

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها

ندا کامبوزیا، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
امیر باقری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشاء
سید محمد میرعبدالعظیمی*، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

Email: mirabdolazimi@guilan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

بتن نفوذپذیر، یا بتن متخلخل، به دلیل داشتن حفرات به هم پیوسته، اجازه عبور آب با سرعت زیاد از سطح به لایه‌های زیرین را فراهم می‌کند. گرچه یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های کامپوزیت‌های سیمانی، نفونپذیر بودن آنها است، ولی بتن نفوذپذیر برای کاربردهای خاص مانند رویه‌های نفوذپذیر در پارکینگ‌ها، عرشه پل‌ها و سطوح جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مشکلاتی که سطوح نفوذناپذیر برای شهرها ایجاد کرده‌اند، از جمله عدم نفوذ آب بارندگی و در نتیجه ایجاد سیلاب و همچنین عدم تغذیه مناسب سفره‌های آب زیرزمینی، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک افزایش چشمگیری در استفاده از بتن نفوذپذیر در پروژه‌های عمرانی مشاهده شود. در این تحقیق، برای بررسی رابطه بین کیفیت پیوند بین خمیر سیمانی و سنگدانه با مقاومت الکتریکی و همچنین ارزیابی میزان تخلخل مؤثر کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر، ملات‌های نفوذپذیر با درصدهای جایگزینی متفاوت دوده سیلیسی (تا ۲۰٪) به جای سیمان ساخته و بعد از عمل‌آوری در شرایط آب آهک و آب نمک تحت آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بود. هدف از این آزمایش‌ها، رسیدن به تعادلی بین خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی ملات نفوذپذیر و همچنین پیدا کردن رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و الکتریکی این کامپوزیت‌هاست. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های درشت‌تر، عملکرد بهتری در مقاومت‌های فشاری و الکتریکی دارند. همچنین، عمل‌آوری نمونه‌ها در آب نمک، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را به شدت کاهش داد. به طوری که حتی بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری، نمونه‌ها به ندرت بیش از ۱۰ اهم - متر مقاومت را از خود نشان دادند. علاوه بر این، رابطه خطی معناداری بین مقاومت فشاری و الکتریکی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بتن نفوذپذیر، مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری، دوده سیلیسی، تخلخل

۱. مقدمه

تغییرات مقاومت الکتریکی می‌توان به اطلاعات ارزشمندی از ریزساختار این کامپوزیت‌ها رسید. فاز خمیر سیمانی که دی الکتریکی محسوب می‌شود و فاز محلول حفره‌ای که به دلیل وجود یون‌های گوناگون در آن رسانایی الکتریکی قابل توجهی دارد، دو فاز اصلی در کامپوزیت‌های سیمانی را تشکیل می‌دهند. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در مورد مقاومت الکتریکی بتن-های گوناگون انجام شده است. ولی اطلاعات خاصی در مورد مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر در دست نیست. از آنجا که مقدار تخلخل بتن‌های نفوذپذیر قابل توجه بوده و در شرایط معمولی این حفرات از آب خالی هستند، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی می‌تواند اطلاعاتی در مورد چگونگی و کیفیت پیوند بین خمیر سیمانی و سنگدانه در بتن نفوذپذیر به دست دهد. تومیداسکی (۱۹۹۶)، رسانایی الکتریکی ملات‌ها را مورد بررسی قرار داد. او انواع ملات‌های سیمانی را با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و حجم سنگدانه به حجم ملات در سنین مختلف عمل‌آوری مورد مطالعه قرار داد و منحنی‌های نسبتاً دقیقی را برای این شرایط استخراج نمود. رفتار متفاوت ملات‌ها با نسبت‌های مختلف مواد تشکیل دهنده، به خوبی بیانگر نقش برجسته سن عمل‌آوری و نسبت حجم سنگدانه به حجم ملات بود. در طول دهه ۹۰ میلادی، دستگاه‌های سنجش امپدانس یا به عبارتی سنجش الکتریکی با جریان متناوب (فرکانسی) وارد حوزه آزمایش کامپوزیت‌های سیمانی شدند. سنگول و گیورف (۲۰۰۸) مطالعاتی را روی رفتار الکتریکی بتن و مقایسه دو آزمایش مختلف انجام دادند که نتایج به دست آمده دقت بسیار زیادی را در ارتباط نتایج با هم نشان می‌داد. میلارد و سادوسکی (۲۰۰۹)، از جمله نخستین محققانی بودند که با تشخیص نقاط ضعف سیستم‌های اندازه‌گیری فرکانسی و محدودیت‌های آنها، به سیستم‌های جریان مستقیم روی آوردند. آنها روش نوینی را ابداع نمودند که می‌توانستند با تغییر قطب و

یکی از بلاای طبیعی که در اثر تغییرات اقلیمی شدت یافته، طوفان‌ها و بارندگی‌های شدید است که هر ساله به تعداد و شدت آنها افزوده شده و خسارات مالی و جانی فراوانی را به ملت‌ها تحمیل می‌کنند. لذا، مهندسان و محققان رشته عمران به دنبال راه‌هایی برای کاهش خسارات وارده از این بلاای طبیعی هستند. یکی از این راه‌حل‌ها، استفاده از سطوح نفوذپذیر در سطح شهرها برای کاهش خطر ایجاد سیلاب در اثر جاری شدن رواناب حاصل از بارندگی است. بهترین مصالح برای ساخت، سطوح نفوذپذیر بتن و کامپوزیت‌های سیمانی هستند. از آنجایی که پارامتر تأثیرگذار بر میزان نفوذپذیری بتن‌های متخلخل، درصد تخلخل این کامپوزیت‌هاست و این پارامتر به شدت مقاومت‌های الکتریکی و مکانیکی بتن‌های نفوذپذیر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. دستیابی به تعادلی بین تخلخل و مقاومت مکانیکی در این کامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۱. مروری بر مطالعات پیشین

تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر در زمینه تکنولوژی سطوح نفوذپذیر انجام شده است و محققان ابعاد گوناگون استفاده از بتن نفوذپذیر را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. مهم‌ترین کاربرد بتن نفوذپذیر، به خصوص در آمریکا، به عنوان رویه است. در ادامه، به برخی پژوهش‌های انجام شده در زمینه بتن نفوذپذیر اشاره شده است.

۱-۱-۱. مقاومت الکتریکی

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی از دهه ۸۰ میلادی به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی خصوصیات دوام کامپوزیت‌های سیمانی معرفی شد. از آنجا که کامپوزیت‌های سیمانی از دو فاز متفاوت از لحاظ الکتریکی تشکیل شده‌اند، با بررسی

بررسی اثرات انرژی ذخیره شده در نمونه، رفتار ماتریس - های سیمانی را به شکلی دقیق‌تر مورد مطالعه قرار دهند. از تحقیقات دیگری که در این حوزه انجام شده، می‌توان به کارهای ون و چونگ (۲۰۰۱ a,b) اشاره نمود. آنها تأثیر نیروی فشاری در کاهش یا افزایش پولاریزاسیون داخل کامپوزیت سیمانی را بررسی کردند. در نهایت مشخص شد که نیروی فشاری روی پولاریزاسیون الکتریکی کامپوزیت سیمانی تأثیرگذار است. همچنین، حضور پوزولان و الیاف کربن این کاهش پولاریزاسیون را در پی داشت. آنها همچنین اثر تغییر قطب در ماتریس - های سیمانی تحت تأثیر تنش و همچنین در ماتریس‌های سیمانی مسلح به الیاف کربن به منظور بررسی تأثیر این نوع الیاف رسانا بر نتایج را مورد مطالعه قرار دادند (ون و چونگ، ۲۰۰۱). آنها در ادامه تحقیقات خود در سال ۲۰۰۶، با مقایسه اثر جریان‌های مستقیم و متناوب دریافتند که در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر با جریان مستقیم می‌توان نتایج نزدیک به آزمون‌های با جریان متناوب را استخراج نمود (ون و چونگ، ۲۰۰۶).

۲-۱-۱. بتن نفوذپذیر

بتن نفوذپذیر یکی از راه‌های مناسب و به‌صرفه برای پاسخ مناسب به چالش‌های محیط‌زیستی حال حاضر کره زمین است. با جذب آب باران و زهکشی سریع آن به لایه‌های زیرین، موجب تغذیه آب‌های زیرزمینی شده و مانع از ایجاد سیلاب می‌شود. در واقع، بتن نفوذپذیر یکی از بهترین روش‌ها و توصیه شده توسط سازمان‌های محیط‌زیستی برای مدیریت آب‌های ناشی از بارندگی است. در ساخت این بتن، استفاده از مقدار مناسب خمیر برای پوشاندن و چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر، سیستمی نفوذپذیر با پیوستگی قابل توجه بین حفرات تولید می‌کند. در حالی که بتن نفوذپذیر می‌تواند برای تعداد زیادی از کاربردهای سازه‌ای به کار رود، کاربرد اصلی آن به عنوان رویه است. معمولاً نفوذپذیری این بتن بین ۲ تا ۶ میلی متر بر ثانیه است (تنیس و همکاران، ۲۰۰۴). انجمن بتن آمریکا (۲۰۱۳) بتن نفوذپذیر را

اینگونه تعریف می‌کند: بتنی که حاوی هیچ یا مقدار کمی ریزدانه می‌باشد که در نتیجه باعث ایجاد حفرات کافی برای عبور هوا و آب از سطح به لایه‌های زیرین می‌شود. قابلیت عبور آب با سرعت زیاد، بتن نفوذپذیر را تبدیل به مصالحی خوب برای زهکشی آب بارندگی می‌کند. علاوه بر این قابلیت اصلی مقابله با پدیده جزیره گرم، کاهش نویز بین لاستیک و سطح جاده، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و ایمنی بیشتر هنگام رانندگی از دیگر نکاتی هستند که استفاده از بتن نفوذپذیر را به عنوان رویه، هم از نظر فنی و اقتصادی، به گزینه مناسبی تبدیل می‌کنند (اولک و همکاران، ۲۰۰۳؛ هاسلباخ و همکاران، ۲۰۱۱). اندازه، هندسه، و توزیع اندازه دانه‌های سنگدانه نقش مهمی در کنترل خصوصیات مکانیکی، دوام و نفوذپذیری بتن متخلخل دارد. علاوه بر خصوصیات فیزیکی سنگدانه، نوع سنگدانه نیز تأثیر زیادی بر خصوصیات بتن نفوذپذیر دارد. گرچه بیشتر مطالعات از سنگ آهک استفاده کرده‌اند ولی در برخی از تحقیقات گزارش شده است که استفاده از سنگدانه دولومیتی موجب افزایش مقاومت فشاری بتن نفوذپذیر می‌شود (کاسیچ و همکاران، ۲۰۰۴). برای بهبود خصوصیات مختلف بتن نفوذپذیر در سال‌های اخیر محققان تلاش‌های فراوانی کرده‌اند. از آن جمله می‌توان به دئو و نیتالات (۲۰۱۱) اشاره کرد. طرح‌های اختلاط با مقادیر مختلف خمیر برای رسیدن به تخلخل مورد نظر ساخته شدند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خمیر کم و زیاد، با افزایش تخلخل کاهش یافت. کرنش‌های نهایی نمونه‌های با خمیر کم در بیشترین تنش کمتر از نمونه‌های متناظر با خمیر زیاد بود. همچنین، افزایش تخلخل نیز کرنش نهایی را کاهش داد. در نهایت نیز کاهش تخلخل باعث افزایش انرژی فشاری جذب شده توسط نمونه‌ها شد. کورن و همکاران (۲۰۱۴) برای بهبود دوام بتن نفوذپذیر در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان از الیافی به طول ۳۸ و ۵۶ میلی‌متر استفاده کردند. مشاهده شد که افزودن الیاف موجب کاهش نفوذپذیری و سرعت عبور آب از خلل و

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. مصالح مصرفی

۱-۱-۲- سیمان

در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ هگمتان استفاده شد. این سیمان بیشترین کاربرد را در پروژه‌های صنعتی و تحقیقاتی کشور دارد. ترکیب شیمیایی سیمان در جدول ۱ و مشخصات فیزیکی سیمان در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده در این

پژوهش	
درصد تشکیل دهنده	ترکیبات شیمیایی
۶۴/۳۸	CaO
۲۱/۰۸	SiO ₂
۵/۳۶	Al ₂ O ₃
۳/۶۴	Fe ₂ O ₃
۲	MgO
۰/۸۲	K ₂ O
۰/۵	Na ₂ O
۲/۱	SO ₃
-	C

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در این

پژوهش	
مقدار	مشخصه فیزیکی
۳/۱۵	وزن مخصوص (g/cm ³)
۳۶۰	سطح مخصوص (m ² /kg)
۴۵ <	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۳۶۰ >	زمان گیرش نهایی (دقیقه)

۲-۱-۲. دوده سیلیسی

دوده سیلیسی پودری است به رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۴-۹۶ درصد دی‌اکسید سیلیسیوم (SiO₂) می‌باشد، که از فرایند تولید فروسیلیسیوم در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید و برای ارتقاء

فرج می‌گردد. با افزایش درصد الیاف، این خصوصیات کاهش بیشتری را تجربه کردند. مقاومت سایشی نمونه‌های حاوی الیاف بهتر از نمونه‌های متناظر بدون الیاف بود. دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان با افزودن الیاف با طول ۵۶ میلی‌متر بهبود یافت. در مورد رفتار الکتریکی بتن‌های نفوذپذیر اطلاعات بسیار محدودی در دست است و می‌توان گفت تنها تحقیق انجام شده مربوط به نینالات و همکاران (۲۰۰۶) است. در این تحقیق، از مطالعه امیدانس و سیستم‌های الکتریکی فرکانسی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که یک مدل تک‌فازی رسانایی برای پیش‌بینی رسانایی مؤثر بتن نفوذپذیر چیزی در حدود ۳۵٪/خطا در پی دارد. از سال ۲۰۱۶، بتن نفوذپذیر به عنوان لایه سطحی برای بزرگراه‌ها و همچنین تونل‌ها در چین به کار گرفته می‌شود. چن و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد رویه نفوذپذیر بزرگراه‌ها را بررسی کردند و پیشنهاد دادند که بهتر است لایه رویه نفوذپذیر بعد از گیرش اولیه لایه نفوذناپذیر زیرین اجرا شود. همچنین، شو و کان (۲۰۱۳) نیز گزارش دادند که بهترین زمان برای اجرای لایه نفوذپذیر بین گیرش اولیه و نهایی لایه زیرین است.

۳-۱. هدف از پژوهش حاضر

پژوهش‌های بسیار محدودی در زمینه رویه‌های نفوذپذیر در کشور انجام شده است و نیاز به گردآوری اطلاعات جامع برای کاربرد این رویه‌ها در پروژه‌های عمرانی کشور حس می‌شود. از این رو، در این تحقیق، اقدام به ساخت ملات‌های نفوذپذیر شده است تا با اندازه‌گیری سرعت آب عبوری و مقاومت‌های مکانیکی آن اطلاعات لازم برای اجرای این کامپوزیت‌های سیمانی در مقیاس بزرگ فراهم شود. همچنین، استفاده از روش غیرمخرب مقاومت الکتریکی برای تعیین کیفیت پیوند بین خمیر و سنگدانه در کامپوزیت‌های نفوذپذیر را می‌توان از نوآوری‌های تحقیق پیش رو دانست.

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها

جدول ۳. ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی مورد استفاده در

این پژوهش	
درصد تشکیل دهنده	ترکیبات شیمیایی
۱/۵	CaO
۸۹	SiO ₂
۱	Al ₂ O ₃
۲	Fe ₂ O ₃
۳	C

۳-۱-۲. مصالح سنگی

در این مطالعه، از ماسه طبیعی بستر رودخانه سفیدرود استفاده شد. جنس مصالح سنگی از نوع سیلیسی بوده و مشخصات فیزیکی این مصالح در جدول ۴ درج شده است. با توجه به اینکه در ساخت بتن‌های نفوذپذیر به ندرت از ریزدانه استفاده می‌شود، دستیابی به مقاومت‌های فشاری بیشتر از ۷ مگاپاسکال نیز دور از انتظار است. ولی در این تحقیق، برای پیشبرد تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر، ساخت ملات‌های نفوذپذیر مورد آزمایش قرار گرفت و از آنجا که اندازه سنگدانه تأثیر قابل توجهی روی خصوصیات کامپوزیت-های سیمانی نفوذپذیر دارد، دو اندازه سنگدانه در طرح-های اختلاط به کار رفت: گروه اول سنگدانه‌های رد شده از الک ۱۶ و مانده روی الک ۳۰ و گروه دوم سنگدانه‌های عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۶۰. با توجه به اینکه مصالح مورد نظر هر دو ریزدانه بوده‌اند و هر کدام جزء عبوری از یک الک مشخص و مانده روی الک ریزتر بعدی هستند، به جای عبارت ماسه ریز و یا ماسه درشت از اسامی ماسه ۱۶-۳۰ و ۳۰-۶۰ جهت تشخیص و پیگیری بهتر نتایج استفاده شده است.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

نوع مصالح	وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)	سایش لس آنجلس (%)	جذب آب (%)
ماسه ۳۰-۶۰	۲/۶۵	۲۰/۶	۱/۷
ماسه ۱۶-۳۰	۲/۶۴	۲۲/۵	۱/۴

بعضی از خواص بتن در زمان ساخت، به بتن افزوده می‌شود. افزودن میکروسیلیس به مخلوط بتن باعث می‌گردد دی‌اکسید سیلیسیوم فعال آن با محلول هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و افزایش مقاومت بتن گردد. سایر موارد کاربرد دوده سیلیسی عبارتند از: افزایش مقاومت فرسایشی بتن، کاهش پتانسیل واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، ساخت بتن‌هایی با مقاومت فشاری زیاد و کاهش احتمال بروز پدیده سرطان بتن.

جهت تعیین اثر واقعی دوده سیلیسی در نتایج آزمون‌های مختلف، از هیچ افزودنی دیگری در ساخت نمونه‌ها استفاده نشده است. دوده سیلیسی استفاده شده از شرکت فروسیلیس سمنان تهیه شده است و در درصد‌های مختلف جایگزین سیمان شد. شکل ۱، دوده سیلیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. دوده سیلیسی مورد استفاده در این پژوهش

همچنین، ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی در جدول ۳ ارائه شده است. میزان سیلیس در این ماده معمولاً مقداری بین ۸۵ تا ۹۸ درصد است که میزان دقیق آن بستگی به نوع محصول کوره و کارخانه سیلیس دارد.

این رو، انتخاب نسبتی مناسب می‌تواند خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی را به طور چشمگیری بهبود دهد. در این تحقیق، نسبت سنگدانه به خمیر سیمانی برای نمونه‌های با اندازه سنگدانه مختلف، متفاوت در نظر گرفته شد. از آنجا که با کوچک شدن اندازه سنگدانه‌ها سطح ویژه ذرات افزایش چشمگیری پیدا می‌کند، در نمونه‌های با سنگدانه ۳۰-۶۰ نسبت ۲/۸۷۵ و در نمونه‌های با سنگدانه ۱۶-۳۰ نسبت ۳/۳۷۵ در نظر گرفته شد. هر دوی این نسبت‌ها در محدوده تعیین شده برای بتن-های نفوذپذیر قرار دارند. برای تقویت خمیر سیمانی و در نتیجه چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها به هم، در طرح‌های اختلاط از دوده سیلیسی به عنوان جایگزینی بخشی از سیمان استفاده شد. درصدهای مختلف جایگزینی برای رسیدن به درصد بهینه از نظر مکانیکی و هیدرولیکی آزمایش شد.

۲-۲. برنامه و روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ۱۰ طرح اختلاط ساخته شد (جدول ۵). در این جدول، C نماد طرح شاهد، SF نماد دوده سیلیسی و عدد سمت چپ آن درصد جایگزینی آن است. اعداد ۱۶-۳۰ و ۶۰-۳۰ نشان‌دهنده دانه‌بندی ماسه استفاده شده در طرح اختلاط هستند. نیمی از طرح‌ها حاوی ماسه ۱۶-۳۰ و نیمی دیگر حاوی ماسه ۶۰-۳۰ بودند. جدول ۶، به طور خلاصه تعداد نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش، ابعاد نمونه‌ها و هدف از آزمایش را نشان می‌دهد.

یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر، نسبت سنگدانه به خمیر سیمانی است. این نسبت میزان پوشش خمیر دور سنگدانه‌ها و همچنین نفوذپذیری نمونه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از

جدول ۵. طرح‌های اختلاط در پژوهش حاضر

ماسه (kg/m ³)	دوده سیلیسی (kg/m ³)	سیمان / آب	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	کد طرح
۱۳۵۰	-	۰/۳	۱۲۰	۴۰۰	C16-30
۱۳۵۰	۲۰	۰/۳	۱۲۰	۳۸۰	5SF16-30
۱۳۵۰	۴۰	۰/۳	۱۲۰	۳۶۰	10SF16-30
۱۳۵۰	۶۰	۰/۳	۱۲۰	۳۴۰	15SF16-30
۱۳۵۰	۸۰	۰/۳	۱۲۰	۳۲۰	20SF16-30
۱۱۵۰	-	۰/۳	۱۲۰	۴۰۰	C30-60
۱۱۵۰	۲۰	۰/۳	۱۲۰	۳۸۰	5SF30-60
۱۱۵۰	۴۰	۰/۳	۱۲۰	۳۶۰	10SF30-60
۱۱۵۰	۶۰	۰/۳	۱۲۰	۳۴۰	15SF30-60
۱۱۵۰	۸۰	۰/۳	۱۲۰	۳۲۰	20SF30-60

جدول ۶. مشخصات آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

مشخصه	مقاومت فشاری	مقاومت الکتریکی	ضریب نفوذپذیری
تعداد نمونه	۳	۳	۲
هندسه نمونه	مکعب	مکعب	استوانه
ابعاد نمونه (میلی‌متر)	۵۰*۵۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	۱۰۰*۱۰۰
اهداف آزمایش	<ul style="list-style-type: none"> تعیین معیاری برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری 	<ul style="list-style-type: none"> تعیین رابطه بین مقاومت الکتریکی و کیفیت پیوند رابطه بین خصوصیات دوام و مکانیکی ملات نفوذپذیر 	<ul style="list-style-type: none"> تعیین ضریب نفوذپذیری و مقایسه آن با مقادیر به دست آمده قبلی در بتن نفوذپذیر

کل خمیر ساخته شده به خوبی با سنگدانه‌ها مخلوط شد. پس از ریختن مخلوط‌های ملات نفوذپذیر داخل قالب‌ها، ویراسیون با دقت کامل انجام شد. از آنجایی که ویراسیون بیش از حد در بتن‌های نفوذپذیر به سرعت باعث ته‌نشین شدن خمیر سیمانی می‌شود، دقت انجام ویراسیون بسیار مهم است. پس از حدود ۴۸ ساعت، کلیه نمونه‌ها از قالب‌ها بیرون آورده شدند و برای شبیه‌سازی محیط‌های آبی و یا دریایی، همچون پایه‌های پل‌های احداث شده روی رودخانه‌ها و یا ابنیه راه که در معرض آب‌های شور قرار دارند (به عنوان نمونه، پل عبوری از دریاچه ارومیه)، نیمی از نمونه‌ها در محلول آب نمک ۰.۵٪ عمل‌آوری شدند. همچنین، نیمی دیگر از نمونه‌ها در حوضچه‌های آب آهک عمل‌آوری شدند. با توجه به واکنش‌های شیمیایی معمول حین تولید بتن و در سنین اولیه آن در محیط‌های آبی، در این پژوهش، عمل‌آوری در محلول آب آهک به عنوان شرایط استاندارد لحاظ گردیده است. دمای آب در حدود دمای اتاق (۲۳ درجه سلسیوس) بود. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه رفتار ملات‌های سیمانی در سنین کم از اهمیت زیادی برخوردار بوده و مبنایی از مقاومت آنها در سنین بالاتر است، سن ۳ روز در جمع سنین مورد آزمون نمونه‌ها گنجانده شد. از طرفی، طبق آیین‌نامه بتن ایران، سنین ۷ و ۲۸ روز به عنوان معیاری برای لحاظ و یا عدم لحاظ ضوابط آیین‌نامه‌ای در حیطه مقاومت فشاری بتن به شمار

از آنجایی که تغییر این نسبت تأثیر شدیدی روی خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی دارد و مطالعه این تأثیر جزو پارامترهای این تحقیق نبود، نسبت آب به سیمان ثابت فرض شد. همچنین، جهت نگهداری غلظت خمیر سیمانی در محدوده مطلوب که قابلیت چسبانندگی مطلوب را داشته باشد و در عین حال ته‌نشین نشود، با روش آزمون خطا، نسبت آب به سیمان ۰/۳ در نظر گرفته شد. خمیرهای سیمانی غلیظ به طور یکنواخت دور سنگدانه را نپوشانده و عدم چسبانندگی را نتیجه می‌دهد. خمیرهای سیمانی با نسبت آب به سیمان زیاد و رقیق، ته‌نشینی خمیر را در پی دارد که در نتیجه آن نفوذپذیری و مقاومت مکانیکی نمونه به شدت کاسته می‌شود. ساخت کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر متفاوت از دیگر انواع کامپوزیت‌های سیمانی است. از آنجایی که کنترل مقدار خمیر بسیار حائز اهمیت است، ابتدا مواد سیمانی شامل سیمان و دوده سیلیسی با یکدیگر مخلوط شدند. پس از آن، مقدار آب مورد نظر به مخلوط اضافه شد و تا تشکیل خمیر سیمانی یکنواخت روند مخلوط کردن ادامه یافت. پس از تشکیل خمیر سیمانی، حدود یک سوم از آن به سنگدانه‌ها اضافه شد و مخلوط کردن تا زمان رسیدن پوشش یکنواخت خمیر به تمام سنگدانه‌ها ادامه یافت. البته لازم به ذکر است که بررسی مقدار پوشش به صورت چشمی انجام گردید. سپس، به همین ترتیب اضافه کردن خمیر سیمانی ادامه پیدا کرد تا



شکل ۲. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه مکعبی در

پژوهش حاضر

۲-۳-۳. آزمون ضریب نفوذپذیری

داشتن نفوذپذیری زیاد و به عبارت دیگر رسانایی هیدرولیکی قابل توجه، از مهم‌ترین خصوصیات کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر است. از آنجایی که دانستن نرخ عبور آب از داخل حفرات نمونه نفوذپذیر می‌تواند اطلاعات کلی در مورد تخلخل مؤثر داخل نمونه را به دست دهد، انجام این آزمایش برای تمامی رویه‌های نفوذپذیر ضروری است. برای این کار، دستگاه هد ثابت آب که در شکل ۳ به نمایش در آمده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش کار بدین صورت است که سطح جانبی نمونه استوانه‌ای ساخته شده ابتدا به طور کامل عایق شده و سپس نمونه با دقت داخل رینگ‌های آلومینیومی قرار می‌گیرد. هد ورودی از آب پر شده و با باز کردن شیر تعبیه شده، نرخ خروج آب از نمونه با پر شدن هد خروجی اندازه‌گیری می‌شود. با به دست آوردن زمان مورد نیاز برای خروج کامل هد ورودی آب و استفاده از رابطه (۲)، ضریب نفوذپذیری برای نمونه متخلخل به دست می‌آید.

$$K = \frac{A_1 l}{A_2 l} \log \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، K ضریب نفوذپذیری، A_1 و A_2 سطح مقطع نمونه و سطح مقطع دستگاه هد ثابت، l طول نمونه، h_1 هد اولیه و h_2 هد خروجی دستگاه هستند.

می‌رود. جهت تبیین رشد نهایی مقاومت بتن نیز در فعالیت‌های اجرایی از سن ۹۰ روز استفاده می‌شود. لذا، به منظور کاربردی بودن نتایج پژوهش حاضر در حیطه طراحی، از سنین مذکور در آزمایش‌ها استفاده گردید.

۲-۳. آزمون‌های آزمایشگاهی

۲-۳-۱. آزمون مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ای اس تی ام (۲۰۱۶) با کد C109 انجام شد. برای این آزمایش، نمونه‌های مکعبی با بُعد ۵۰ میلی‌متر ساخته شدند. بعد از خروج نمونه‌ها از حوضچه‌های عمل‌آوری، سطح آنها به دقت با پارچه خشک شده و سپس نمونه‌ها داخل دستگاه جک بتن‌شکن قرار گرفتند. نرخ نیروی اعمالی به میزان ۸۰۰ نیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد و پس از شکست نمونه و ثبت حداکثر نیروی وارده، با تقسیم آن بر سطح نمونه، مقدار مقاومت فشاری نمونه به دست آمد.

۲-۳-۲. آزمون مقاومت الکتریکی

این آزمایش بر اساس استاندارد آستو (۲۰۱۴) با کد TP95 انجام شد. بعد از خروج نمونه‌ها از حوضچه‌های عمل‌آوری در سنین مختلف، سطح نمونه‌ها با پارچه تمیز به طور کامل خشک گردید تا اندازه‌گیری در حالت اشباع با سطح خشک انجام گیرد. سپس دو الکتروود در بالا و پایین نمونه‌های مکعبی قرار گرفتند (شکل ۲). با اعمال ولتاژ ۶۰ ولت به دو الکتروود، جریان عبوری از نمونه اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه (۱)، مقاومت الکتریکی هر نمونه اندازه‌گیری شد.

$$R = \frac{V A}{I L} \quad (1)$$

که V ولتاژ اعمالی، I بار عبوری از نمونه، A مساحت سطح زیر الکتروود نمونه و L طول نمونه (فاصله دو الکتروود) هستند.

هیدراتاسیون سیمان انتظار می‌رود تا در سنین بالاتر نتایج بهتری از نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی به دست آید. با افزایش مقدار دوده به بیش از ۱۰٪، کاهش قابل توجهی در مقاومت دیده می‌شود. اضافه کردن بیش از حد دوده سیلیسی منجر به جمع‌شدگی ذرات در اثر توزیع نامناسب آنها می‌شود. این جمع‌شدگی‌ها می‌تواند محلی برای شروع ریزترک‌ها باشد. نمونه‌های حاوی ماسه ۱۶-۳۰ عملکرد بهتری را در مقاومت فشاری ۳ روز نشان داده‌اند. اختلاف بین نتایج زمانی افزایش یافته که دوده سیلیسی به عنوان جایگزین به مخلوط‌ها اضافه شده است. این اختلاف ممکن است به دلیل تغییر خصوصیات رئولوژیک خمیر سیمانی در اثر افزودن دوده سیلیسی باشد. با افزایش غلظت خمیر سیمانی به دلیل وجود ذرات ریز دوده با سطح ویژه بسیار بالا که آب را در خود نگه می‌دارد، حرکت آن بین سنگدانه‌های ریزتر و پوشش کامل آنها دچار مشکل شده و در نهایت پوشش غیریکنواخت خمیر موجب کاهش خصوصیات مکانیکی می‌شود.

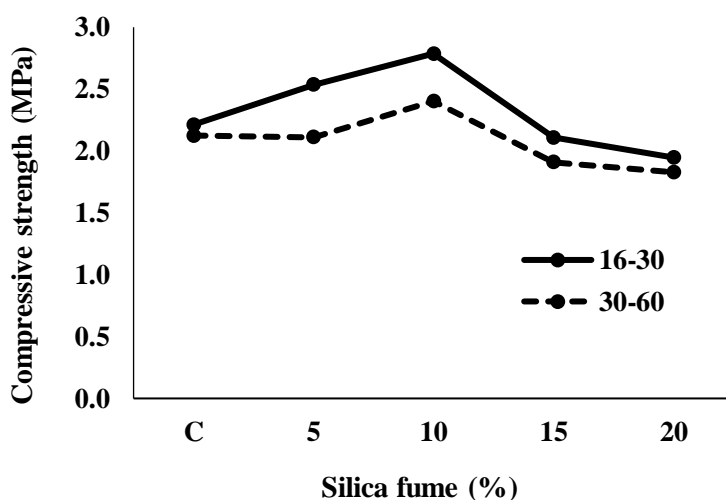


شکل ۳. دستگاه تعیین نفوذپذیری با هد ثابت در پژوهش حاضر

۳. نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری

شکل ۴، مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سن ۳ روز را با هم مقایسه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن دوده سیلیسی تا ۱۰٪ منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است. با جایگزینی مقداری از سیمان با دوده سیلیسی و با توجه به واکنش-پذیری دوده سیلیسی با محصولات هیدراتاسیون و تشکیل کلسیم سیلیکات ثانویه، خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی بهبود می‌یابد و با پیشرفت



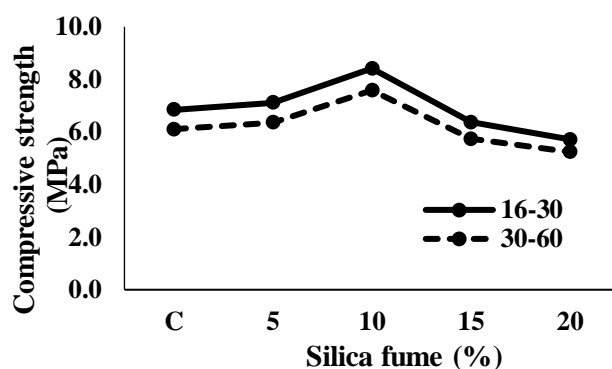
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سن ۳ روز

افزایش یافته است. با افزایش درصد دوده سیلیسی به ۱۰٪، افزایش ۲۳ درصدی مقاومت در نمونه‌های حاوی ماسه ۱۶-۳۰ مشاهده می‌شود. کاهش شدید مقاومت در

شکل ۵، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روز را با هم مقایسه می‌کند. همانطور که انتظار می‌رفت، اختلاف بین نتایج نمونه شاهد با نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی

سنگدانه به خمیر نیز کاهش یافت، ولی به نظر می‌رسد افزایش قابل توجه سطح ویژه ذرات، مقدار خمیر قابل توجهی را برای پوشش یکنواخت نیاز دارد. از طرفی، افزایش بیش از حد مقدار خمیر و کاهش نسبت سنگدانه به خمیر موجب بسته شدن حفرات و مسیرهای عبور آب می‌شود.

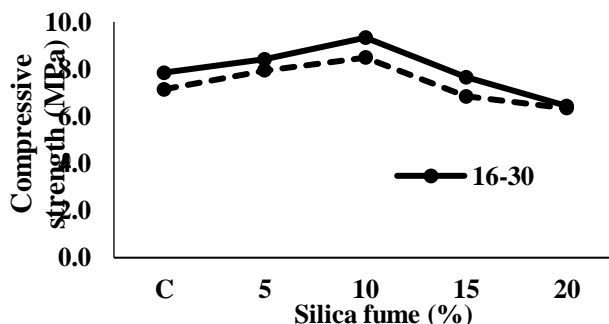
اثر افزایش بیش از حد درصد دوده و کمتر شدن مقاومت نسبت به نمونه شاهد نشان از اهمیت حفظ درصد بهینه جایگزینی سیمان در کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر دارد. همچنان، نمونه‌های با سنگدانه‌های درشت‌تر عملکرد بهتری را نشان داده و در تمامی درصد‌های جایگزینی سیمان، مقاومت بیشتری را نمایش داده‌اند. این برتری می‌تواند به دلیل پخش بهتر خمیر سیمانی اطراف سنگدانه باشد. اگرچه با کاهش اندازه سنگدانه، نسبت



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سن ۷ روز

مقاومت نمونه نسبت به نمونه شاهد می‌شود. در کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر، به دلیل کمتر بودن خمیر سیمانی، خصوصیات مکانیکی حتی بیش از کامپوزیت‌های سیمانی معمولی وابسته به مرز میان سنگدانه و خمیر است. با افزایش بیش از حد دوده سیلیسی نیز نه تنها این مرز تقویت نشده، بلکه ریزترک‌های ایجاد شده در اثر تجمع ذرات موجب تضعیف مرز می‌شود. برتری نمونه‌های حاوی ماسه ۱۶-۳۰ شیمیایی تکمیل می‌شود، ادامه داشته است.

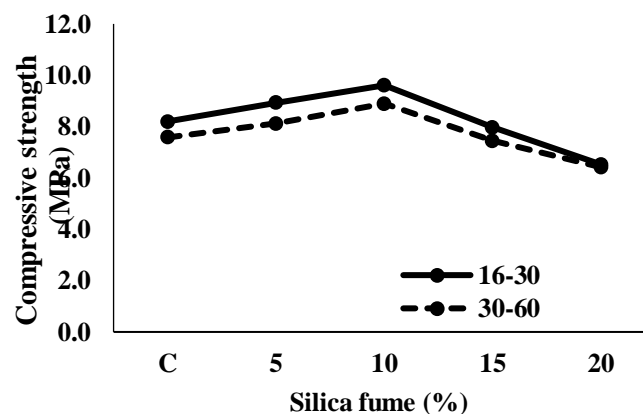
شکل ۶، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد. در نمونه‌های حاوی ماسه ۱۶-۳۰، اختلاف بین نتایج نسبت به سن ۷ روز تقریباً ثابت مانده است. این امر نشان می‌دهد که دوده سیلیسی به عنوان یک پوزولان فعال در سنین کم مقدار قابل توجهی از واکنش‌های شیمیایی را تکمیل نموده و معمولاً بعد از سنین ۱۴ و یا ۲۸ روز نرخ افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی کاهش چشمگیری می‌یابد. در نمونه‌های حاوی ماسه ۳۰-۶۰، افزایش بیش از حد درصد جایگزینی دوده سیلیسی موجب کمتر شدن



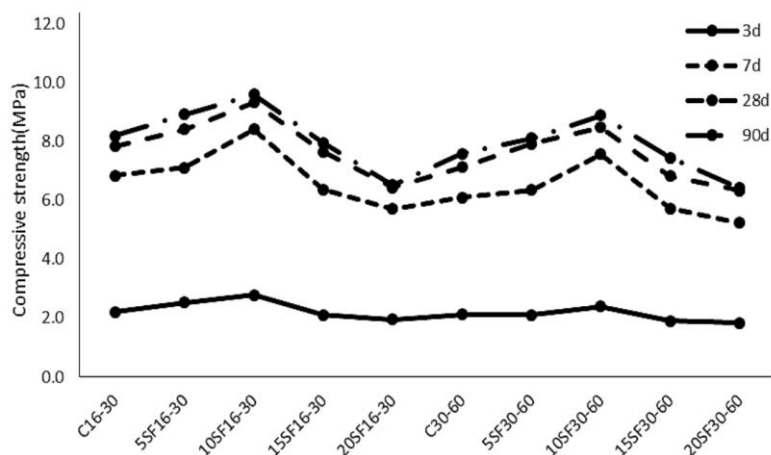
شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سن ۲۸ روز

دانست. به نظر می‌رسد با این مقدار جایگزینی هم واکنش‌های پوزولانی تا کامل شدن پیش می‌روند و هم خاصیت پرکنندگی ذرات دوده به خوبی تراکم خمیر سیمانی را افزایش می‌دهد. کاهش شدید مقاومت با افزایش درصد دوده سیلیسی به بیش از ۱۰٪ می‌تواند به دلیل خصوصیات رئولوژیک نمونه‌های حاوی درصد‌های بالای دوده نیز باشد. افزایش غلظت خمیر سیمانی می‌تواند دلیلی برای عدم پوشش یکنواخت سنگدانه‌ها باشد. با توجه به اینکه خمیرهای سیمانی حاوی درصد‌های بالای دوده، خواص تیکسوتروپیک دارند و در صورت عدم اختلاط تمایلی به حرکت ندارند، این عامل می‌تواند مانع از حرکت خمیر و پوشش دور سنگدانه شود. شکل ۸، مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سنین مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین افزایش مقاومت بین سنین ۳ تا ۷ روز اتفاق افتاده است؛ جایی که هیدراتاسیون سیمان تا حد زیادی تکمیل شده و واکنش‌های پوزولانی دوده سیلیسی نیز در این سنین بیشترین مقدار کلسیم سیلیکات ثانویه را تشکیل می‌دهند. با افزایش سن به ۲۸ روز، نرخ افزایش مقاومت با توجه به واکنش‌های شیمیایی کمتر کندتر شده و در این سن برخی نمونه‌ها به مقاومت‌های بیش از ۸ مگاپاسکال دست یافته‌اند که حد بالای مقاومت برای بتن‌های نفوذپذیر است.

از آنجایی که درصد‌های جایگزینی دوده سیلیسی برای نمونه‌های حاوی سنگدانه با اندازه مختلف یکسان بوده است، این اختلاف در نتایج تنها می‌تواند به دلیل پوشش متفاوت خمیر دور سنگدانه در نمونه‌ها باشد. با اینکه در ساخت نمونه‌ها نهایت دقت به عمل آمد تا تمامی سنگدانه‌ها به طور یکنواخت پوشش خمیر را دور خود داشته باشند ولی با توجه به سطح ویژه بالای سنگدانه‌های ریزتر از الک ۳۰، پوشش کامل سنگدانه‌ها با توجه به محدودیت‌های موجود در نسبت سنگدانه به خمیر کاری بسیار دشوار است. شکل ۷، مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سن ۹۰ روز نشان می‌دهد. در نمونه‌های حاوی ماسه ۱۶-۳۰، مقاومت بیشتر از ۸ مگاپاسکال نشان از بیشتر بودن مقاومت کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر نسبت به بتن نفوذپذیر دارد. در تحقیقات قبلی، بازه مقاومتی بتن نفوذپذیر بین ۴ تا ۸ مگاپاسکال گزارش شده است. ولی در اینجا مشاهده می‌شود که با کاهش اندازه سنگدانه‌ها و استفاده از پوزولان در خمیر سیمانی می‌توان به مقاومت‌های بیشتر نیز دست پیدا کرد. به نظر می‌رسد درصد بهینه جایگزینی دوده سیلیسی در کامپوزیت‌های سیمانی نفوذپذیر کمتر از کامپوزیت‌های سیمانی معمولی است، زیرا در تحقیقات معمولاً برای ۲۰٪ جایگزینی سیمان با دوده در ملات‌های معمولی کاهش مقاومتی مشاهده نمی‌شود. در نمونه‌های حاوی ماسه ۳۰-۶۰ نیز مقدار بهینه جایگزینی دوده سیلیسی را می‌توان ۱۰٪



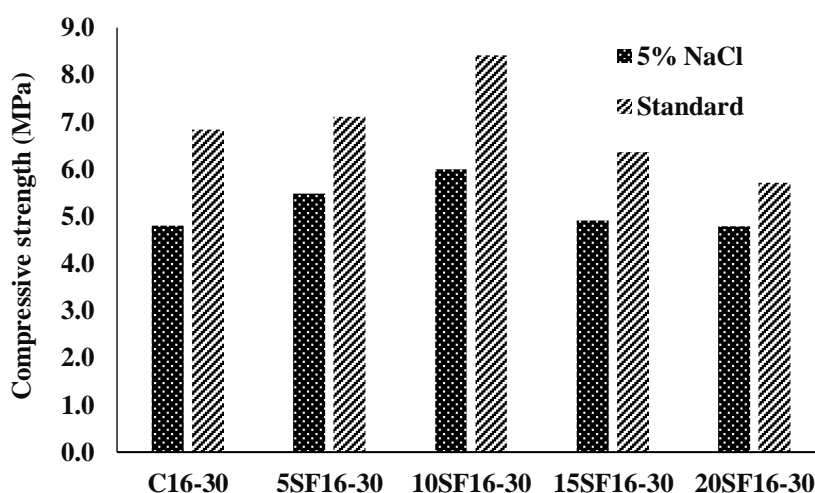
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سن ۹۰ روز



شکل ۸. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک در سنین مختلف

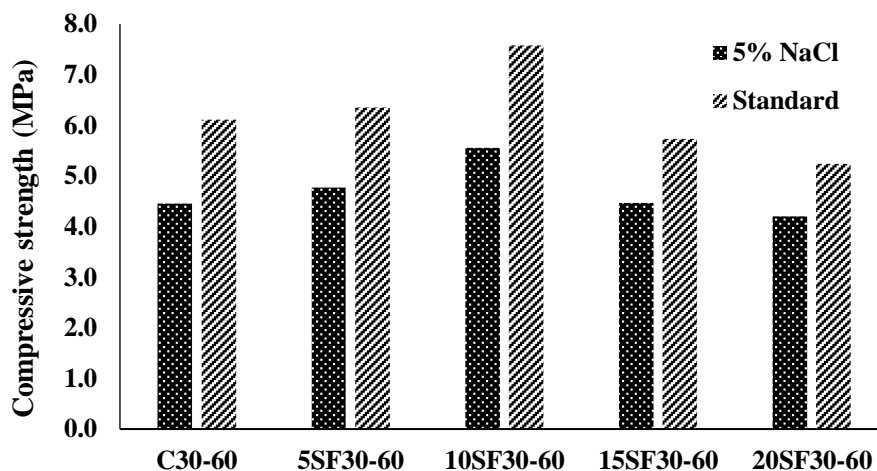
نتایج نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مختلف افزایش یافته است. بیشترین اختلاف در نمونه حاوی ۱۰٪ دوده اتفاق افتاده است. در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب نمک، به دلیل تجزیه کلسیم هیدروکسید، این واکنش‌ها به طور کامل انجام نشده و در نتیجه نرخ افزایش مقاومت کمتر از نمونه‌های دیگر است.

شکل ۹، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ را در سن ۷ روز و عمل‌آوری شده در محلول ۵٪ آب نمک (شبیه‌سازی شرایط دریایی) در مقایسه با عمل‌آوری در آب آهک (شرایط استاندارد) نشان می‌دهد. در مقایسه با عمل‌آوری در آب آهک، نمونه‌های عمل‌آوری شده و اشباع از آب نمک مقاومت‌های کمتری نمایش داده‌اند. با افزایش سن نمونه‌ها و افزایش واکنش-پذیری دوده سیلیسی با کلسیم هیدروکسید، اختلاف بین



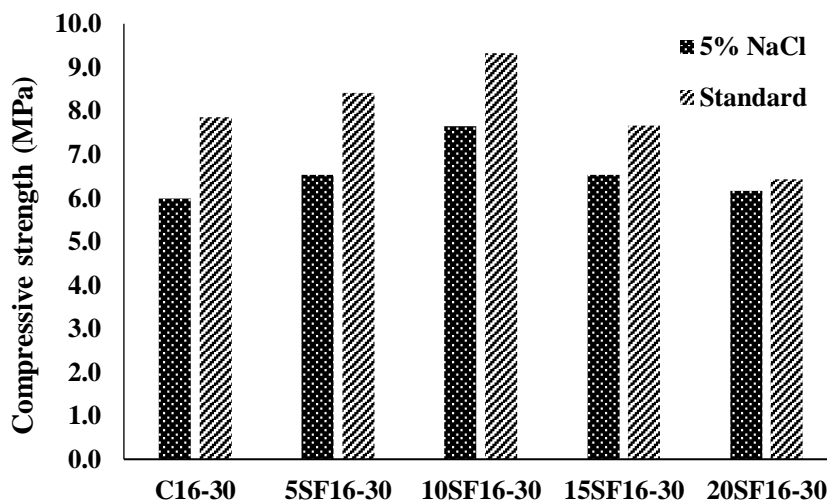
شکل ۹. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول ۵٪ آب نمک حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ در سن ۷ روز

شکل ۱۰، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ را در سن ۷ روز نشان می‌دهد. روند تغییر نتایج مشابه با نتایج به‌دست آمده برای نمونه‌های ۱۶-۳۰ است. با افزایش درصد دوده سیلیسی به بیش از ۱۰٪، اختلاف بین نتایج کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند به دلیل جایگزینی بیش از حد دوده سیلیسی و جمع‌شدگی این ذرات باشد.

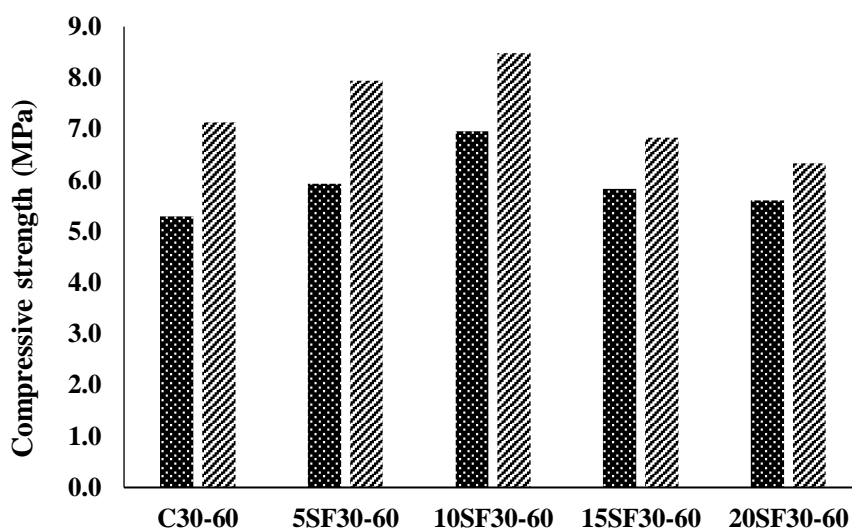


شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول ۵٪ آب نمک حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ در سن ۷ روز چشمگیری در افزایش مقاومت را نتیجه داده است. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ در سن ۲۸ روز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده مشابه سنین کمتر است و نمونه‌های عمل-آوری شده در آب آهک به طور میانگین ۱۰٪ مقاومت بیشتر را نسبت به نمونه‌های آب نمک نشان داده‌اند.

شکل ۱۱. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ را در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. وجود آب نمک، نرخ کسب مقاومت را در تمامی نمونه‌ها به شدت کند می‌کند. خروج کلسیم هیدروکسید که از محصولات اصلی فرایند هیدراتاسیون محسوب می‌شود، به‌خصوص در مورد نمونه‌های پوزولانی، کاهش



شکل ۱۱. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول ۵٪ آب نمک حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ در سن ۲۸ روز



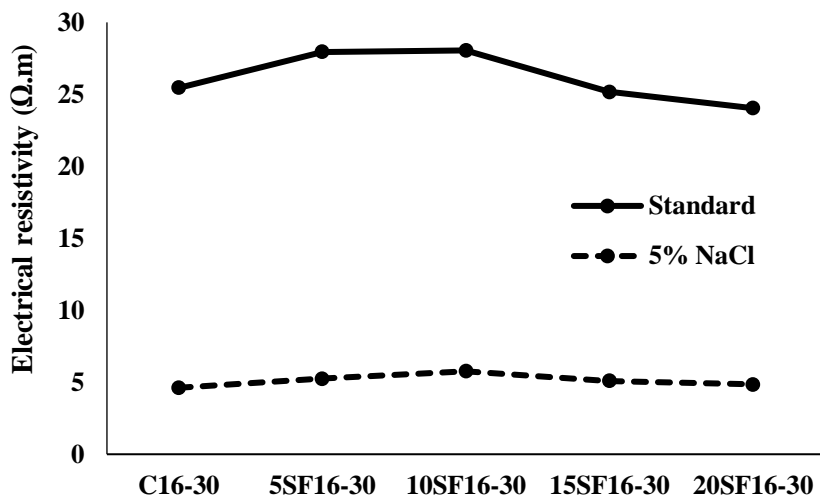
شکل ۱۲. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول ۵٪ آب نمک حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ در سن ۲۸ روز

به کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و الکتریکی، به نظر می‌رسد که جایگزینی ۱۰٪ از سیمان با دوده سیلیسی بهترین عملکرد را نتیجه داده است. علاوه بر واکنش‌های پوزولانی، دوده سیلیسی به عنوان فیلر نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی خصوصیات بتن دارد. این ذرات در صورت واکنش ندادن نیز با توجه به سطح ویژه زیاد، محلی مناسب برای رشد محصولات هیدراتاسیون فراهم می‌کنند. مقایسه مقاومت الکتریکی، اختلاف شدید بین ملات‌های سیمانی عمل‌آوری شده در محیط‌های مختلف را به خوبی نشان می‌دهد. عدم پایداری کلسیم هیدروکسید در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب نمک باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. ولی پارامتر مهم‌تر و تأثیرگذارتر روی مقاومت الکتریکی، نفوذ یون کلر موجود در نمک به داخل حفرات خمیر سیمانی است. نفوذ این یون خورنده به شدت خصوصیات دوام نمونه‌های سیمانی، از جمله مقاومت الکتریکی، را کاهش می‌دهد.

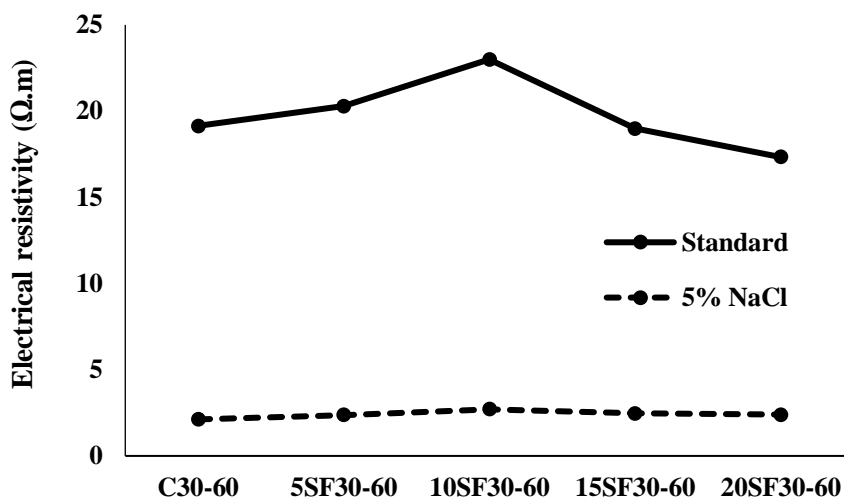
۳-۲. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک (استاندارد) و آب نمک، در سن ۳ روز، در شکل ۱۳ مقایسه شده‌اند. افزایش مقاومت الکتریکی با افزودن دوده سیلیسی کاملاً مشهود است. کاهش نفوذپذیری خمیر سیمانی در اثر جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی، از مهم‌ترین ویژگی‌های خمیرهای سیمانی حاوی دوده سیلیسی است. ولی با افزایش درصد دوده سیلیسی به بیش از ۱۰٪ کاهش قابل توجهی در مقاومت ملاحظه می‌شود. با افزایش تراکم خمیر سیمانی و کاهش تخلخل نمونه در اثر تشکیل کلسیم سیلیکات ثانویه، فاز عایق خمیر سیمانی بر فاز رسانای الکترولیتی نمونه‌های بتن غالب شده و در نتیجه مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. از طرفی، افزایش بیش از حد دوده سیلیسی و عدم توزیع مناسب آنها با توجه به ریزی این ذرات، جمع‌شدگی آنها را نتیجه می‌دهد که مقدار قابل توجهی حفرات موئینه در اطراف این ذرات تشکیل می‌شود. نهایتاً این پدیده منجر

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها



(الف)



(ب)

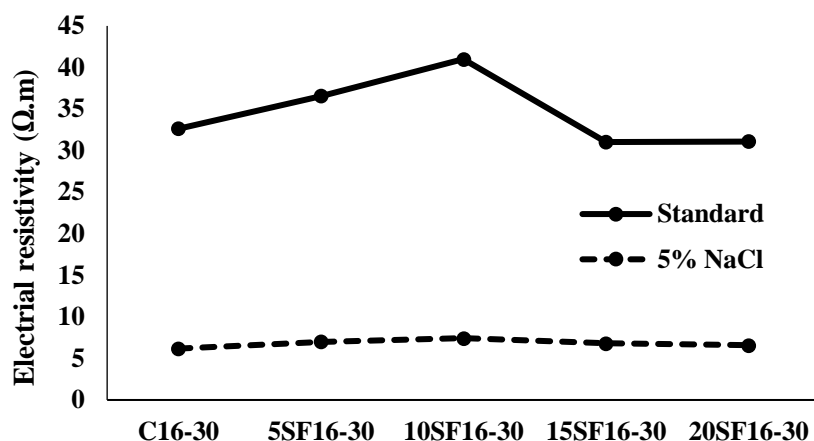
شکل ۱۳. مقاومت الکتریکی نمونه‌های با عمل‌آوری مختلف در سن ۳ روز، حاوی: الف) سنگدانه ۱۶-۳۰ و ب) سنگدانه ۳۰-

۶۰

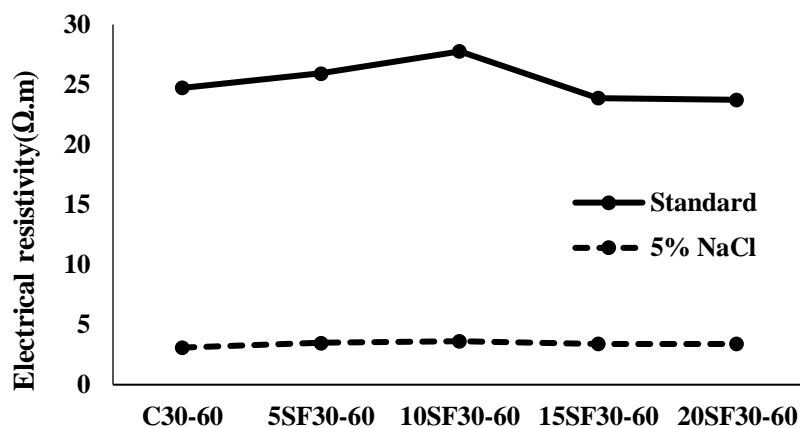
الکتریکی نمونه‌های آب نمک تغییر چندانی نداشته است. نفوذ یون کلر به داخل نمونه با توجه به حفرات زیاد نمونه به شدت خصوصیات الکتریکی بتن نفوذپذیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

شکل ۱۴، مقاومت الکتریکی نمونه‌های با عمل‌آوری مختلف را در سن ۷ روز مقایسه می‌کند. در حالی که نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک افزایش مقاومت الکتریکی را نسبت به سن ۳ روز نشان داده‌اند، مقاومت

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها



(الف)



(ب)

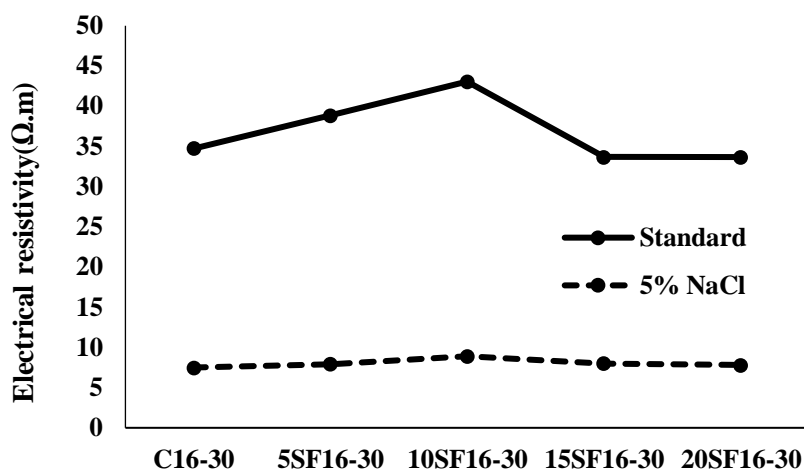
شکل ۱۴. مقاومت الکتریکی نمونه‌های با عمل‌آوری مختلف در سن ۷ روز، حاوی: الف) سنگدانه ۱۶-۳۰ و ب) سنگدانه ۳۰-۶۰

۶۰

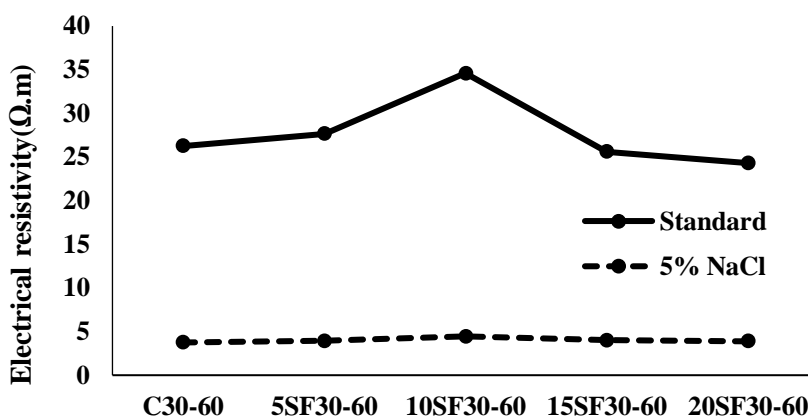
عمل‌آوری مختلف را در سن ۹۰ روز نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در تمامی نمودارهای مربوط به مقاومت الکتریکی، بیشتر بودن مقاومت نمونه‌های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ نسبت به نمونه‌های حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ است. به نظر می‌رسد توزیع بهتر خمیر در اطراف سنگدانه‌ها و ساختار یکنواخت‌تر این نمونه‌ها خصوصیات بهتر دوام را نیز نتیجه می‌دهد.

مقاومت الکتریکی نمونه‌های با عمل‌آوری مختلف در سن ۲۸ روز در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به حفرات سطحی کامپوزیت‌های نفوذپذیر، یون کلر به راحتی به داخل نمونه نفوذ کرده و در نتیجه در هنگام برقراری یک جریان الکتریکی خارجی به راحتی اجازه عبور بار الکتریکی را از داخل نمونه می‌دهد. این پدیده موجب اختلاف قابل ملاحظه ایجاد شده در نتایج شده است. شکل ۱۶ نیز مقاومت الکتریکی نمونه‌های با

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. مقاومت الکتریکی نمونه‌های با عمل‌آوری مختلف در سن ۲۸ روز، حاوی: الف) سنگدانه ۱۶-۳۰ و ب) سنگدانه

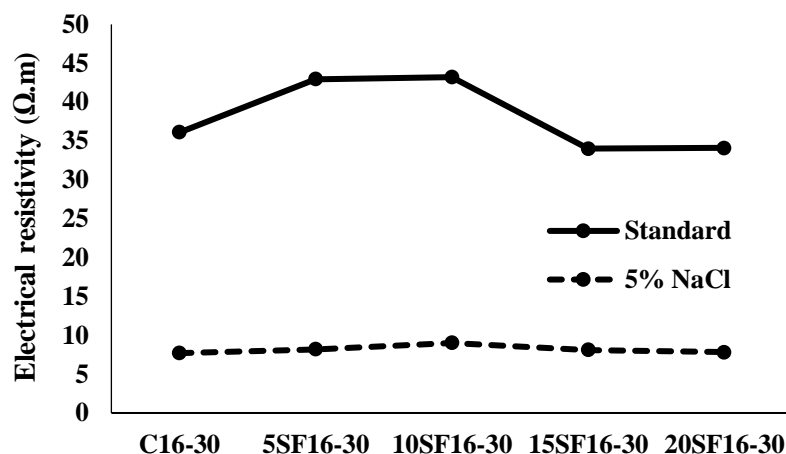
۳۰-۶۰

شکل ۱۸، رابطه بین مقاومت فشاری و الکتریکی را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. نسبت به سنین کمتر، ضریب همبستگی بین نتایج کاهش پیدا کرده است. ولی همچنان با تقریب خوبی می‌توان گفت که رابطه خطی بین نتایج برقرار است. با توجه به افزایش شیب خطوط برازش نسبت به سنین کمتر می‌توان گفت که تغییرات مقاومت الکتریکی در سنین بیشتر افزایش یافته و تفاوت نرخ افزایش بین مقاومت فشاری و الکتریکی کاهش ضریب همبستگی را در پی داشته است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضرایب برازش به‌دست آمده برای نمونه‌های با سنگدانه ریزتر، بیشتر بوده است. این امر

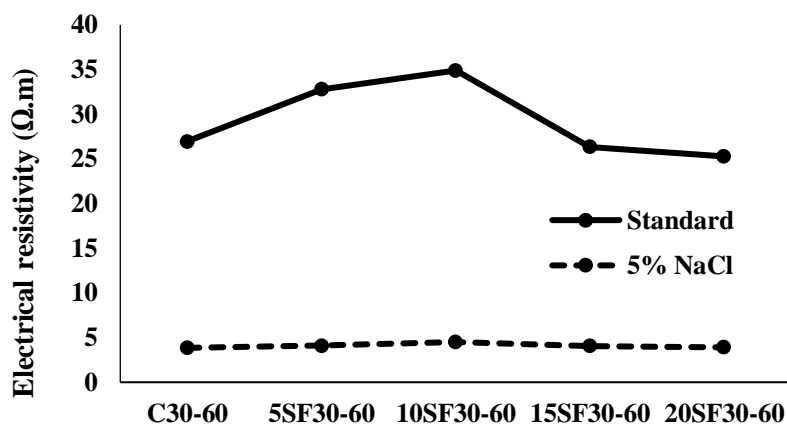
۳-۳. تعیین رابطه تجربی بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی

رابطه تجربی بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۳ و ۷ روز در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۷-الف، ضریب همبستگی قوی در رابطه خطی برای نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های مختلف دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در ملات‌های سیمانی نفوذپذیر، رابطه خطی خوبی بین نتایج مکانیکی و دوام برقرار است. شکل ۱۷-ب نیز رابطه خطی قوی را بین نتایج نشان می‌دهد. البته شیب خط برای نمونه‌های سنگدانه ۳۰-۶۰ کم شده است.

نشان می دهد که با افزایش سطح ویژه ذرات، رابطه قوی- تری بین مقاومت الکتریکی و فشاری در بتن نفوذپذیر برقرار می شود و با افزایش سن، این رابطه تقویت می شود. اما، برای نمونه های با سنگدانه درشت تر، عکس این امر صادق است.



(الف)



(ب)

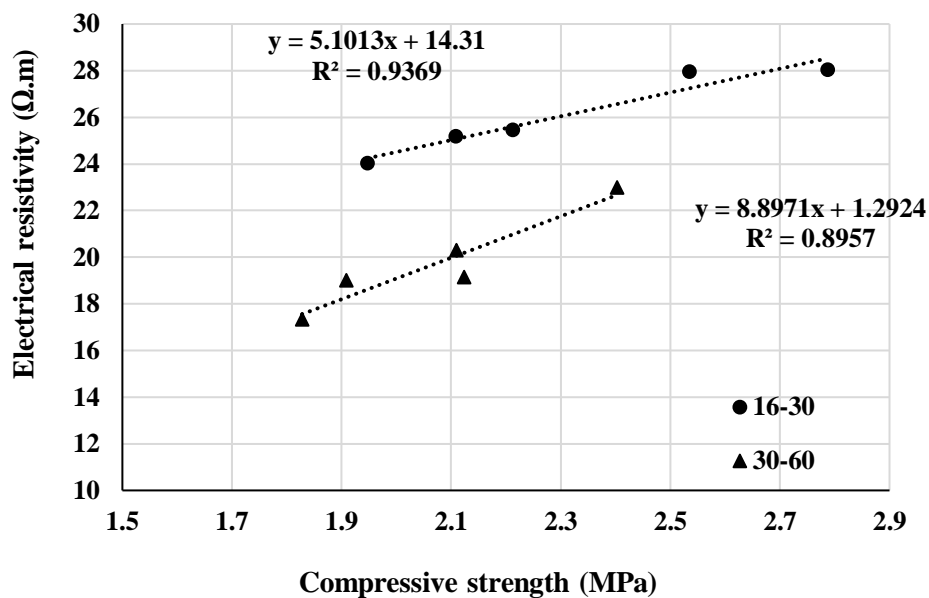
شکل ۱۶. مقاومت الکتریکی نمونه های با عمل آوری مختلف در سن ۹۰ روز، حاوی: الف) سنگدانه ۱۶-۳۰ و ب) سنگدانه ۳۰-۶۰

۳-۴. نتایج آزمون نفوذپذیری

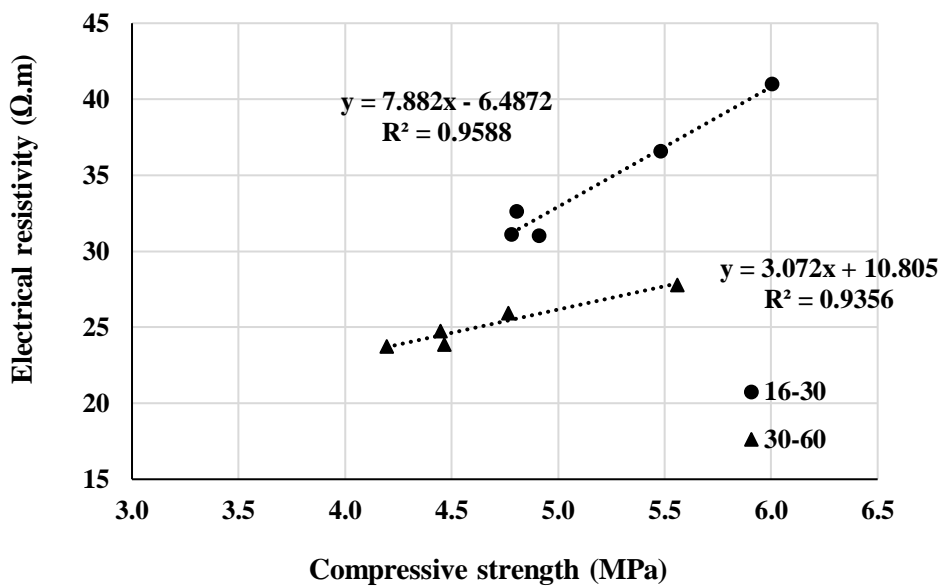
ریزتر نیز می توان نفوذپذیری قابل قبولی را از کامپوزیت- های نفوذپذیر انتظار داشت. علاوه بر این، در نمودارهای قبل، مقاومت های مکانیکی بهتر این کامپوزیت ها نسبت به بتن های نفوذپذیر کاملاً مشهود بود. به نظر می رسد استفاده از ملات های نفوذپذیر در سازه هایی که نیاز به مقاومت های مکانیکی بیشتر در آنها حس می شود، جایگزین مناسبی برای بتن نفوذپذیر باشد.

ضریب نفوذپذیری برای نمونه های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ در شکل ۱۹ نشان داده شده است. تمامی نمونه ها ضریب نفوذپذیری حدود ۱ میلی متر بر ثانیه را نشان داده- اند. این مقدار در بازه تعیین شده برای بتن های نفوذپذیر قرار دارد و نشان می دهد که با استفاده از سنگدانه های

تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها

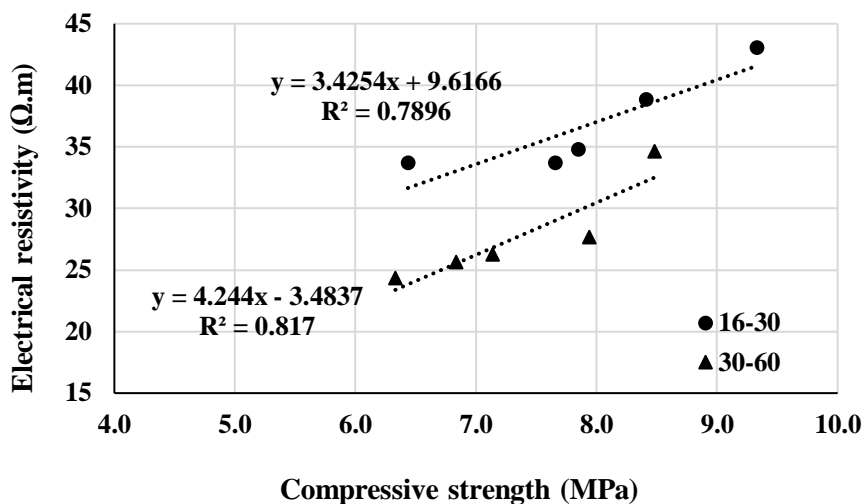


(الف)

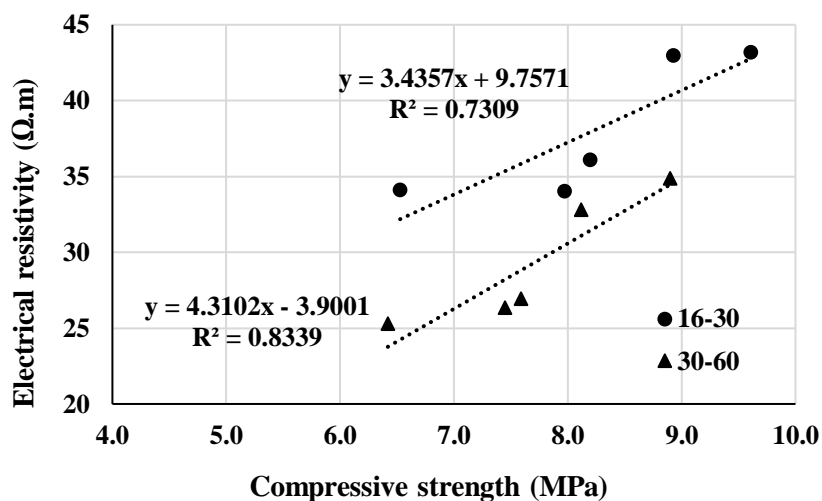


(ب)

شکل ۱۷. رابطه تجربی بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۳ روز (الف) و ۷ روز (ب)

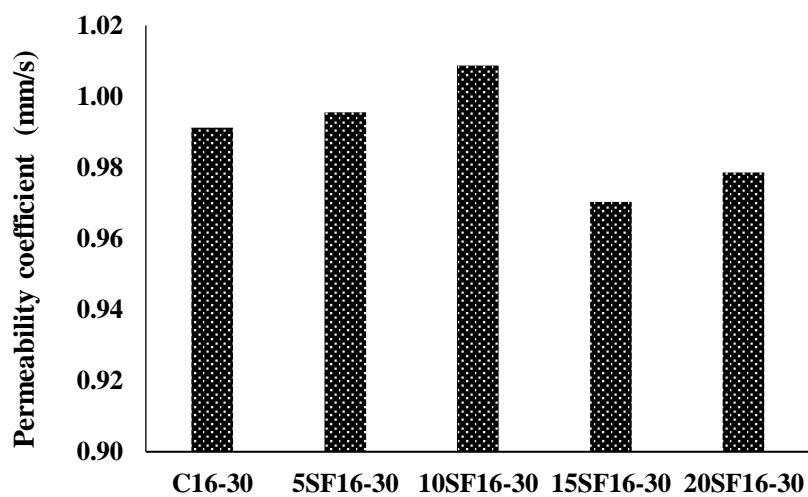


(الف)



(ب)

شکل ۱۸. رابطه تجربی بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ روز (الف) و ۹۰ روز (ب)



شکل ۱۹. ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰

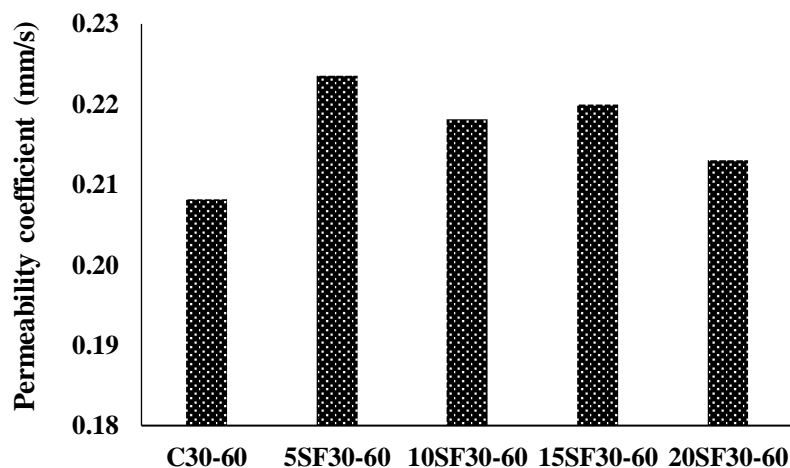
تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها

میلی‌متر بر ثانیه است، این ملات‌ها ضریب قابل قبولی برای نفوذپذیری ارائه ندادند و با توجه به این نتایج می‌توان حد پایینی برای اندازه ذرات ماسه در ملات‌های نفوذپذیر در نظر گرفت.

در مقایسه با نتایج به دست آمده در تحقیقات دیگر محققان می‌توان گفت که نتایج به دست آمده در مقاومت فشاری از میانگین مقاومت فشاری بتن نفوذپذیر ثبت شده در مطالعات پیشین بیشتر بوده است. به عنوان مثال، در تحقیق ابراهیم و همکاران (۲۰۱۴)، مقاومت فشاری بین ۲ تا ۶ مگاپاسکال برای بتن نفوذپذیر ثبت شد. در تحقیق کو و همکاران (۲۰۱۳)، تنها زمانی مقاومت فشاری بیشتر از ۱۰ مگاپاسکال به ثبت رسید که بیش از ۸۰٪ حفرات به هم پیوسته بتن اشغال شده و در نتیجه نفوذپذیری به شدت کاسته شده بود. در حالی که در این پژوهش، با به کار بردن ریزدانه، ساخت ملات نفوذپذیر، دستیابی به ضریب نفوذپذیری مناسب و استفاده از دوده سیلیسی، مقاومت فشاری حدود ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد.

افزودن دوده سیلیسی تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج پدید نیاورده است. با توجه به اینکه افزودن دوده سیلیسی موجب تغییر در ساختار حفره‌ای خمیر سیمانی می‌شود و خود خمیر سیمانی به تنهایی تأثیر چندانی روی نفوذپذیری کامپوزیت‌های متخلخل ندارد، تغییر محسوسی در نتایج دیده نمی‌شود. در واقع، فاکتور اصلی تأثیرگذار روی نفوذپذیری این کامپوزیت‌ها وجود حفرات به هم پیوسته در ساختار نمونه و تعداد مسیرهای عبور آب از داخل نمونه است که هیچ کدام از این پارامترها تحت تأثیر طرح اختلاط خمیر سیمانی قرار ندارند.

در نهایت، شکل ۲۰، ضریب نفوذپذیری را برای نمونه‌های حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰ نشان می‌دهد. در مقایسه با نمونه‌های حاوی سنگدانه درشت‌تر، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش پیدا کرده است. استفاده از سنگدانه ریزتر موجب بسته شدن تعداد زیادی از مسیرهای عبور آب از داخل نمونه می‌شود. با توجه به اینکه ضریب نفوذپذیری این نمونه‌ها کمتر از ۰/۵



شکل ۲۰. ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های حاوی سنگدانه ۳۰-۶۰

ضرایب نفوذپذیری بین ۰/۱ تا ۰/۲ سانتی‌متر بر ثانیه برای بتن نفوذپذیر ثبت شده است (دئو، ۲۰۱۱؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ چاندراپا و بیلجیری، ۲۰۱۶). با توجه به تحقیقات

در مورد نفوذپذیری بتن متخلخل، تحقیقات مختلفی انجام شده و بازه به دست آمده برای ضریب نفوذپذیری نیز متفاوت بوده است. در مجموع می‌توان گفت که

و مقاومت بیشتری را نشان دادند. پخش بهتر و یکنواخت تر خمیر دور سنگدانه‌ها را می‌توان عامل اصلی این برتری دانست.

- افزودن دوده سیلیسی، همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش مقاومت الکتریکی را در پی‌داشت. البته با افزایش بیش از حد دوده (بیش از ۱۰٪) مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نیز کاهش یافت.

- عمل‌آوری نمونه‌ها در آب نمک، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را به شدت کاهش داد. به طوری که حتی بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری، نمونه‌ها به ندرت بیش از ۱۰ اهم-متر مقاومت را از خود نشان دادند.

- رابطه خطی با ضریب همبستگی بالایی برای نمونه‌ها در سنین مختلف به‌دست آمد. این امر نشان می‌دهد که می‌توان در ملات‌های سیمانی نفوذپذیر، با استفاده از آزمایش مقاومت الکتریکی که آزمایش غیرمخرب است، مقاومت فشاری نمونه‌ها را با دقت خوبی تخمین زد.

انجام شده و بازه به‌دست آمده برای ضریب نفوذپذیری می‌توان گفت که نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با علم به اینکه نمونه‌های ساخته شده ملات بوده‌اند، قابل قبول است. همچنین، با توجه به مقاومت مکانیکی قابل قبول می‌توان گفت که ملات‌های نفوذپذیر ساخته شده می‌توانند کاربردهای وسیعی در صنعت ساخت و ساز داشته باشند.

۴. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، تخمین رابطه تجربی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی رویه‌های بتنی نفوذپذیر جهت کاربرد در زهکشی راه‌ها و عرشه پل‌ها بوده است. مهمترین نتایج تحقیق حاضر به قرار زیر است:

- در آزمون مقاومت فشاری، مشخص شد که نمونه‌های حاوی سنگدانه ۱۶-۳۰ در تمامی سنین عملکرد بهتری از نمونه‌های با سنگدانه ریزتر داشتند.

- افزودن دوده سیلیسی تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها داشت. مقاومت فشاری در نمونه‌های با ۱۰٪ جایگزینی دوده سیلیسی به حداکثر مقدار خود رسید. اما با افزایش بیشتر درصد دوده سیلیسی، کاهش مقاومت فشاری دیده شد.

- نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب نمک، در تمامی سنین، مقاومت فشاری کمتری از نمونه‌های عمل‌آوری استاندارد نشان دادند. تجزیه کلسیم هیدروکسید موجود در خمیر سیمانی و تضعیف خمیر سیمانی از این طریق را می‌توان دلیل اصلی این کاهش نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک دانست.

- در آزمایش مقاومت الکتریکی، نمونه‌های حاوی سنگدانه درشت‌تر عملکرد بهتری داشته

۵. مراجع

- AASHTO TP95. 2014. "Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Concrete Institute. 2013. Concrete Technology. ACI CT-13, 78.
- ASTM C109. 2016. "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)". ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Chandrappa, A. K. and Biligiri, K. P. 2016. "Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review". *Constr. Build. Mater.*, 111: 262-274.
- Chen, Y., Zhang, Q. S. and Gao, Y. L. 2010. "Experiment on mechanical performances of porous cement concrete applied to surface layer of highway pavement". *China J. Highway Transport*, 23(2): 18-24.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V. and Netinger, I. 2015. "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete". *Constr. Build. Mater.*, 78: 69-76.
- Deo, O., 2011. "Influence of material structure on the structural and environmental properties of pervious concretes". Doctoral Dissertation, Clarkson University.
- Deo, O. and Neithalath, N. 2011. "Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities". *Constr. Build. Mater.*, 25(11): 4181-4189.
- Haselbach, L., Boyer, M., Keven, J. T. and Schaefer, V. R. 2011. "Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems". *Transport. Res. Record*, 2240(1): 107-115.
- Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M. and Patibandla, V. C. 2014. "Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties". *Constr. Build. Mater.*, 50: 524-529.
- Keven, J. T., Biddle, D. and Cao, Q. 2015. "Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties". *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(9): 06014031.
- Kuo, W. T., Liu, C. C. and Su, D. S. 2013. "Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement Concrete Comp.* 37: 328-335.
- Li, H., Kayhanian, M. and Harvey, J. T. 2013. "Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods". *J. Environ. Manag.*, 118: 144-152.
- Millard, S. and Sadowski, L. 2009. "Novel method for linear polarisation resistance corrosion measurement". *NDTCE'09 Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th-July 3rd*.
- Neithalath, N., Weiss, J. and Olek, J. 2006. "Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance". *Cement Concrete Res.*, 36(11): 2074-2085.
- Olek, J., Weiss, W. J., Neithalath, N., Marolf, A., Sell, E. and Thornton, W. 2003. "Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials". No. SQDH 2003-5, Purdue University.
- Sengul, O. and Gjør, O. E. 2008. "Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction". *ACI Mater. J.*, 105(6): 541.
- Tennis, P. D., Leming, M. L. and Akers, D. J. 2004. "Pervious concrete pavements (No. PCA Serial No. 2828)". Portland Cement Association, Skokie, IL.
- Tumidajski, P. J. 1996. "Electrical conductivity of Portland cement mortars". *Cement Concrete Res.*, 26(4): 529-534.
- Wen, S. and Chung, D. D. L. 2001a. "Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement". *Cement Concrete Res.*, 31(1): 141-147.
- Wen, S. and Chung, D. D. L. 2001b. "Effect of stress on the electric polarization in cement". *Cement Concrete Res.*, 31(2): 291-295.
- Wen, S. and Chung, D. D. L. 2006. "The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber-reinforced cement". *Carbon*, 44(11): 2130-2138.
- Xu, L. and Qun, Y. 2013. "Impact analysis of porous concrete overlay timing on tunnel pavement". *J. East China Jiaotong Univ.*