



## تأثیر افزودنی‌های معدنی بر نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت الکتریکی بتن

محمود نادری<sup>\*</sup>، علیرضا کبودان

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

### کلمات کلیدی:

نفوذپذیری  
تخلخل  
مقاومت الکتریکی  
محفظه استوانه‌ای  
ریزساختار بتن

**خلاصه:** ارزیابی دوام بتن معمولاً با اندازه‌گیری نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت الکتریکی آن انجام می‌شود. از طرفی، یکی از راه‌های افزایش دوام، به کارگیری مواد افزودنی در طرح مخلوط بتن است. از این رو، در این مقاله، به بررسی تأثیر افزودنی‌های پوزولانی (دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت) و پودر سنگ آهک بر نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت الکتریکی نمونه‌های مکعبی بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر پرداخته شده است. برای ساخت بتن‌ها، این افزودنی‌ها جایگزین ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان شدند. در این مقاله، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن از روش ابداعی "محفظه استوانه‌ای" استفاده شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان دادند که جز نمونه بتنی ۲۸ روزه که ۲۰ درصد وزن سیمان با پودر سنگ آهک جایگزین شده بود، سایر نمونه‌های بتنی از نفوذپذیری و تخلخل کمتر و مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی برخوردار بودند. به علاوه، تخلخل حجمی در مقایسه با تخلخل سطحی محاسبه شده از تصاویر میکروسکوب الکترونی روبشی، معیار دقیق‌تری برای ارزیابی ریزساختار بتن‌ها است. نتایج آزمایش XRD نیز بیانگر آن بودند که مواد پوزولانی با مصرف هیدروکسید کلسیم، هیدرات سیلیکات کلسیم بیشتری تولید می‌کنند که نتیجه آن کاهش نفوذپذیری و تخلخل و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی است. همچنین، کاهش جزئی در شدت قله‌های هیدروکسید کلسیم و هیدرات سیلیکات کلسیم برای بتن حاوی پودر سنگ آهک مشاهده شد. این رفتار نشان داد که پودر سنگ آهک عمدتاً با خاصیت پرکنندگی ذراتش سبب کاهش نفوذپذیری و تخلخل و افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود.

### ۱- مقدمه

آب در بتن، ضریب نفوذپذیری با استفاده از رابطه دارسی محاسبه می‌شود. برای اینکه نرخ نفوذ آب به درون بتن ثابت شود، باید تمام منافذ آن با آب پر گردد. در بتن‌های با نفوذپذیری کم به مدت زمان نسبتاً طولانی برای تشکیل جریان با دبی ثابت نیاز است (ممکن است از چند روز تا چند هفته به طول بیانجامد). این مدت زمان به طرح مخلوط بتن بستگی دارد. برای کم کردن مدت زمان لازم برای تشکیل چنین جریانی، پیشنهاد شده است که مقدار فشار آب اعمالی به بتن زیاد شود [۲]. در اثر اعمال فشار آب با مقدار بیشتر، احتمال نشست آب در محل تماس بین نمونه و سلول آزمایش زیاد می‌شود و نتایج به دست آمده از آزمایش قابل استناد نخواهند بود. همچنین، به دلیل مدت زمان طولانی برای انجام این آزمایش و پیشرفت هیدراسیون در این مدت، ریزساختار بتن بهبود یافته که بر نتایج حاصله از آزمایش تأثیرگذار است [۳]. در سال‌های اخیر تحقیقاتی با استفاده از این روش برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی انجام شده است [۴-۸].

توانایی بتن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که موجب آسیب‌دیدگی می‌شود، دوام نام دارد و یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر برای تعیین عمر مفید سازه‌های بتنی است. با توجه به اهمیت دوام بتن، روش‌هایی برای ارزیابی آن توسعه داده شده‌اند که اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن یکی از این روش‌ها است. بتن با نفوذپذیری کمتر، مقاومت بیشتری در برابر حملات شیمیایی از خود نشان می‌دهد و دوام بیشتری دارد. برخی از عوامل خوردنده، مانند یون کلرید به همراه آب به داخل بتن نفوذ کرده و باعث خوردگی میلگردهای فولادی می‌شوند. اندازه‌گیری میزان نفوذ آب به داخل بتن به دو روش دبی ثابت و اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن صورت می‌گیرد [۱]. در روش دبی ثابت، فشار آب معینی به نمونه بتنی وارد شده و پس از ثابت شدن مقدار نرخ نفوذ

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir



متناوب را برابر با ۱۳ هرتز تعیین کرده است [۲۵]. روش چهار نقطه‌ای یک تست غیرمخرب، سریع و آسان بوده و به دلیل سهولت انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در محل پروژه مناسب است. این روش برای قطعات بتنی موجود نیز قابل استفاده است، در حالی که روش تک محوری تنها برای نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی، استوانه‌ای و مکعب مستطیل کاربرد دارد.

در روش تک محوری نمونه بتنی بین دو الکترود (معمولاً دو صفحه فلزی موازی) قرار می‌گیرد. همچنین، برای اطمینان از اتصال مناسب نمونه و الکترودها، دو اسفنج مرطوب بین آن‌ها قرار داده می‌شود. سپس، با اعمال جریان الکتریسیته به نمونه، اختلاف پتانسیل بین دو الکترود اندازه‌گیری می‌شود. روش تک محوری شیوه‌ای آسان برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در آزمایشگاه است. استفاده از روش تک محوری برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در محل پروژه دارای محدودیت بوده و نیازمند مغزه‌گیری است.

همانطور که گفته شد با اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی می‌توان دوام بتن را ارزیابی کرد. در این ارتباط، جایگزینی بخشی از سیمان با افزودنی‌های معدنی به عنوان راهکاری برای بهبود دوام بتن همواره مورد توجه محققین بوده است. مطالعات انجام شده عمدتاً به بررسی تأثیر تعداد محدودی ماده جایگزین سیمان (اکثراً یک یا دو نوع) بر مشخصات دوامی بتن پرداخته‌اند و انجام پژوهشی که در آن به طور جامع به مقایسه اثر افزودنی‌های معدنی پرکاربرد بر دوام بتن بپردازد، ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل، در این مقاله، به بررسی نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی بتن‌های حاوی افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک پرداخته شده است. برای بررسی جامع‌تر، مقادیر تخلخل‌های نفوذپذیر بتن‌های مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM C642-06 [۲۶] نیز اندازه‌گیری شدند و ریزساختار آن‌ها با استفاده از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. همچنین، برای اولین بار در این مقاله از مقادیر تخلخل‌های سطحی محاسبه شده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی دوام بتن استفاده گردید. لازم به ذکر است که در این پژوهش، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، از روش "محفظه استوانه‌ای" که توسط نادری اختراع گردید [۲۷]، استفاده شده است. از مزایای این روش بر سایر روش‌های معمول اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، مانند استاندارد BS EN 12390-8، می‌توان به امکان ارزیابی

با توجه به مشکلاتی که برای انجام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از روش دبی ثابت وجود دارد، در برخی کشورهای اروپایی، مانند آلمان، ارزیابی نفوذپذیری بتن با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در آن انجام می‌شود [۹]. در این روش فشار آب معینی در مدت زمان مشخصی به بتن وارد می‌شود و پس از اتمام آزمایش، نمونه بتنی به دو قسمت تقسیم شده و بیشینه عمق نفوذ آب در آن اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8)، نفوذپذیری با اندازه‌گیری بیشینه عمق نفوذ آب در بتنی که به مدت سه روز تحت فشار آبی برابر با ۵ بار قرار گرفته ارزیابی می‌شود [۱۰]. در این استاندارد، برخلاف استاندارد DIN 1048-5، طبقه‌بندی مشخصی برای ارزیابی کیفیت بتن بر اساس میزان نفوذپذیری آن ارائه نشده است. محققین پیشنهاد کرده‌اند که از روش جریان نفوذ آب با دبی ثابت برای بتن‌های با نفوذپذیری زیاد و از روش اندازه‌گیری عمق نفوذ آب برای بتن‌های با نفوذپذیری کم استفاده شود [۱].

اغلب به زمان نسبتاً زیادی برای انجام آزمایش نفوذ آب در بتن نیاز است. در نتیجه، روش‌های سریع‌تری برای ارزیابی کیفیت و دوام بتن توسعه یافته‌اند [۱۱]. یکی از این روش‌ها، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن است. مقاومت الکتریکی بیانگر توانایی حمل بار الکتریکی توسط بتن است و به ریزساختار بتن (اندازه و پیوستگی منافذ)، ویژگی‌های الکتروشیمیایی محلول موجود در منافذ بتن، رطوبت و دما بستگی دارد [۱۲ و ۱۳]. عوامل دیگر تأثیرگذار بر مقاومت الکتریکی بتن عبارتند از: نوع جریان و فرکانس اعمالی، شکل و اندازه نمونه، روش انجام آزمایش و مقاومت الکتریکی سنگدانه‌ها. تفاوت روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در موقعیت و چیدمان الکترودها و نوع جریان اعمالی است. از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن می‌توان به روش چهار نقطه‌ای و [۱۴ و ۱۵] و روش تک‌محوری [۱۶ و ۱۷] اشاره کرد. تحقیقات بسیاری برای ارزیابی مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از این روش‌ها انجام گرفته است [۲۳-۱۸].

روش چهار نقطه‌ای برای اولین بار توسط ونر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک ابداع شد [۲۴]. دستگاه آزمایش دارای چهار الکترود است که روی یک خط مستقیم و به فاصله یکسان از یکدیگر قرار دارند. دو الکترود داخلی دستگاه اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده را اعمال کرده و دو الکترود خارجی جریان متناوب را به سطح بتن وارد می‌کنند. سپس، مقاومت الکتریکی با استفاده از روابط مربوطه محاسبه می‌شود. استاندارد AASHTO T358 فاصله الکترودها را ۳۸ میلی‌متر و فرکانس جریان

فشار مورد نظر به آب داخل محفظه اعمال می‌شود که مقدار آن با استفاده از گیج تعبیه شده بر دستگاه قابل قرائت است (در این مقاله، فشار آبی برابر با ۵ بار به مدت ۵ ساعت به نمونه‌ها وارد شد). حفره‌ای نیز در محفظه فشار برای خروج هوای محبوس شده احتمالی در دستگاه تعبیه شده است. مقدار نفوذ مایع در نمونه را می‌توان از طریق میکرومتر تعبیه شده 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 داخل نمونه بتنی و متوسط نرخ نفوذ آب قابل محاسبه است. یادآور می‌شود که امکان محاسبه این متغیرها با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی معمول برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن مانند استاندارد بریتانیا وجود ندارد. پس از اتمام آزمایش، همانطور که در شکل ۱-پ نشان داده شده است، می‌توان نمونه بتنی را با استفاده از جک فشاری به دو قسمت تقسیم نمود و بیشینه عمق نفوذ آب به داخل بتن را اندازه گرفت (شکل ۱-ت).

## ۲-۲- اندازه‌گیری تخلخل نفوذپذیر بر اساس استاندارد ASTM C642-06

بر اساس استاندارد ASTM C642-06 [۲۶]، ابتدا نمونه در گرم‌خانه در دمای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۲۴ ساعت قرار داده شده و وزن آن اندازه‌گیری می‌شود. این روند در فواصل زمانی ۲۴ ساعت تکرار گردیده تا اختلاف دو وزن متوالی اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۵ درصد وزن کمتر شود (وزن  $m_1$ ). سپس نمونه در داخل وان آب با دمای حدودی ۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و وزن نمونه اشباع با سطح خشک در فواصل زمانی ۲۴ ساعت ثبت شده تا اختلاف دو وزن متوالی اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۵ درصد وزن بزرگ‌تر شود. سپس، نمونه ۵ ساعت در داخل آب جوشانده شده و به مدت حداقل ۱۴ ساعت در هوای آزاد قرار می‌گیرد. در این حالت، وزن نمونه با سطح خشک اندازه‌گیری می‌شود (وزن  $m_2$ ). در مرحله بعدی، وزن ظاهری نمونه در آب تعیین می‌گردد (وزن  $m_3$ ). با استفاده از مقادیر وزنی اندازه‌گیری شده درصد حجمی منافذ نفوذپذیر با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\text{تخلخل نفوذپذیر} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (1)$$

نفوذپذیری بتن هم در محل سازه و هم در آزمایشگاه اشاره کرد. مطالعاتی با استفاده از این روش برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن‌های با و بدون افزودنی [۲۸]، ارزیابی رابطه مقاومت فشاری با نفوذپذیری بتن‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف [۲۹]، بررسی اثر نوع سنگدانه بر نفوذپذیری بتن [۳۰]، بررسی دقت معادلات داری و انتشار دو بعدی برای مدل‌سازی نفوذ آب در بتن [۳۱]، ارزیابی عوامل تشکیل دهنده بتن (سنگدانه، خمیر سیمان و ناحیه انتقال) بر نفوذپذیری آن [۳۲]، بررسی اثر مقاومت، مقدار فشار آب، مدت زمان اعمال آن و جهت اعمال فشار آب بر نفوذپذیری بتن [۳۳] و ارزیابی میزان خوردگی بتن حاوی افزودنی‌های معدنی [۳۴] انجام شده است.

## ۲- آزمایش‌ها

### ۲-۱- روش "محفظه استوانه‌ای"

در این مقاله، روش "محفظه استوانه‌ای" برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی به کار گرفته شده است [۲۷]. 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 [۱۰]، 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 در ابعاد بتن مورد آزمایش، قابلیت حمل دستگاه، امکان انجام آزمایش به دفعات و هزینه اندک دستگاه آزمایش از مزایای دیگر این روش هستند. همچنین، با محاسبه حجم مایع نفوذ کرده به محل آزمایش، نیازی به شکستن نمونه برای اندازه‌گیری عمق نفوذ نیست. این امکان در روش‌های معمول اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن مانند استاندارد بریتانیا وجود ندارد. شایان ذکر است که اعتبار و صحت نتایج به دست آمده با به کارگیری روش "محفظه استوانه‌ای" در پژوهشی که توسط محققین مقاله کنونی صورت گرفته، ارزیابی شده است [۲۸ و ۲۹]. دستگاه و مراحل انجام آزمایش "محفظه استوانه‌ای" 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 سخت شدن چسب، دستگاه آزمایش بر روی صفحه پایه تثبیت می‌شود. پس از تثبیت دستگاه بر روی محل انجام آزمایش، محفظه دستگاه با مایع مورد نظر پر شده و با بستن شیر ورودی مایع و چرخاندن اهرم دستی،



(ب)  
(b)



(الف)  
(a)



(ت)  
(d)



(پ)  
(c)

شکل ۱. دستگاه آزمایش "محفظه استوانه‌ای" و مراحل انجام آزمایش مذکور. (الف) دستگاه "محفظه استوانه‌ای" (ب) نمونه‌های بتنی آماده شده برای انجام آزمایش "محفظه استوانه‌ای" (پ) شکستن نمونه بتنی پس از اتمام آزمایش "محفظه استوانه‌ای" برای اندازه‌گیری بیشینه عمق نفوذ آب (ت) اندازه‌گیری بیشینه عمق نفوذ آب

**Fig. 1. "Cylindrical chamber" apparatus and its test procedure. (a) "Cylindrical chamber" apparatus (b) Concrete specimens prepared for "Cylindrical chamber" test (c) Splitting the concrete specimen after completion of "Cylindrical chamber" test for measuring maximum penetrated water depth (d) Measuring maximum penetrated water depth**





شکل ۲. اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن.

Fig. 2. Measuring specific electrical resistivity of concrete.

### ۳-۲- مشخصات مصالح و طرح مخلوط نمونه‌های بتنی مورد

#### بررسی

در این مقاله، نفوذپذیری، مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل نفوذپذیر نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر مکعب که در آب عمل‌آوری شده بودند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ساخت نمونه‌های بتنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان پرتلند نوع ۲ با افزودنی‌های معدنی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک جایگزین شد. از این افزودنی‌های معدنی به وفور به عنوان ماده جایگزین سیمان، برای بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن استفاده می‌شود و به همین دلیل، این مواد برای مطالعه در این مقاله انتخاب شدند. نمونه کنترل نیز بدون افزودنی معدنی، تنها با استفاده از سیمان پرتلند نوع ۲ ساخته شد. ترکیبات شیمیایی مواد افزودنی و سیمان مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، از آب شرب شهر قزوین برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده گردید. مشخصات طرح مخلوط نمونه‌های بتنی مورد بررسی در جدول ۲ قابل مشاهده هستند. منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌ها با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر نیز در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر

### ۳-۲- اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی

در این آزمایش که نحوه انجام آن در شکل ۲ نشان داده شده است، شدت جریان مشخصی بین دو صفحه فلزی که بر سطح نمونه بتنی اشباع از آب چسبانده شده‌اند، اعمال می‌شود. همچنین، برای انجام آزمایش دو اسفنج مرطوب بین صفحه‌های فلزی و سطح نمونه قرار داده شده تا از اتصال مناسب بین آن‌ها اطمینان حاصل شود. با اندازه‌گیری سطح بتن و فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\rho = \frac{V A}{I L} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی ( $\Omega \cdot m$ )،  $V$  ولتاژ (V)،  $I$  شدت جریان (A)،  $A$  سطح مقطع نمونه ( $m^2$ ) و  $L$  فاصله بین دو صفحه فلزی (m) است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی افزودنی‌ها و سیمان مصرفی برای ساخت نمونه‌های بتنی (%)

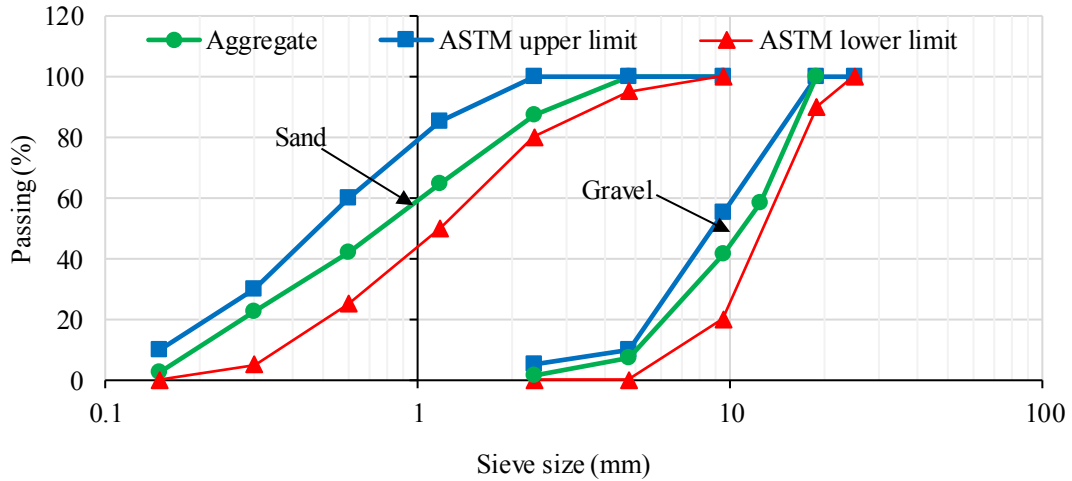
Table 1. Chemical compositions of the admixtures and cement used for the preparation of concrete specimens (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	SiC	C	افت حرارتی (%)	ترکیب شیمیایی نوع سیمان
۲۰/۷۹	۴/۷۶	۳/۸۶	۶۲/۲۸	۳/۲۲	۰/۳۷	۰/۶۸	۱/۸۹	-	-	۱/۸۸	سیمان پرتلند نوع ۲
۹۳/۶۰	۱/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۳۱	۱/۰۱	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۳۰	-	دوده سیلیسی
۶۱/۳۴	۲۵/۱۱	۴/۴۲	۴/۹۴	۱/۰۹	۰/۵۹	۱/۰۱	۰/۰۸	-	-	-	خاکستر بادی
۶۸/۹۵	۱۱/۱۴	۰/۹۷	۴/۸۳	۰/۷۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۰۷	-	-	۱۰/۶۴	زئولیت
۲/۵۵	۱/۰۳	۰/۱۲	۵۳/۱۶	۰/۴۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۵	-	-	۴۱/۷۶	پودر سنگ آهک

جدول ۲. طرح های مخلوط نمونه‌های بتنی مورد بررسی در یک متر مکعب بتن (kg/m<sup>3</sup>)

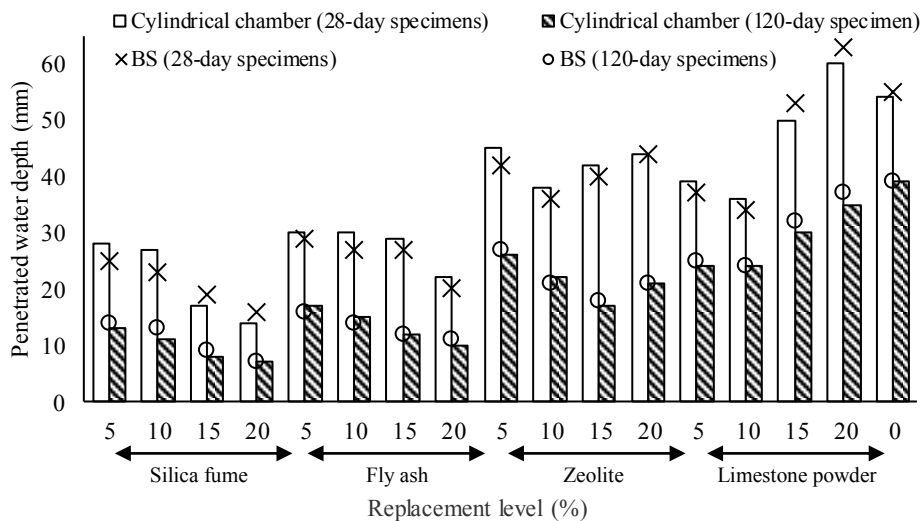
Table 2. Studied concrete specimens mix designs for one cubic meter of concrete (kg/m<sup>3</sup>)

اسلامپ (mm)	فوق روان کننده (درصد از وزن کل مواد سیمانی)	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار افزودنی (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	درصد وزنی جایگزینی با سیمان	نوع ماده
۵۵	۰/۶۰	۹۹۸	۶۹۲	۱۷۵	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۵	دوده سیلیسی
۶۰	۰/۶۵				۳۵/۰	۳۱۵/۰	۱۰	
۵۵	۰/۶۵				۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵	
۵۰	۰/۷۰				۷۰	۲۸۰/۰	۲۰	
۶۵	-	۹۹۸	۶۹۲	۱۷۵	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۵	خاکستر بادی
۷۰	-				۳۵/۰	۳۱۵/۰	۱۰	
۷۵	-				۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵	
۷۵	-				۷۰	۲۸۰/۰	۲۰	
۶۰	۰/۳۵	۹۹۸	۶۹۲	۱۷۵	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۵	زئولیت
۶۵	۰/۴۰				۳۵۲/۰	۳۱۵/۰	۱۰	
۶۰	۰/۴۵				۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵	
۵۵	۰/۴۵				۷۰	۲۸۰/۰	۲۰	
۶۵	-	۹۹۸	۶۹۲	۱۷۵	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۵	پودر سنگ آهک
۷۰	-				۳۵/۰	۳۱۵/۰	۱۰	
۷۰	-				۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵	
۶۵	-				۷۰	۲۸۰/۰	۲۰	
۶۰	-	۹۹۸	۶۹۲	۱۷۵	-	۳۵۰/۰	-	سیمان پرتلند نوع ۲



شکل ۳. منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌ها.

Fig. 3. Grading curves of aggregates.



شکل ۴. اعماق نفوذ آب اندازه‌گیری شده با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا برای نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه حاوی افزودنی‌های معدنی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک.

Fig. 4. Penetrated water depths measured using "Cylindrical chamber" method and British standard for the 28 and 120-day concrete specimens containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder.

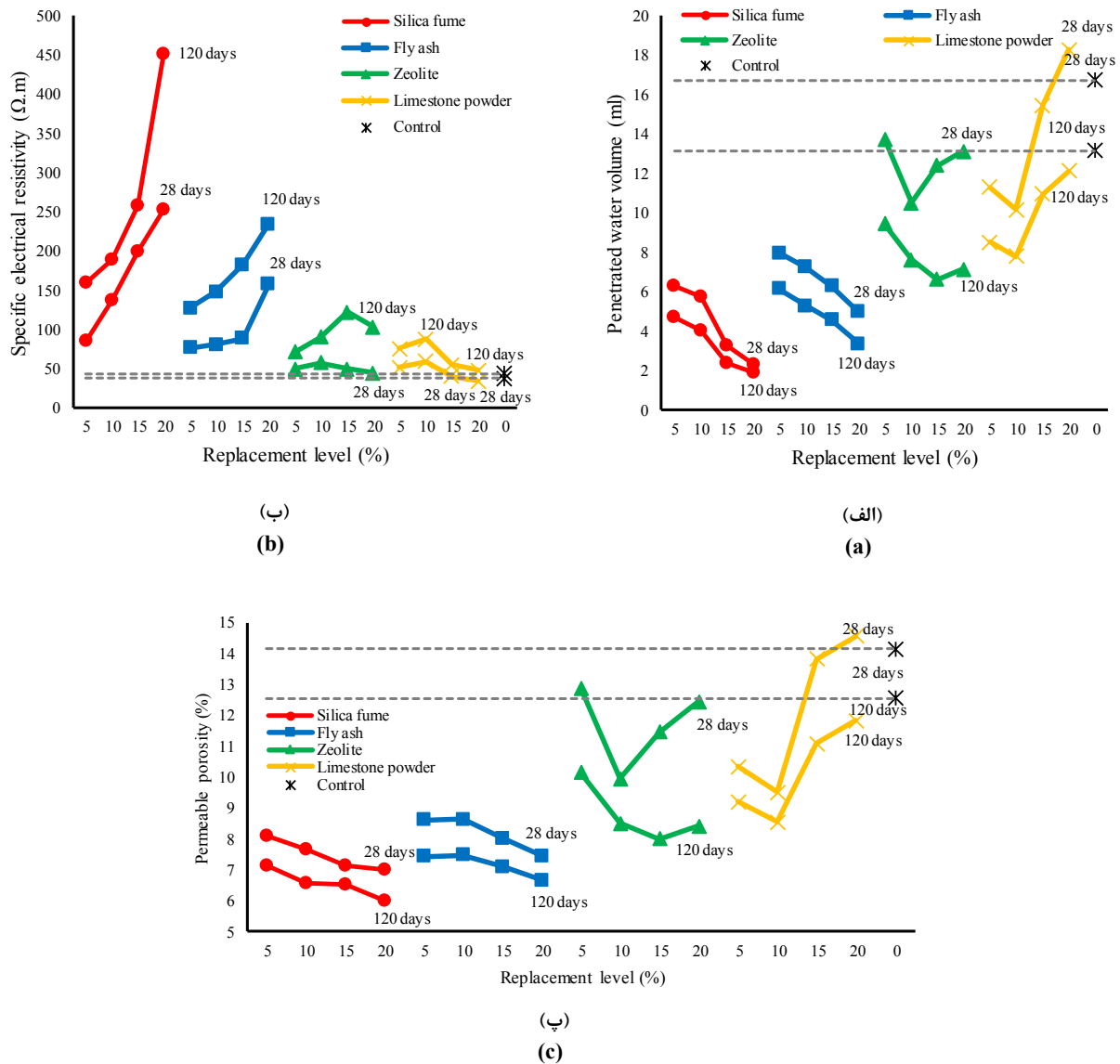
نفوذ آب اندازه‌گیری شده با استفاده از این روش و استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8) برای نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. در این شکل دیده می‌شود که اعماق نفوذ آب اندازه‌گیری شده با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا بسیار به هم نزدیک هستند که بیانگر دقت نتایج به دست آمده از روش "محفظه استوانه‌ای" است. بیشترین خطا برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" نسبت به مقدار متناظر اندازه‌گیری شده با

است که کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شدند.

#### ۴- تحلیل و بررسی نتایج

۴-۱ نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل نفوذپذیر

برای بررسی اعتبار نتایج روش "محفظه استوانه‌ای"، مقادیر اعماق



شکل ۵. حجم آب نفوذی، مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل نفوذپذیر اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه حاوی افزودنی‌های معدنی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک. (الف) حجم آب نفوذی اندازه‌گیری شده به داخل نمونه‌های بتنی مورد مطالعه (ب) مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های بتنی مورد مطالعه (پ) تخلخل نفوذپذیر اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های بتنی مورد مطالعه

Fig. 5. Penetrated water volume, specific electrical resistivity and permeable porosity measured for the 28-day concrete specimens containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder mineral admixtures. (a) Measured penetrated water volume into the studied concrete specimens (b) Specific electrical resistivity measured for the studied concrete specimens (c) Permeable porosity measured for the studied concrete specimens

داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی، پیوسته از نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر نمونه‌های بتنی کاسته شده و مقاومت ویژه الکتریکی آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، در این شکل مشاهده می‌شود که جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی سبب بهبود مشخصات دوامی (نفوذپذیری، تخلخل نفوذپذیر

استاندارد بریتانیا برابر با ۱۷/۳۹ درصد به دست آمد که متعلق به نمونه بتنی ۲۸ روزه‌ای است که ۱۰ درصد وزن سیمان با دوده سیلیسی جایگزین شده بود. مقداری میانگین خطاها نیز برابر ۶/۲۲ درصد است. در شکل ۵ نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت الکتریکی و تخلخل نفوذپذیر برای نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه نشان



کشور هند تهیه شده بود و هزینه خرید هر کیلو از آن تقریباً ۱۶ برابر هزینه خرید هر کیلو سیمان بود. دوده سیلیسی، زئولیت و پودر سنگ آهک نیز به ترتیب از قزوین، سمنان و قزوین تهیه شده بودند و برای خرید هر کیلو از آن‌ها به ترتیب تقریباً ۹، ۷ و ۰/۸ برابر قیمت هر کیلو سیمان هزینه شد. در این قیمت‌ها هزینه حمل و نقل افزودنی‌ها از محل شرکت تا آزمایشگاه و همچنین هزینه فوق روان کننده برای دستیابی به روانی مطلوب به دلیل استفاده از دوده سیلیسی و زئولیت لحاظ نشده است و تنها قیمت خرید مواد افزودنی در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود با وجود اینکه جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت سبب بهبود مشخصات دوامی بتن می‌شود، هزینه‌های ساخت آن را افزایش می‌دهد. از طرفی هزینه‌های ساخت بتن با پودر سنگ آهک در مقایسه با پوزولان‌های ذکر شده به مراتب کمتر است. ضمن اینکه بتن ساخته شده با پودر سنگ آهک از دوام کمتری نسبت به بتن حاوی این پوزولان‌ها برخوردار است. به همین دلیل قبل از ساخت بتن باید توجیه اقتصادی و سطح دوام مورد انتظار برای بتن مدنظر قرار داده شوند و متناسب با این دو مورد ماده جایگزین سیمان در طرح مخلوط بتن انتخاب شود.

صرف نظر از جنبه‌های اقتصادی، به دلیل اهمیت بحث دوام بتن در ایران، به خصوص در مناطق جنوبی کشور، مطالعاتی در ارتباط با تأثیر افزودنی‌های معدنی بر دوام بتن صورت گرفته است. نتایج گزارش شده در ارتباط با میزان جذب آب بتن سبک نشان می‌دهند که با افزایش مقدار دوده سیلیسی (برای مقادیر جایگزینی ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزن سیمان)، جذب آب بتن نسبت به بتن شاهد کاهش یافته و در نهایت باعث کاهش تخلخل بتن سبک و افزایش دوام آن می‌شود [۳۵]. همچنین، جایگزین کردن ۷ و ۱۰ درصد وزن سیمان با دوده سیلیسی در نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با کاهش جذب آب مویینه و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به بتن کنترل همراه بوده که بیانگر افزایش دوام بتن به دلیل استفاده از دوده سیلیسی در طرح مخلوط بتن است [۳۶]. بررسی نتایج منتشره نشان می‌دهد که افزودن زئولیت در مقادیر جایگزینی برابر با ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان به مخلوط بتن با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۴ و ۰/۵ جذب آب حجمی، جذب آب مویینه و عمق نفوذ یون کلر در نمونه کنترل را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز ساختار متراکم‌تری را برای نمونه‌های زئولیتی، به دلیل مصرف هیدروکسید کلسیم و تولید هیدرات سیلیکات کلسیم بیشتر در حضور زئولیت نشان دادند [۳۷]. همچنین، جایگزین کردن ۱۰ درصد وزن سیمان با زئولیت و دوده

و مقاومت الکتریکی) نسبت به نمونه کنترل شده است. از طرفی، در شکل ۵ با افزایش سن نمونه‌های بتنی، به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و متراکم‌تر شدن ساختار بتن‌ها، تخلخل نفوذپذیر و حجم آب نفوذی کاهش و مقاومت ویژه الکتریکی افزایش یافته است. در ارتباط با نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر بادی نیز روند مشابهی دیده می‌شود. با افزایش مقدار خاکستر بادی همواره از نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر کاسته شده و به مقاومت ویژه الکتریکی افزوده شده است. همچنین، جایگزینی سیمان با خاکستر بادی سبب بهبود این متغیرها نسبت به مقادیر متناظر برای نمونه کنترل شده است. البته، همانطور که از نتایج آزمایش‌ها مشخص است، در مقادیر وزنی جایگزینی یکسان، دوده سیلیسی عملکرد بهتری نسبت به خاکستر بادی برای بهبود دوام بتن از خود نشان داده است. افزایش سن نمونه‌ها نیز سبب بهبود مشخصات دوامی بتن حاوی خاکستر بادی گردیده است. تحلیل نتایج رسم شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که مقدار وزنی جایگزینی بهینه‌ای برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه حاوی زئولیت و نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۱۲۰ روزه حاوی پودر سنگ آهک وجود دارد. بدین معنی که در این نمونه‌ها با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با زئولیت و پودر سنگ آهک تا حدود ۱۰ درصد وزن سیمان، نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر کاهش یافته و مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر مقدار زئولیت و پودر سنگ آهک، این روند معکوس می‌شود. بر خلاف نمونه زئولیتی، نمونه بتنی ۲۸ روزه که ۲۰ درصد وزن سیمان آن با پودر سنگ آهک جایگزین شده بود، نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر بیشتر و مقاومت ویژه الکتریکی کمتری نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی از خود نشان داده است. با افزایش سن نمونه‌های بتنی و بهبود مشخصات بتن، این روند عکس شده و متغیرهای دوامی اندازه‌گیری شده برای این نمونه در سن ۱۲۰ روز نسبت به نمونه کنترل بهبود یافته‌اند. مورد دیگری که در شکل ۵ باید به آن توجه شود، تغییر مقدار وزنی بهینه زئولیت از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد وزن سیمان با افزایش سن بتن‌ها از ۲۸ روز به ۱۲۰ روز است. با مقایسه مقادیر ترسیم شده در شکل ۵ دیده می‌شود که دوده سیلیسی نسبت به سایر افزودنی‌های مورد مطالعه، عملکرد بهتری برای بهبود دوام بتن از خود نشان داده است.

هر ماده‌ای که در بتن مصرف می‌شود، باید علاوه بر توجیه فنی از نظر مقاومت و دوام، توجیه اقتصادی نیز داشته باشد و به همین دلیل، عواملی مانند محل تهیه افزودنی‌های معدنی و هزینه‌های حمل و نقل نیز باید در نظر گرفته شوند. در این مطالعه، خاکستر بادی توسط شرکت مورد نظر از

سیلیسی در نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵ سبب کاهش ضریب مهاجرت غیرپایدار یون کلر، جذب آب و عمق نفوذ آب در بتن بدون افزودنی معدنی می‌شود. ضمن اینکه به کارگیری این مواد در طرح مخلوط بتنی مقاومت الکتریکی بتن را افزایش می‌دهد [۳۸]. افزایش دوام بتن به دلیل استفاده از زئولیت نیز توسط محققینی با توجه به نتایج آزمایش‌های جذب آب، نفوذ آب، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ تسریع شده یون کلر و خوردگی تسریع شده به اثبات رسیده است [۳۹]. در ارتباط با خاکستر بادی گزارش شده است که جایگزین کردن بخشی از سیمان با این ماده سبب کاهش نفوذ تسریع شده یون کلرید و تخلخل بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف می‌شود و در نتیجه دوام بتن را افزایش می‌دهد [۴۰]. در پژوهشی از نتایج آزمون‌های جذب آب، نفوذ آب، نفوذ تسریع شده یون کلرید و مقاومت الکتریکی برای بررسی دوام بتن‌های حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی با مقادیر جایگزینی به ترتیب برابر با ۲۵ و ۷ درصد وزن سیمان استفاده شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که خاکستر بادی و دوده سیلیسی با کاهش جذب آب، نفوذ آب و نفوذ تسریع شده یون کلرید و همچنین افزایش مقاومت الکتریکی به بهبود دوام بتن بدون افزودنی معدنی کمک می‌کنند [۴۱]. تأثیر پودر سنگ آهک بر دوام بتن نیز مورد توجه محققین بوده و تحقیقات انجام شده بیانگر آن هستند که نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۱۵ درصد وزن سیمان از نفوذ یون کلر، عمق نفوذ آب و جذب آب کمتری نسبت به نمونه بتنی شاهد برخوردار است. اما، با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با پودر سنگ آهک به میزان ۳۰ درصد وزن سیمان دوام بتن کاهش می‌یابد که نشانگر تأثیر نامطلوب پودر سنگ آهک بر دوام بتن در مقادیر جایگزینی زیاد است [۴۲]. نتایج مشابه دیگری نیز گزارش شده‌اند که جایگزین کردن ۸، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان به ترتیب با پودر سنگ آهک، زئولیت و دوده سیلیسی سبب افزایش دوام (مقاومت الکتریکی) بتن شاهد با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ می‌شود [۴۳].

افزودنی‌های معدنی به دو صورت بر ریزساختار و مشخصات بتن تأثیر می‌گذارند. دسته اول عواملی هستند که سبب بهبود ریزساختار بتن می‌شوند و واکنش پوزولانی و اثر پرکنندگی ذرات افزودنی را شامل می‌شوند. عامل رقیق‌سازی سیمان، امکان کلوخه شدن ذرات افزودنی، تشکیل منافذ در این کلوخه‌ها و همچنین سرعت واکنش‌پذیری کم برخی از افزودنی‌ها (که سبب کاهش حجم مواد هیدراسیون می‌شود) در جهت عکس عوامل مؤثر بر بهبود ریزساختار بتن عمل می‌کنند. بنابراین، برآیند این عوامل تعیین‌کننده کاهش یا افزایش ویژگی‌های مورد مطالعه بتن در اثر جایگزین کردن بخشی از

سیمان با افزودنی‌های معدنی است. دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت، به دلیل دارا بودن سیلیس ( $\text{SiO}_2$ )، دارای خاصیت پوزولانی هستند. در واکنش پوزولانی، ذرات پوزولان با هیدروکسید کلسیم که یکی از محصولات هیدراسیون سیمان است، واکنش داده و ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم تولید می‌کند که خاصیت پرکنندگی منافذ را دارد و در نتیجه ریزساختار بتن را بهبود می‌بخشد. با بهبود ریزساختار بتن، نفوذپذیری و تخلخل کاهش یافته و مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. از طرفی، ذرات افزودنی‌های معدنی با پر کردن فواصل بین ذرات سیمانی به ایجاد ساختاری متراکم‌تر کمک می‌کنند. در بین افزودنی‌های مورد مطالعه، دوده سیلیسی به طور مؤثرتری برای بهبود مشخصات بتن عمل کرده است (شکل ۵). علت این امر خاصیت پوزولانی بسیار بالای دوده سیلیسی است، زیرا بیش از ۹۰ درصد آن را سیلیس تشکیل می‌دهد. همچنین، دوده سیلیسی به دلیل دارا بودن سطح مخصوص بسیار بالا، از خاصیت پرکنندگی بیشتری نسبت به سایر افزودنی‌های بررسی شده برخوردار است. در ارتباط با بتن‌های ۲۸ روزه حاوی زئولیت و ۲۸ و ۱۲۰ روزه حاوی پودر سنگ آهک، مقدار بهینه‌ای برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان مشاهده شد. این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش بیشتر مقدار زئولیت و پودر سنگ آهک نسبت به مقدار بهینه‌شان در این سن‌ها، عامل رقیق‌سازی سیمان بر سایر عوامل مؤثر بر بهبود ریزساختار چیره شده است. به طوری که، با جایگزین کردن ۲۰ درصد وزن سیمان با پودر سنگ آهک، نفوذپذیری و تخلخل بیشتر و مقاومت ویژه الکتریکی کمتری نسبت به نمونه بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی مشاهده شد. لازم به ذکر است که بر اثر رقیق‌سازی سیمان، حجم مواد هیدراسیون کاهش می‌یابد. پودر سنگ آهک خاصیت پوزولانی ندارد و عمدتاً با خاصیت پرکنندگی سبب بهبود ریزساختار بتن می‌شود [۴۵] و [۴۴]. البته، طی هیدراسیون تری کلسیم سیلیکات، در اثر واکنش کلسیم کربنات پودر سنگ آهک با آلومینات‌های سیمان، کربوآلومینات تشکیل شده که سبب جلوگیری یا تأخیر در تبدیل اترینگایت-مونوسولفوآلومینات می‌شود و به این ترتیب پودر سنگ آهک روند هیدراسیون را تغییر می‌دهد. همچنین، پودر سنگ آهک با ایجاد مکان‌های هسته‌زایی کریستال‌های هیدروکسید کلسیم باعث افزایش سرعت هیدراسیون ذرات کلینکر، به ویژه  $\text{C}_3\text{S}$  شده و به این ترتیب به پیشرفت هیدراسیون سیمان کمک می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که تغییر روند هیدراسیون در اثر حضور پودر سنگ آهک در سن‌های کمتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ریزساختار بتن ندارد و با افزایش سن نمونه‌ها، تأثیر این عامل بر مشخصات بتن نمایان می‌شود. به طوری که در سن ۱۲۰ روزه، جایگزین کردن ۲۰ درصد وزن سیمان با پودر

جدول ۳. ضرایب همبستگی (پیرسون) محاسبه شده برای روابط بین متغیرهای حجم آب نفوذی، تخلخل نفوذپذیر و مقاومت ویژه الکتریکی

Table 3. Correlation coefficients (Pearson) calculated for the relationships between the variables of penetrated water volume, permeable porosity and specific electrical resistivity

متغیر	نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه			نمونه‌های بتنی ۱۲۰ روزه		
	حجم آب نفوذی	تخلخل نفوذپذیر	مقاومت ویژه الکتریکی	حجم آب نفوذی	تخلخل نفوذپذیر	مقاومت ویژه الکتریکی
حجم آب نفوذی	۱/۰۰۰	۰/۹۸۱	-۰/۸۴۱	۱/۰۰۰	۰/۹۸۳	-۰/۸۴۴
تخلخل نفوذپذیر	۰/۹۸۱	۱/۰۰۰	-۰/۷۵۵	۰/۹۸۳	۱/۰۰۰	-۰/۷۶۵
مقاومت ویژه الکتریکی	-۰/۸۴۱	-۰/۷۵۵	۱/۰۰۰	-۰/۸۴۴	-۰/۷۶۵	۱/۰۰۰

همانطور که در جدول ۳ دیده می‌شود، قدر مطلق کوچک‌ترین ضریب همبستگی متعلق به رابطه مقاومت ویژه الکتریکی با تخلخل نفوذپذیر برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با مقداری برابر ۰/۷۵۵ است. بزرگ‌ترین قدر مطلق ضریب همبستگی نیز برای رابطه بین حجم آب نفوذی و تخلخل نفوذپذیر نمونه‌های بتنی ۱۲۰ روزه برابر ۰/۹۸۳ محاسبه شده است. مقادیر محاسبه شده برای ضرایب پیرسون نشان می‌دهند که همبستگی معنادار و قوی‌ای بین متغیرهای حجم آب نفوذی، تخلخل نفوذپذیر و مقاومت ویژه الکتریکی وجود دارد. علت این رفتار این است که کلیه متغیرهای ذکر شده تابعی از ریزساختار، پیوستگی و ارتباط منافذ داخلی بتن هستند. همچنین، مقادیر مندرج در جدول ۳ بیانگر آن هستند که با افزایش حجم آب نفوذی و تخلخل نفوذپذیر، مقاومت ویژه الکتریکی کاهش می‌یابد و بالعکس (رابطه‌ای معکوس بین این متغیرها برقرار است). مقاومت الکتریکی بیانگر مقاومت در برابر حرکت یون‌ها در محلول موجود در منافذ بتن است. در صورتی که نفوذپذیری میزان سهولت حرکت سیال در منافذ بتن را نشان می‌دهد و تابعی از تخلخل نفوذپذیر است. نکته دیگری که با بررسی مقادیر مندرج در جدول ۳ دیده می‌شود، همبستگی کمتر مقاومت ویژه الکتریکی با نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر در مقایسه با سایر ضرایب پیرسون محاسبه شده است. دلیل این رفتار این است که مقاومت ویژه الکتریکی علاوه بر پیوستگی و ارتباط منافذ، به نوع یون‌های موجود در محلول منافذ بتن نیز بستگی دارد که خود تحت تأثیر افزودنی و مواد به کار رفته در طرح مخلوط بتن است. در صورتی که نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر تابعی از یون‌های موجود در داخل

سنگ آهک سبب کاهش نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر و افزایش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به نمونه بتنی کنترل شده است. همچنین، در شکل ۵ دیده شد که با افزایش سن نمونه‌های بتنی حاوی ژئولیت از ۲۸ روز به ۱۲۰ روز، مقدار بهینه این ماده از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد وزن سیمان تغییر یافته است. با افزایش سن نمونه‌های بتنی، آن دسته از ذرات ژئولیتی که در سن‌های پایین‌تر در واکنش هیدراسیون شرکت نکرده بودند، وارد این واکنش می‌شوند. در نتیجه، ژل C-S-H بیشتری تولید شده و ساختار بتن متراکم‌تر می‌شود که نتیجه آن تغییر در مقدار بهینه ژئولیت با افزایش سن بتن است. در جدول ۳ ضرایب همبستگی پیرسون ( $r_{xy}$  در رابطه (۳)) برای متغیرهای دوامی مورد بررسی آورده شده است. هر چه مقدار قدر مطلق ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد، شدت رابطه خطی بین دو متغیر قوی‌تر است. در مقابل، ضریب همبستگی نزدیک به صفر نشان می‌دهد که رابطه خطی بسیار ضعیفی بین متغیرهای مورد نظر برقرار است.

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (3)$$

در رابطه بالا  $r_{xy}$  ضریب همبستگی برای یک نمونه آماری با  $n$  زوج داده  $(X_i, Y_i)$  است.  $s_x$  و  $s_y$  نیز به ترتیب انحراف معیار متغیرهای  $X$  و  $Y$  هستند. میانگین این متغیرها نیز با  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  نشان داده شده‌اند.

منافذ بتن نیستند.

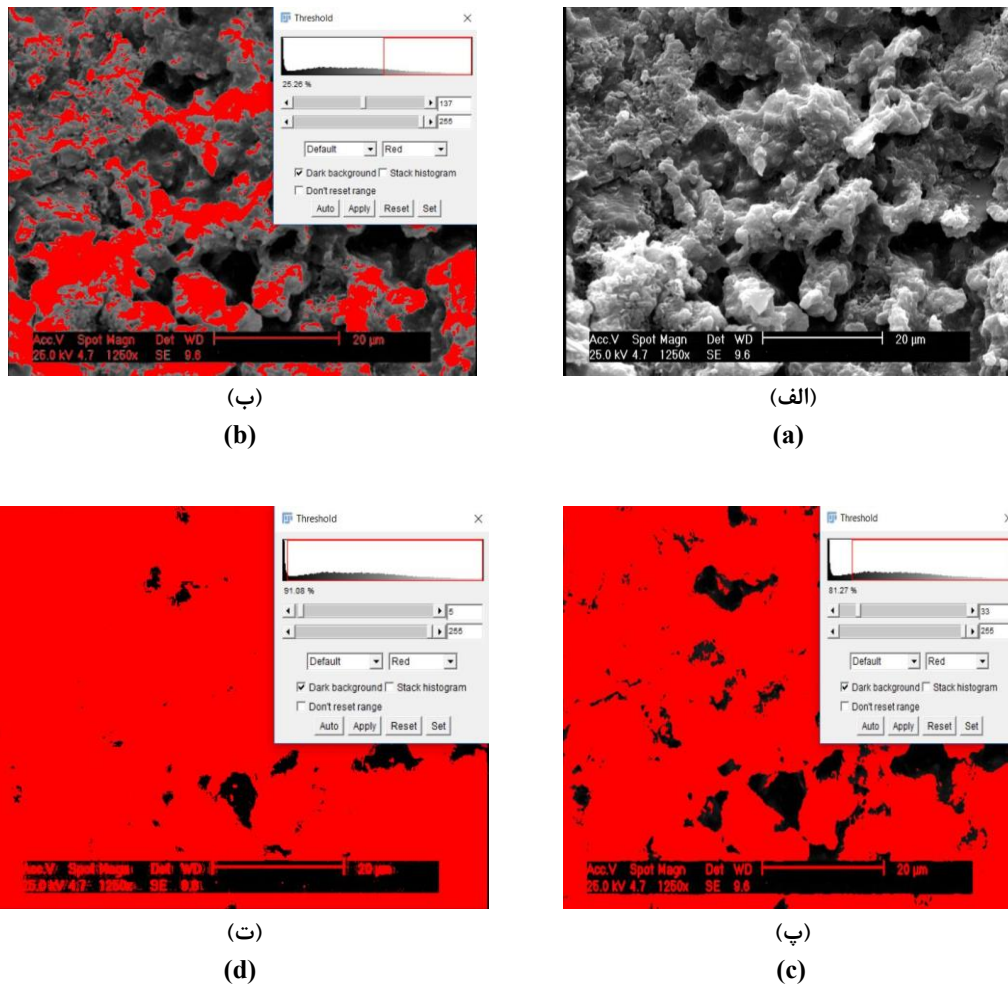
ساختار بسیار متراکم‌تری نسبت به سایر نمونه‌های بتنی مورد مطالعه دارد. همانطور که گفته شده بود، علت این ساختار متراکم‌تر خاصیت پوزولانی و پراکنندگی بالای ذرات دوده سیلیسی، به دلیل سطح مخصوص بسیار بالای آن‌ها است. همچنین در شکل ۱۱ دیده می‌شود که بتن بدون افزودنی ساختار متخلخل‌تری نسبت به سایر نمونه‌های مورد مطالعه دارد. البته با توجه به ناهمگن بودن بتن، ممکن است این مقایسه دارای دقت بسیار بالایی نباشد. اما برای درک بهتر ریزساختار نمونه‌های بتنی بسیار سودمند است. ضرایب تغییرات برای محاسبه تخلخل‌های سطحی نیز در جدول ۴ آورده شده‌اند. این شاخص که از تقسیم انحراف معیار بر میانگین داده‌ها به دست می‌آید، برای اندازه‌گیری توزیع پراکنندگی داده‌های آماری به کار می‌رود و میزان پراکنندگی را به ازای یک واحد از میانگین بیان می‌کند. اعداد مندرج در جدول ۴ ناهمگنی ساختاری بتن‌های مورد مطالعه را تأیید می‌کنند.

برای مقایسه دقیق‌تر، تخلخل‌های سطحی برای نمونه‌های بتنی مورد مطالعه به روشی که قبلاً توضیح داده شده بود، محاسبه شدند. مقادیر محاسبه شده برای این متغیر در شکل ۱۲ رسم شده‌اند. تخلخل حجمی (تخلخل نفوذپذیر) در این شکل مربوط به مقادیر به دست آمده از استاندارد ASTM C642-06 است. همچنین، در شکل ۱۲ مقادیر نرخ نفوذ آب به داخل نمونه‌های بتنی برای مدت زمانی برابر با ۵ ساعت رسم شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقادیر تخلخل‌های سطحی تطابق نسبتاً خوبی با مقادیر تخلخل‌های حجمی و نرخ‌های نفوذ آب به داخل نمونه‌های بتنی دارند. البته، مقادیر محاسبه شده برای تخلخل‌های سطحی برای بتن‌های حاوی زئولیت و پودر سنگ آهک با مقادیر تخلخل‌های حجمی و نرخ‌های نفوذ آب به داخل آن‌ها سازگار نیستند. مقادیر تخلخل‌های سطحی محاسبه شده نشان می‌دهند که بتن حاوی زئولیت نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک دارد. در صورتی که مقادیر اندازه‌گیری شده برای تخلخل‌های حجمی و نرخ‌های نفوذ آب عکس این موضوع را بیان می‌کنند. بنابراین، تخلخل حجمی نسبت به تخلخل سطحی، معیار مناسب‌تری برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی است، زیرا این متغیر با توجه به حجم کل نمونه‌های بتنی محاسبه می‌شود و رابطه معکوسی بین نرخ نفوذ آب به داخل نمونه‌های بتنی و تخلخل حجمی برقرار است. باید توجه شود که استفاده از تخلخل سطحی می‌تواند برای ارزیابی اولیه ریزساختار نمونه‌ها کارآمد باشد و نتایج ارزشمندی را ارائه دهد. اما نسبت به تخلخل حجمی از دقت کمتری برخوردار است.

#### ۴-۲- تأثیر افزودنی‌ها بر ریزساختار بتن

در این مقاله، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر افزودنی‌ها بر ریزساختار بتن از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه حاوی افزودنی‌های ذکر شده با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان و نمونه بتنی بدون افزودنی استفاده شده است. با توجه به همبستگی بالای بین نفوذپذیری، تخلخل نفوذپذیر و مقاومت الکتریکی بتن تنها تأثیر افزودنی‌ها بر ریزساختار و نفوذپذیری بتن مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به ناهمگن بودن بتن، سه قطعه از نقاط مختلف نمونه‌های بتنی برای عکس‌برداری تهیه شدند، یک قطعه در نزدیکی سطح نمونه، یک قطعه نزدیک به مرکز نمونه و یک قطعه بین سطح و مرکز نمونه. پس از عکس‌برداری از قطعات انتخابی، با استفاده از برنامه آنالیز عکس ImageJ [۴۶] میانگین تخلخل‌های سطحی این قطعات اندازه‌گیری شد. به همین منظور، مقدار آستانه‌ای برای رنگ پیکسل‌ها در برنامه آنالیز تصویر تعریف شد. رنگ هر پیکسل در تصویر با عددی بین ۰ تا ۲۵۵ تعریف می‌شود. برنامه آنالیز تصویر مقادیر کوچک‌تر از آستانه انتخابی برای رنگ‌ها را با رنگ قرمز و مقادیر بزرگ‌تر از آن را با رنگ سیاه نشان می‌دهد. در شکل ۶ نحوه انتخاب مقدار آستانه مناسب برای رنگ پیکسل‌ها نشان داده شده است. در شکل ۶-الف آستانه‌ای برای رنگ پیکسل‌ها در تصویر در نظر گرفته نشده است. در شکل‌های ۶-ب و ت نیز مقادیر نامناسبی برای مقدار آستانه انتخاب شده و در نتیجه، سطح منافذ در این شکل‌ها به درستی مشخص نشده است. اما در شکل ۶-ب با انتخاب مقدار مناسبی برای آستانه رنگ‌ها، سطح منافذ به خوبی از سطح جامدات تفکیک شده است. با استفاده از سطح منافذ می‌توان تخلخل سطحی را محاسبه نمود.

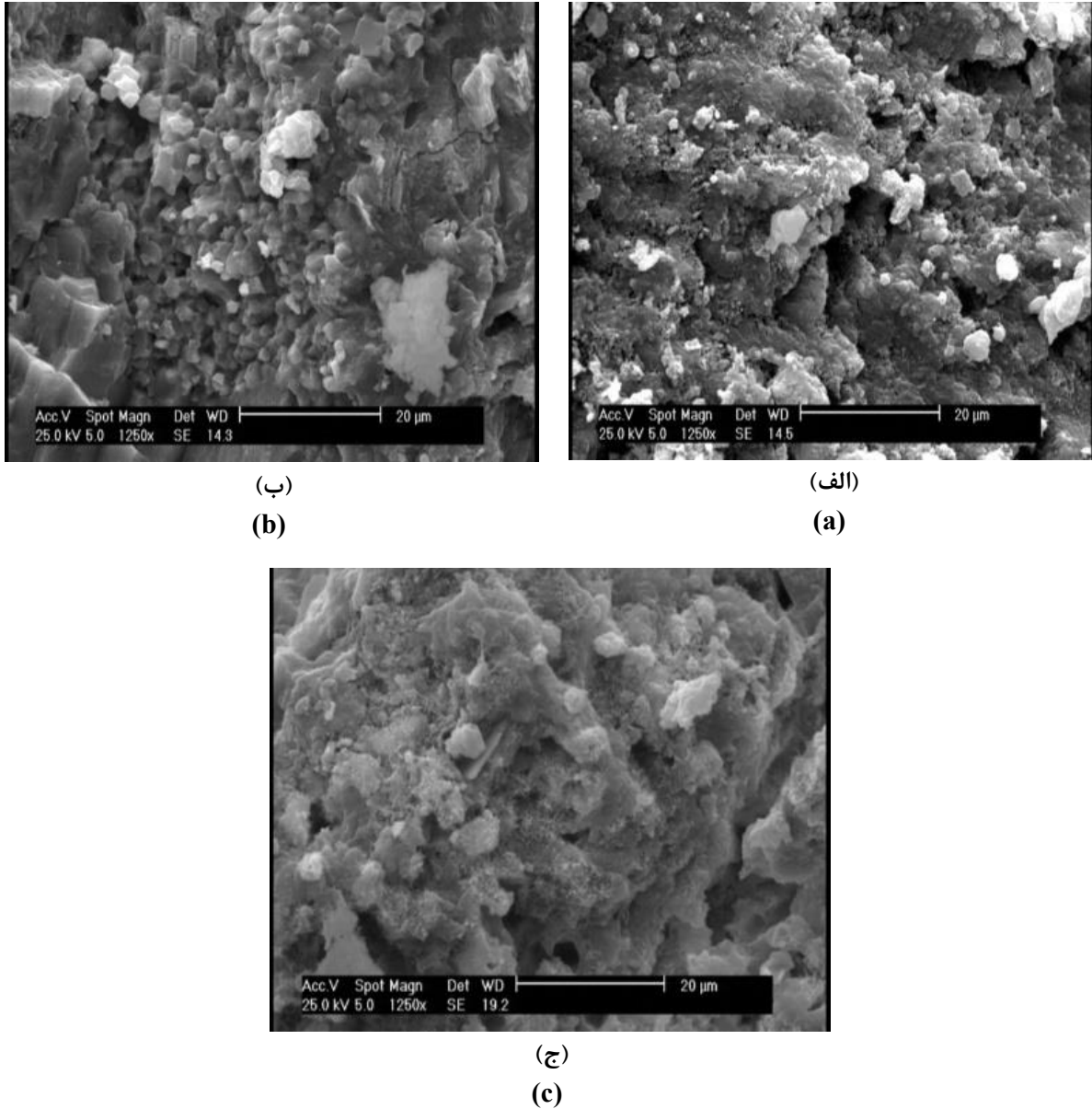
در شکل‌های ۷ تا ۱۱ تصاویر گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی و حاوی افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان پرتلند نوع ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، تصاویر الف، ب و پ به ترتیب مربوط به قطعات انتخاب شده از نزدیک سطح، بین مرکز و سطح و نزدیک مرکز نمونه‌ها هستند. همانگونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، بتن حاوی دوده سیلیسی



شکل ۶. تصویر ریزساختار نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان و در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای آستانه رنگ پیکسل‌ها. (الف) تصویر ریزساختار نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک بدون در نظر گرفتن آستانه برای رنگ پیکسل‌ها (ب) تصویر ریزساختار نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با در نظر گرفتن مقداری نامناسب برای مقدار آستانه برای رنگ پیکسل‌ها (سطح بزرگ‌تری برای منافذ مشخص شده است) (پ) تصویر ریزساختار نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با در نظر گرفتن مقداری نامناسب برای مقدار آستانه برای رنگ پیکسل‌ها (سطح کوچک‌تری برای منافذ مشخص شده است)

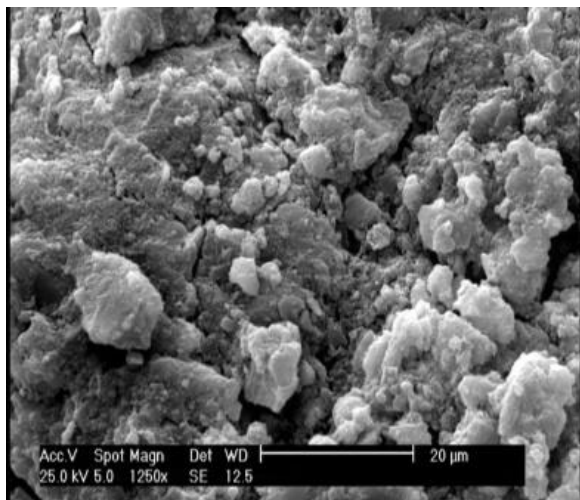
Fig. 6. Image of microstructure of the concrete specimen containing limestone powder with a replacement level of 5 percent of cement mass and considering different values for the threshold of the pixels color. (a) Image of microstructure of the concrete specimen containing limestone powder without considering any threshold for pixels color. (b) Image of microstructure of the concrete specimen containing limestone powder, considering an inappropriate value for the threshold of the pixels color (A larger area is marked for the voids). (c) Image of microstructure of the concrete specimen containing limestone powder, considering an appropriate value for the threshold of the pixels color (Area of the voids is marked properly). (d) Image of microstructure of the concrete specimen containing limestone powder, considering an inappropriate value for the threshold of the pixels color (A smaller area is marked for the voids)



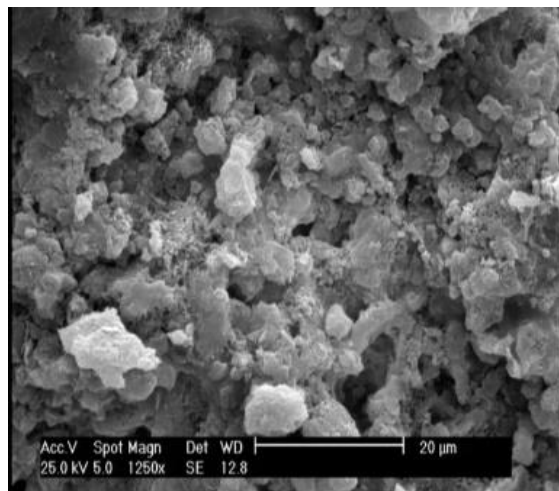


شکل ۷. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه حاوی دوده سیلیسی با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان. (الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح نمونه بتنی (ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز نمونه بتنی (ج) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز نمونه بتنی

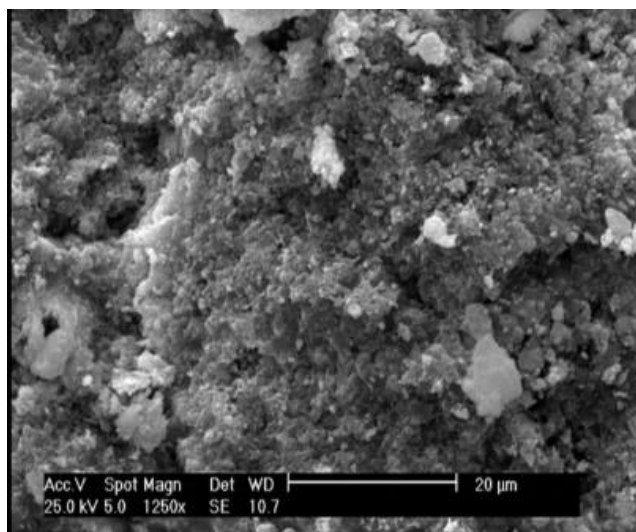
**Fig. 7. Images of the microstructure of the 28-day concrete specimens containing silica fume with a replacement level of 5 percent of cement mass. (a) microstructure image of the piece selected near the surface of the concrete specimen. (b) microstructure image of the piece selected between the surface and the center of the concrete specimen. (c) microstructure image of the piece selected near the center of the concrete specimen)**



(ب)  
(b)



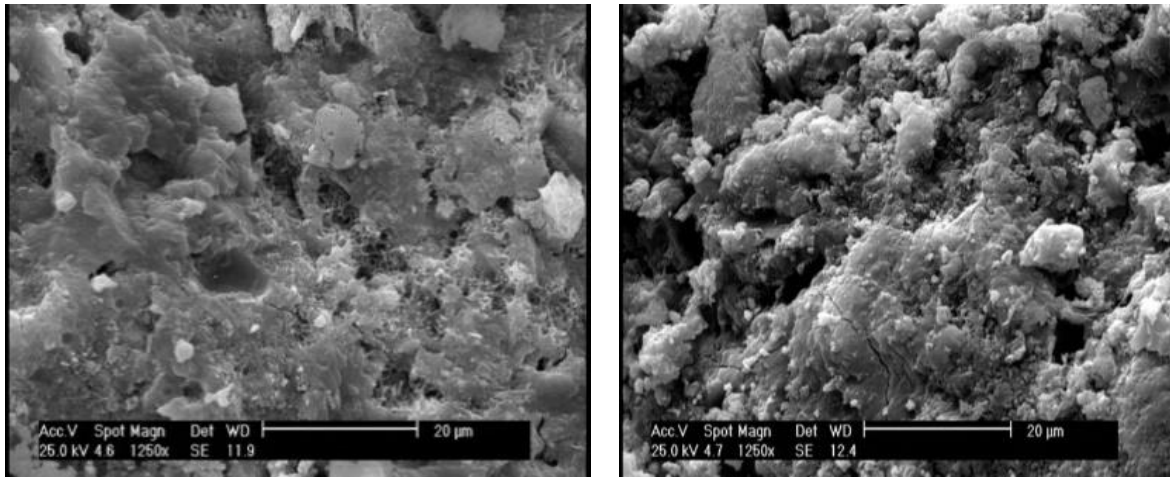
(الف)  
(a)



(ج)  
(c)

شکل ۸. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه حاوی خاکستر بادی با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان. (الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح نمونه بتنی. (ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز نمونه بتنی. (ج) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز نمونه بتنی

**Fig. 8. Images of the microstructure of the 28-day concrete specimens containing fly ash with a replacement level of 5 percent of cement mass. (a) microstructure image of the piece selected near the surface of the concrete specimen. (b) microstructure image of the piece selected between the surface and the center of the concrete specimen (c) microstructure image of the piece selected near the center of the concrete specimen**

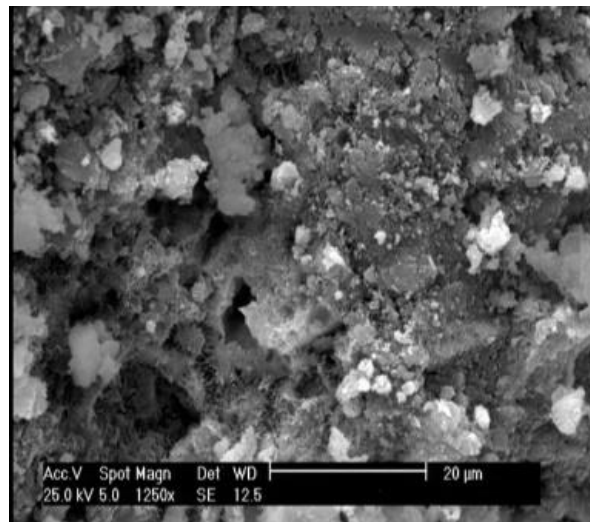


(الف)

(a)

(ب)

(b)



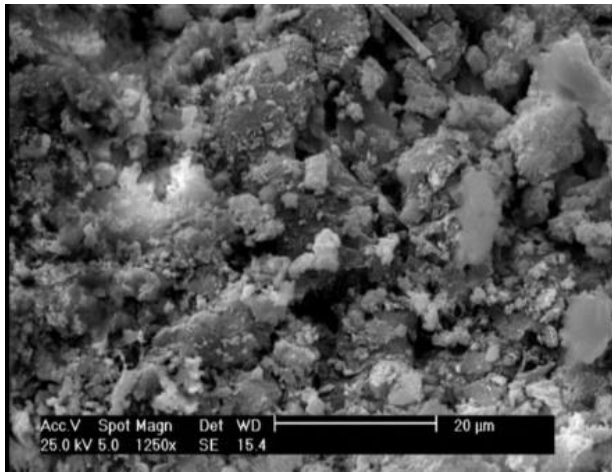
(ج)

(c)

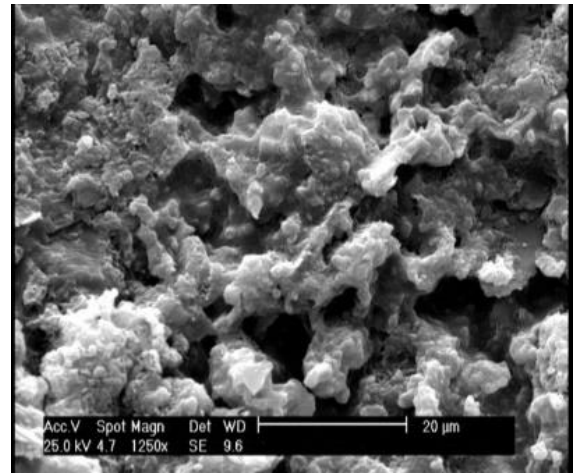
شکل ۹. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه حاوی زئولیت با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان. (الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح نمونه بتنی. (ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز نمونه بتنی. (ج) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز نمونه بتنی

**Fig. 9. Images of the microstructure of the 28-day concrete specimens containing zeolite with a replacement level of 5 percent of cement mass. (a) microstructure image of the piece selected near the surface of the concrete specimen. (b) microstructure image of the piece selected between the surface and the center of the concrete specimen. (c) microstructure image of the piece selected near the center of the concrete specimen**

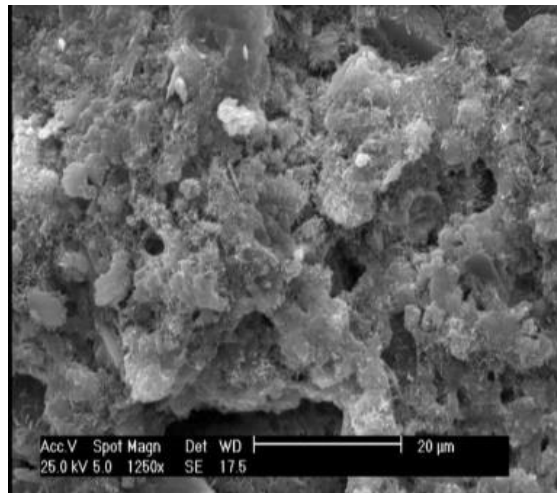




(ب)  
(b)



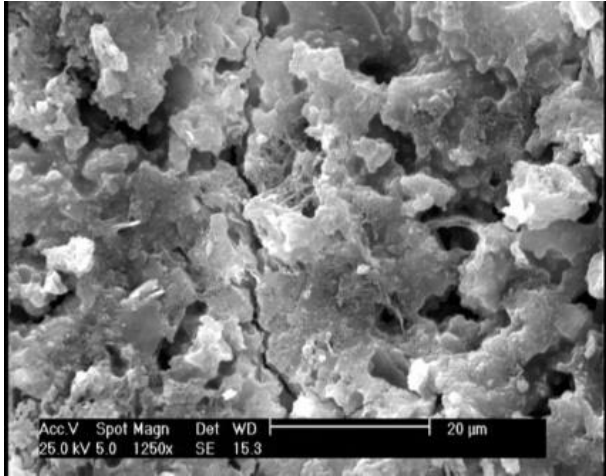
(الف)  
(a)



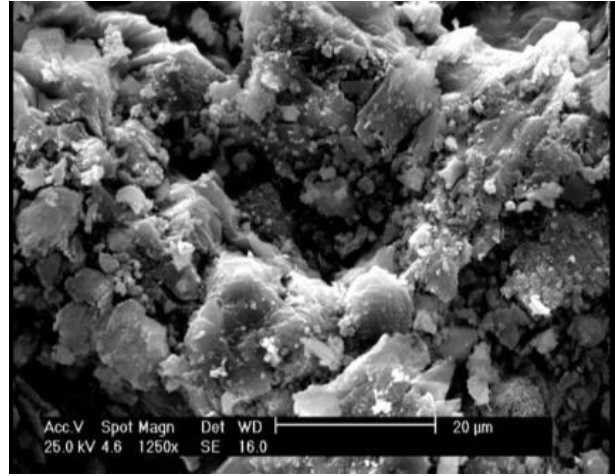
(ج)  
(c)

شکل ۱۰. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان. (الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح نمونه بتنی. (ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز نمونه بتنی. (ج) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز نمونه بتنی

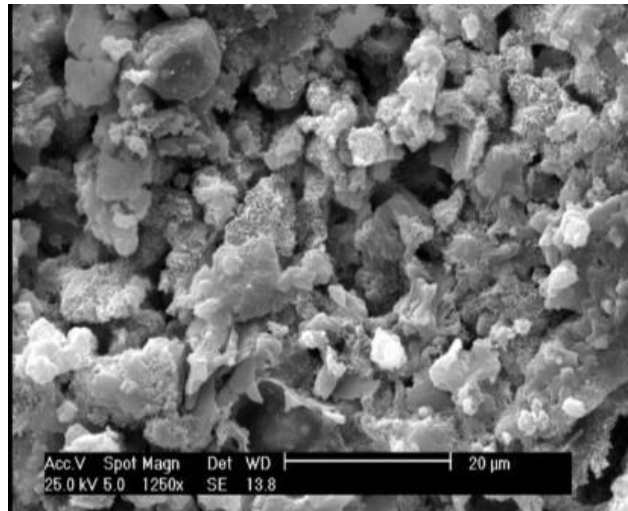
**Fig. 10. Images of the microstructure of the 28-day concrete specimens containing limestone powder with a replacement level of 5 percent of cement mass. (a) microstructure image of the piece selected near the surface of the concrete specimen. (b) microstructure image of the piece selected between the surface and the center of the concrete specimen. (c) microstructure image of the piece selected near the center of the concrete specimen**



(ب)  
(b)



(الف)  
(a)



(ج)  
(c)

شکل ۱۱. تصاویر ریزساختار از نمونه بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی. (الف) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک سطح نمونه بتنی. (ب) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده بین سطح و مرکز نمونه بتنی. (ج) تصویر ریزساختار از قطعه انتخاب شده از نزدیک مرکز نمونه بتنی

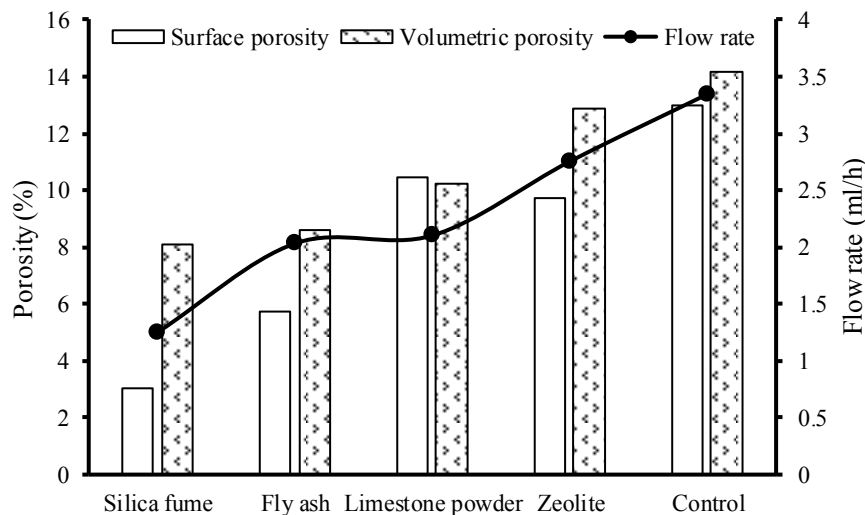
**Fig. 11. Images of the microstructure of the 28-day concrete specimens without any admixture. (a) microstructure image of the piece selected near the surface of the concrete specimen. (b) microstructure image of the piece selected between the surface and the center of the concrete specimen. (c) microstructure image of the piece selected near the center of the concrete specimen**



جدول ۴. ضریب تغییرات برای محاسبه تخلخل‌های سطحی (%)

Table 4. Coefficient of variation for calculating surface porosities (%)

نمونه بتنی	ضریب تغییرات
حاوی دوده سیلیسی	۴۳/۳۱
حاوی خاکستر بادی	۴۸/۵۸
حاوی زئولیت	۳۷/۲۵
حاوی پودر سنگ آهک	۲۸/۵۲
بدون افزودنی	۲۷/۵۹

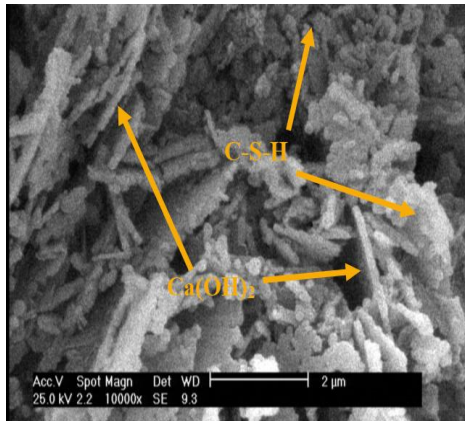


شکل ۱۲. نرخ نفوذ آب، تخلخل‌های حجمی و سطحی برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی و حاوی افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان.

Fig. 12. Rate of water penetration, volumetric and surface porosities for the 28-day concrete specimens without any admixture and containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder mineral admixtures with a replacement level of 5 percent of cement mass.

C-S-H با پیشرفت هیدراسیون افزایش می‌یابد و سوزن‌های اترینگایت در گروه‌های C-S-H نفوذ کرده و یک شبکه جامد را تشکیل می‌دهند. سپس، با افزایش محصولات هیدراسیون سوزن‌های اترینگایت کوتاه شده و در دیگر محصولات هیدراسیون نفوذ می‌کند و یک شبکه منسجم شکل می‌گیرد (شکل ۱۳-ث). به علاوه، برای نمونه بتنی بدون افزودنی، تراکم بلورهای هیدروکسید کلسیم به وضوح مشخص است. همچنین، به دلیل وجود کربنات کلسیم در ساختار پودر سنگ آهک، اترینگایت‌های سوزنی شکل پایدارتری در نمونه بتنی حاوی این ماده نسبت به سایر بتن‌ها دیده می‌شود. البته

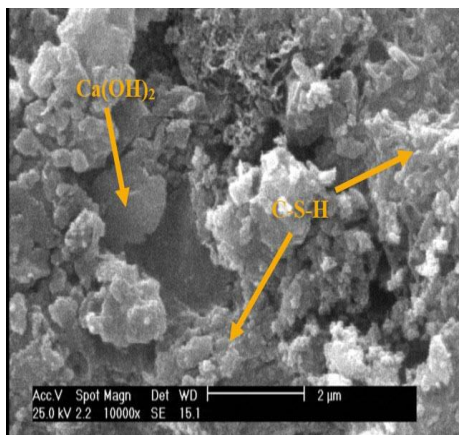
تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی مورد مطالعه با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. شکل‌های ۱۳-الف تا ث به ترتیب مربوط به نمونه بتنی بدون افزودنی و بتن‌های حاوی پودر سنگ آهک، زئولیت، خاکستر بادی و دوده سیلیسی هستند. همانطور که در شکل‌های ۱۳-پ و ت و ث دیده می‌شود، با مصرف هیدروکسید کلسیم در طی واکنش پوزولانی، ژل ثانویه C-S-H بیشتری نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی (شکل ۱۳-الف) تولید شده که نتیجه آن تشکیل ریزساختار متراکم‌تری است. مقدار هیدرات‌ها، به ویژه ژل



(الف)

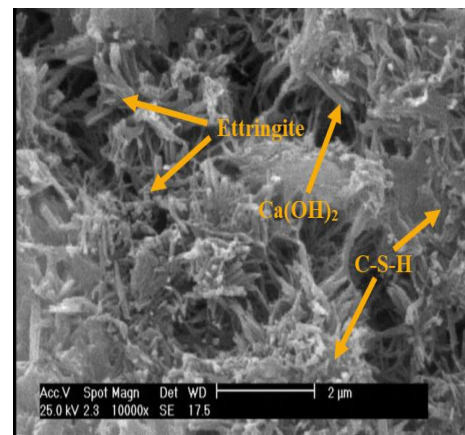


(ا)



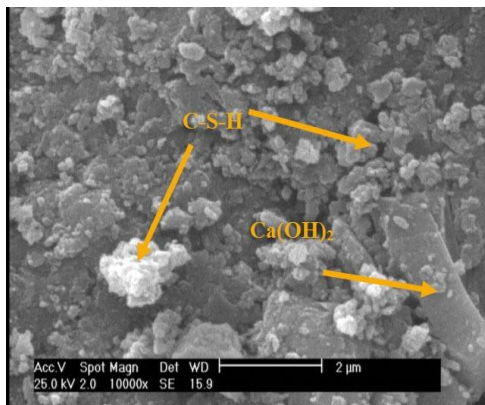
(پ)

(c)



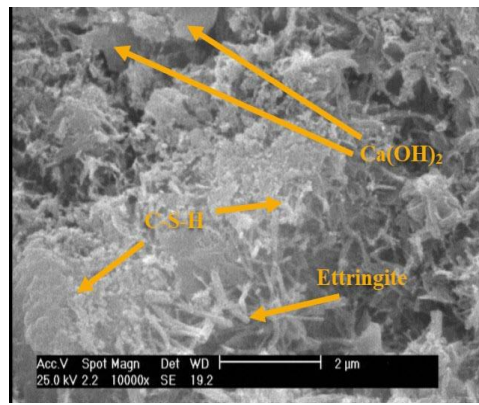
(ب)

(b)



(ث)

(e)

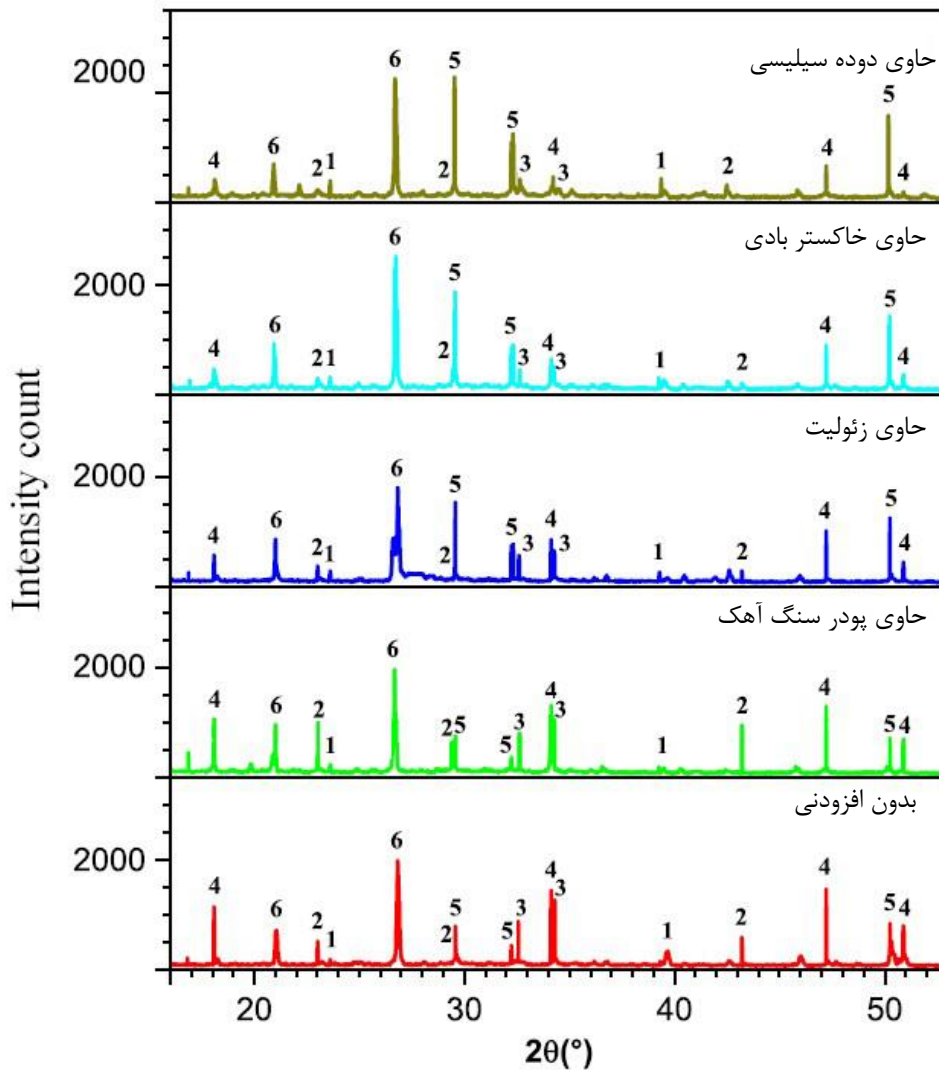


(ت)

(d)

شکل ۱۳. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و با افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان. (الف) نمونه بدون افزودنی. (ب) نمونه حاوی پودر سنگ آهک. (پ) نمونه حاوی زئولیت. (ت) نمونه بتنی حاوی خاکستر بادی. (ث) نمونه بتنی حاوی دوده سیلیسی.

**Fig. 13. Images taken using scanning electron microscope from the concrete specimens without admixtures and containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder mineral admixtures with a replacement level of 5 percent of cement mass. (a) specimen without admixtures. (a) specimen without admixtures. (b) specimen containing limestone powder. (c) specimen containing zeolite. (d) specimen containing fly ash. (e) specimen containing silica fume**



شکل ۱۴. طیف‌های XRD برای نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه بدون افزودنی و حاوی افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان ( $\text{SiO}_2=6, \text{C}_2\text{S}/\text{C}_3\text{S}:3, \text{CaCO}_3:2, \text{C}_3\text{AH}_6:1$ ).

Fig. 14. XRD spectrums for the 28-day concrete specimens without admixtures and containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder mineral admixtures with a replacement level of 5 percent of cement mass (1: $\text{C}_3\text{AH}_6$ , 2: $\text{CaCO}_3$ , 3: $\text{C}_2\text{S}/\text{C}_3\text{S}$ , 4:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 5: C-S-H, 6= $\text{SiO}_2$ ).

زئولیت و پودر سنگ آهک در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. در این طیف‌ها قله‌های پرتلندیت یا هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) در  $2\theta$ های برابر با ۱۸/۱، ۳۴/۰، ۴۷/۲ و ۵۰/۸ درجه دیده می‌شوند. همچنین، قله‌هایی برای سیلیکات‌های کلسیم ( $\text{C}_2\text{S}$  و  $\text{C}_3\text{S}$ ) در  $2\theta$ های برابر با ۳۲/۵ و ۳۴/۳ وجود دارند. قله‌های کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) نیز در  $2\theta$ های برابر با ۲۳/۱، ۲۹/۴ و ۴۳/۲ درجه دیده می‌شوند. به علاوه، قله‌هایی برای آلومینات کلسیم هیدرات ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) در  $2\theta$ های برابر با ۲۳/۵ و ۳۹/۲ درجه وجود دارند. این

این بررسی‌ها کیفی هستند و برای بررسی دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌های بتنی باید به صورت کمی ارزیابی شوند. به همین دلیل، در این مقاله، برای بررسی دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌های بتنی مورد مطالعه نتایج به دست آمده از آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس نیز ارائه شده‌اند. در ادامه توضیحاتی در مورد نتایج حاصله از این آزمایش آورده شده است.

طیف‌های به دست آمده با استفاده از آزمایش پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و با افزودنی‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی،

جدول ۵. شدت قله‌های مربوط به فازهای  $C_2S/C_3S$  و  $Ca(OH)_2$ ،  $C-S-H$  برای نمونه‌های بتنی مورد مطالعه

Table 5. Intensity of the peaks corresponding to  $C-S-H$ ,  $Ca(OH)_2$  and  $C_2S/C_3S$  for the studied concrete specimens

فاز $Ca(OH)_2$	بدون افزودنی	حاوی پودر سنگ آهک	حاوی زئولیت	حاوی خاکستر بادی	حاوی دوده سیلیسی
قله اول	۱۱۹۵/۳	۱۰۹۹/۱	۵۸۳/۴	۴۷۲/۶	۳۱۶/۲
قله دوم	۱۵۰۰/۱	۱۳۶۴/۸	۸۸۸/۲	۶۵۲/۹	۳۳۱/۴
قله سوم	۱۵۱۷/۱	۱۳۴۱/۳	۱۰۲۸/۰	۹۱۷/۴	۵۲۸/۷
قله چهارم	۸۳۰/۹	۷۲۲/۶	۴۷۳/۷	۳۹۸/۸	۸۶/۶
فاز $C-S-H$	بدون افزودنی	حاوی پودر سنگ آهک	حاوی زئولیت	حاوی خاکستر بادی	حاوی دوده سیلیسی
قله اول	۸۲۸/۹	۷۵۷/۷	۱۵۷۶/۳	۱۸۸۱/۵	۲۳۰۶/۴
قله دوم	۴۷۳/۰	۴۰۶/۹	۷۶۳/۳	۹۱۷/۴	۱۲۷۸/۳
قله سوم	۹۰۱/۳	۷۵۰/۰	۱۲۷۳/۸	۱۴۰۷/۵	۱۶۱۴/۱
فاز $C_2S/C_3S$	بدون افزودنی	حاوی پودر سنگ آهک	حاوی زئولیت	حاوی خاکستر بادی	حاوی دوده سیلیسی
قله اول	۹۱۶/۸	۸۱۶/۳	۵۸۳/۷	۴۷۲/۲	۱۲۴/۷
قله دوم	۱۳۰۵/۷	۱۱۴۷/۷	۶۵۷/۲	۵۲۸/۲	۳۲۱/۵

به همین دلیل، شدت قله‌های بزرگ‌تری برای فاز  $C-S-H$  برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های ذکر شده نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی دیده می‌شود. همچنین، داده‌های مندرج در جدول ۵ نشان می‌دهند که دوده سیلیسی به طور مؤثرتری برای کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم و افزایش مقدار  $C-S-H$  عمل کرده است. این موضوع بیانگر خاصیت پوزولانی بسیار بالای دوده سیلیسی، به دلیل وجود  $SiO_2$  در ساختار است (بیشتر از ۹۰ درصد دوده سیلیسی را  $SiO_2$  تشکیل می‌دهد). کاهش نسبتاً جزئی شدت قله‌های هیدروکسید کلسیم و  $C-S-H$  برای نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی از نکات دیگری است که در جدول ۵ دیده می‌شود و دلیل آن اثر رقیق‌سازی سیمان است. می‌توان بیان داشت که پودر سنگ آهک عمدتاً با خاصیت پرکنندگی بالایی ذرات خود سبب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. با بررسی مقادیر شدت قله‌های سیلیکات‌های کلسیم نیز مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های ذکر شده، مقادیر بیشتری از سیمان برای هیدراسیون مصرف شده است. دلیل این امر، اثرات فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌های معدنی بر ریزساختار نمونه‌های بتنی است که پیشتر در مورد آن‌ها توضیح داده شد. البته، پودر سنگ آهک عمدتاً به صورت فیزیکی بر ریزساختار بتن تأثیر گذار است.

قله‌ها برای سیلیکات کلسیم هیدرات ( $C-S-H$ ) به ترتیب در زوایای  $02^\circ$  برابر با  $29/5^\circ$ ،  $32/2^\circ$  و  $50/1^\circ$  درجه دیده می‌شوند. قله‌های فاز کوارتز ( $SiO_2$ ) نیز در  $02^\circ$ های برابر با  $21/1^\circ$  و  $26/9^\circ$  درجه وجود دارند.

کوارتز به دلیل وجود ریزدانه‌ها و کرنات کلسیم نیز به دلیل کرناسیون محصولات هیدراسیون در طیف‌های شکل ۱۴ وجود دارند. در ارتباط با نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک، افزایش ناگهانی برای شدت قله‌های کرنات کلسیم دیده می‌شود که به دلیل وجود  $CaCO_3$  در ساختار پودر سنگ آهک است. برای بررسی دقیق‌تر، شدت قله‌های فازهای مهم در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که در آن‌ها از مواد پوزولانی دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت استفاده شده بود، دارای شدت قله‌های کمتری برای هیدروکسید کلسیم نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی هستند. از یک طرف، جایگزین کردن درصدی از وزن سیمان با این مواد سبب کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم تولیدی، به دلیل کاهش مقدار سیمان مصرفی می‌شود (اثر رقیق‌سازی سیمان). از طرفی دیگر، هیدروکسید کلسیم تولید شده در اثر هیدراسیون سیمان پرتلند، با ذرات پوزولانی واکنش داده و ژل ثانویه  $C-S-H$  تولید می‌شود. این ژل با پر کردن منافذ موجود در بتن، به متراکم‌تر شدن ساختار آن کمک می‌کند.

## ۵- نتیجه گیری

بتنی حاوی پودر سنگ آهک نسبت به نمونه بتنی کنترل نیز بیانگر آن بود که پودر سنگ آهک عمدتاً با خاصیت پرکنندگی خود به بهبود مشخصات دوامی بتن کمک می‌کند. با وجود اینکه پودر سنگ آهک خاصیت پوزولانی ندارد، می‌تواند روند هیدراسیون را تغییر دهد و به این ترتیب سبب افزایش دوام بتن شود.

## ۶- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$A$	سطح مقطع نمونه بتنی، $m^2$
$I$	شدت جریان، $A$
$L$	فاصله بین صفحه‌های فلزی، $m$
$m_1$	وزن نمونه بتنی خشک شده در گرم‌خانه، $kg$
$m_2$	وزن نمونه بتنی در حالت اشباع با سطح خشک پس از ۵ ساعت جوشانده شدن، $kg$
$m_3$	وزن ظاهری نمونه بتنی، $kg$
$r_{xy}$	ضریب همبستگی برای یک نمونه آماری با $n$ زوج داده $(x_i, y_i)$
$s_x$	انحراف معیار متغیر $x$
$s_y$	انحراف معیار متغیر $y$
$\bar{x}$	میانگین متغیر $x$
$\bar{y}$	میانگین متغیر $y$
$V$	ولتاژ، $V$

علائم یونانی

$\rho$	مقاومت ویژه الکتریکی، $\Omega.m$
--------	----------------------------------

در این مقاله، تأثیر افزودنی‌های معدنی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک که جایگزین ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان شده بودند، بر نفوذپذیری، تخلخل نفوذپذیر و مقاومت ویژه الکتریکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها استفاده شد. نتایج به دست آمده از این مطالعات نشان دادند که افزودنی‌های معدنی ذکر شده سبب بهبود مشخصات دوامی بتن شامل نفوذپذیری، تخلخل نفوذپذیر و مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی می‌شوند. با افزایش میزان جایگزینی سیمان با افزودنی‌ها، به دلیل اثر رقیق‌سازی سیمان، ممکن است این ادعا اعتبار خود را از دست دهد. برای مثال، نمونه بتنی ۲۸ روزه حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۲۰ درصد وزن سیمان نفوذپذیری و تخلخل نفوذپذیر بیشتر و مقاومت ویژه الکتریکی کمتری از خود نسبت به نمونه کنترل نشان داد. همچنین، ضرایب پیرسون که تقریباً برابر با ۰/۹۸ و ۰/۷۵ محاسبه شدند نشان دادند که در مقایسه با مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذپذیری همبستگی بیشتری با تخلخل نفوذپذیر دارد. به علاوه، مشاهده شد که در مقایسه با تخلخل‌های حجمی (تخلخل نفوذپذیر)، تخلخل‌های سطحی محاسبه شده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی دقیق‌تری را از ریزساختار بتن‌ها ارائه می‌دهند. نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس نیز بیانگر آن بودند که مواد پوزولانی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت با مصرف هیدروکسید کلسیم و تولید ژل ثانویه C-S-H، سبب بهبود مشخصات دوامی بتن می‌شوند. کاهش نسبتاً جزئی (تقریباً ۸ درصد) در شدت قله‌های هیدروکسید کلسیم و C-S-H برای نمونه‌های



- [10] BS EN 12390-8: Testing hardened concrete - Depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, (2009).
- [11] O.E. Gjrv, Durability design of concrete structures in severe environments, CRC Press, 2014.
- [12] A.R. Bagheri, H. Zanganeh, Comparison of rapid tests for evaluation of chloride resistance of concretes with supplementary cementitious materials, Journal of materials in civil engineering, 24(9) (2012) 1175-1182.
- [13] S.M.M. Karein, A.A. Ramezaniapour, P. Vosoughi, A. Pilvar, S. Isapour, F. Moodi, Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete, Construction and Building Materials, 66 (2014) 222-228.
- [14] H. Minagawa, S. Miyamoto, M. Hisada, Relationship of apparent electrical resistivity measured by four-probe method with water content distribution in concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 15(6) (2017) 278-289.
- [15] H. Dehghanpour, K. Yilmaz, The relationship between resistances measured by two-probe, Wenner probe and C1760-12 ASTM methods in electrically conductive concretes, SN Applied Sciences, 2(1) (2020) 10.
- [16] K. Obla, P.C.L. Lobo, P.R. Hong, S. Sherman, Improving the reliability of resistivity tests of concrete, (2020).
- [17] A.A. Torres-Acosta, L.A. Díaz-Cruz, Concrete durability enhancement from nopal (opuntia ficus-indica) additions, Construction and Building Materials, 243 (2020) 118170.
- [18] R.B. Polder, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation, Construction and building materials, 15(2-3) (2001) 125-131.
- [19] H. Layssi, P. Ghods, A.R. Alizadeh, M. Salehi, Electrical resistivity of concrete, Concrete International, 37(5) (2015) 41-46.
- [20] P. Claisse, Letter: Using Electrical Tests as Durability Indicators, Concrete International, 36(10) (2014) 17.
- [21] P. Azarsa, R. Gupta, Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review, Advances in Materials
- [1] R. Khatri, V. Sirivivatnanon, Methods for the determination of water permeability of concrete, Materials Journal, 94(3) (1997) 257-261.
- [2] W. Vichit-Vadakan, G.W. Scherer, Measuring Permeability of Rigid Materials by a Beam-Bending Method: III, Cement Paste, Journal of the American Ceramic Society, 85(6) (2002) 1537-1544.
- [3] Q.T. Phung, N. Maes, G. De Schutter, D. Jacques, G. Ye, Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method, Construction and Building Materials, 47 (2013) 1488-1496.
- [4] A. Amriou, M. Bencheikh, New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece, Construction and Building Materials, 151 (2017) 642-649.
- [5] M.B.A. Houaria, M. Abdelkader, C. Marta, K. Abdelhafid, Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, Energy Procedia, 139 (2017) 725-730.
- [6] C.M. Tibbetts, J.M. Paris, C.C. Ferraro, K.A. Riding, T.G. Townsend, Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Composites, 107 (2020) 103491.
- [7] H. Yang, C. Lu, W. Liu, G. Mei, H. Wang, X. Ge, Permeability coefficient of high fluidity concrete with relation to permeating duration due to high water pressure, AIP Conference Proceedings, 2185(1) (2019) 020048.
- [8] K.J. Shin, W. Bae, S.-W. Choi, M.W. Son, K.M. Lee, Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens, Construction and Building Materials, 151 (2017) 907-915.
- [9] DIN 1048 part 5: Test methods for concrete, Deutsches Institut für Normung, (1991).

- Building Engineering, 34 (2021) 102012.
- [32] M. Naderi, A. Kaboudan, The effect of concrete constituent materials on the penetration of surface water, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(8) (2020) 3467-3480 (in Persian).
- [33] M. Naderi, A. Kaboudan, Evaluation of the effect of strength, duration and water pressure and concrete casting direction on concrete permeability, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9) (2019) 2379-2398 (in Persian).
- [34] M. Naderi, A. Kaboudan, K. Kargarfard, 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) (2019) 25-43 (in Persian).
- [35] S. Basirat, M. Omrani, B. Behforooz, Effect of microsilica additive on compressive strength and water absorption of lightweight concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(4) (2019) 127-139 (in Persian).
- [36] A. Tarighat, A.K. Jahromi, The Effect of Taftan natural pumice powder and condensed silica fume on the mechanical properties and durability of concrete, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5) (2021) 2131- 2148 (in Persian).
- [37] J. Ahmadi, H. Azizi, M. Koochi, Effect of zeolite on the strength and permeability of conventional concrete with different content of cement, *Concrete Research*, 8(2) (2016) 5-18 (in Persian).
- [38] O. Behnami, R. Farokhzad, Effect of entrapped air on strength and durability of the concrete containing of chemical and natural admixtures, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(1) (2017) 88-109 (in Persian).
- [39] M.G. Shahrakia, M. Miria, M. Rakhshanimehr, An Investigation on the effect of metakaolin and zeolite combination as cement replacement on rebar corrosion and durability of self compacting concrete, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(1) (2016) 49-58 (in Persian).
- [40] Y. Zandi, M. Abedi, Comparative evaluation of the effect Science and Engineering, 2017 (2017) 1-30.
- [22] T.C. Madhavi, S. Annamalai, Electrical conductivity of concrete, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9) (2016) 5979-5982.
- [23] R. Kurda, J. de Brito, J.D. Silvestre, Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 95 (2019) 169-182.
- [24] F. Wenner, A method for measuring earth resistivity, *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 5(16) (1915) 561-563.
- [25] AASHTO T358-15: Standard Test Method for Surface Resistivity Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, (2009).
- [26] ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *ASTM International*, (2006).
- [27] 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).
- [28] 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.
- [29] M. Naderi, A. Kaboudan, A.A. 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.
- [30] M. Naderi, A. Kaboudan, Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability, *Journal of Building Engineering*, 37 (2021) 101928.
- [31] A. Kaboudan, M. Naderi, M.A. Afshar, The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete, *Journal of*

- with constant cement paste volume, Third international conference on applied researches in structural engineering and construction management, Tehran, Iran, (2019) 1-11 (in Persian).
- [44] G. Menéndez, V. Bonavetti, E. Irassar, Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, 25(1) (2003) 61-67.
- [45] P. Thongsanitgarn, W. Wongkeo, S. Sinthupinyo, A. Chaipanich, Effect of limestone powders on compressive strength and setting time of Portland-limestone cement pastes, *Advanced Materials Research*, 343 (2012) 322-326.
- [46] M.D. Abràmoff, P.J. Magalhães, S.J. Ram, Image processing with ImageJ, *Biophotonics international*, 11(7) (2004) 36-42.
- of water/cement ratio (W/C), type and percentage of fly ash on concrete strength against chloride ion penetration and its porosity, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(3) (2021) 17-17 (in Persian).
- [41] M.B. Bafti, T.T. Aghda, Investigation and comparison of test methods of evaluation of concrete durability in the Persian Gulf environment, *Journal of Marine Engineering*, 9(18) (2014) 35-43 (in Persian).
- [42] S. Avarideh, S.A. Hosseini, Investigation of concrete permeability with limestone powder against chloride ion, National conference on practical researches in modern horizons of civil engineering and architectural, Busher, Iran, (2016) 1-10 (in Persian).
- [43] S.M. Davoodnabi, M. Safehian, The effect of incorporation of mineral admixture (silica fume, zeolite, slag, limestone powder) on compressive strength and surface electrical resistivity of self-compacting concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Naderi, A. R. Kaboudan, *The effect of mineral admixtures on permeability, porosity and electrical resistivity of concrete*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 933-958.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19165.7089

