خمیر سیمان، ml	V_p

مراجع

- [1] Weiss, S. Shields-Cook, Relating Transport Properties to Performance in Concrete Pavements, CP Road MAP Brief, Federal Highway Administration, (2014).
- [2] ACI Committee 201, American Concrete Institute (2016).
- [3] K. Rahmani, B. Rahmanzadeh, S. Piroti, Experimental study of the effect of water-cement ratio on compressive strength, abrasion resistance, porosity and permeability of Nano silica concrete, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 12(44) (2018) 16-24.
- [4] I. Hager, T. Tracz, M. Choińska, K. Mróz, Effect of cement

بتنی انجام شد. نتایج به دست آمده از این تحلیل رگرسیونی نشان دادند که با استفاده از متغیرهای ذکر شده، حجم آب نفوذی به نمونه‌های بتنی با دقت بسیار بالایی قابل تخمین است. ضریب تعیین تعدیل شده که برابر با ۰/۹۱۱ محاسبه شد، دلیلی بر اعتبار این مطلب است. میانگین قدر مطلق در خطاها برای تخمین آب نفوذی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی آن، با توجه به متغیرهای انتخاب شده برای مدل رگرسیونی شامل متغیرهای ذکر شده برابر با ۴/۸۹ درصد به دست آمد. همچنین با توجه به ضرایب استاندارد شده برای متغیرها در معادله رگرسیونی مشاهده گردید که خمیر سیمانی $(\frac{S_p}{S_b} V_p)$ بیشترین تأثیر را بر حجم آب نفوذی دارد. مقاومت سطحی نیز تأثیر قابل توجهی بر مقدار حجم آب نفوذی ندارد و با حذف آن از مدل رگرسیونی میانگین خطاها به مقدار ۹/۳۲ درصد افزایش یافت. همچنین سنگدانه‌ها $(\frac{S_a}{S_b} V_a)$ و طول ناحیه انتقال در مرتبه‌های بعدی از نظر بیشترین تأثیر بر میزان حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی قرار دارند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

سهم سنگدانه‌ها در حجم آب نفوذی، ml	C_a
ضریب متغیر i ام در معادله رگرسیون	C_i

- of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 311-318.
- [14] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 1023-1033.
- [15] A. Sadrmomtazi, B. Tahmouresi, R. Kohani Khoshkbijari, Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 70(10) (2018) 519-532.
- [16] A.R. Mohamed, M. Elsalamawy, M. Ragab, Modeling the influence of limestone addition on cement hydration, *Alexandria Engineering Journal*, 54(1) (2015) 1-5.
- [17] M. Naderi, Determination of the permeability of concrete, stone, mortar, brick and other building construction materials using cylindrical chamber method, Intellectual Property Office (IRIPO), Registration number 67726, Iran (2010).
- [18] M. Naderi, Twist-off method for assessing material strength and their bond, Intellectual Property Office (IRIPO), Registration number 23936, Iran (2007).
- [19] M. Naderi, A. Kaboudan, Cylindrical Chamber: A New In Situ Method for Measuring Permeability of Concrete with and without Admixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3) (2020) 2225-2241.
- [20] M. Naderi, A. Kaboudan, A. Akhavan Sadighi, Comparative Study on Water Permeability of Concrete Using Cylindrical Chamber Method and British Standard and Its Relation with Compressive Strength, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1) (2018) 116-131.
- [21] M. Naderi, New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete, *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6) (2007) 602-608.
- type on the mechanical behavior and permeability of concrete subjected to high temperatures, *Materials*, 12(18) (2019) 3021
- [5] T. Joshi, U. Dave, Evaluation of strength, permeability and void ratio of pervious concrete with changing W/C ratio and aggregate size, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(4) (2016) 276-284.
- [6] E. Lim, K.H. Tan, T.F. Fwa, Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10 (2013) 1565-1575.
- [7] A. Leemann, R. Loser, B. Münch, Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 116-120.
- [8] G. Toplicic-Curcic, Z. Grdić, R. Ristic, I. Despotović, D. Dordevic, M. Dordevic, Aggregate type impact on water permeability of concrete, *Romanian journal of materials*, 42(2) (2012) 134-142.
- [9] M. Tijani, W. Ajagbe, A. Ganiyu, O. Agbede, Effect of aggregate type on properties of pervious concrete, *Journal of Modern Technology and Engineering*, 4(1) (2019) 37-46.
- [10] C. Argiz, M. Sanjuán, R. Muñoz-Martialay, Effect of the aggregate grading on the concrete air permeability, *Materiales de Construcción*, 64(315) (2014) e026.
- [11] L. Kong, X. Chen, Y. Du, Evaluation of the effect of aggregate on concrete permeability using grey correlation analysis and ANN, *Computers and Concrete*, 17(5) (2016) 613-628.
- [12] R. Hooton, Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity, *materials Journal*, 90(2) (1993) 143-151.
- [13] A.M. Diab, M.A. Abd Elwahab, H.E. Elyamany, M. Abd Elmoaty, Guidelines in compressive strength assessment

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Naderi, A.R. Kaboudan, *Effects of Concrete Constituent Materials on the Penetration of Surface Water*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 3467-3480.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17978.6726](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17978.6726)

