

Investigating the Relationship Between Bulk and Surface Electrical Resistivity in Concrete Containing Microsilica

Ahmad Salehi¹, Ehsan Jahani^{2*}, Mohammad Rezanejad³

1- Master's Degree, Civil Engineering Department, Technology and Engineering Faculty, Mazandaran University, Babolsar, Iran

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Technology and Engineering Faculty, Mazandaran University, Babolsar, Iran

3- Associate Professor, Electrical Engineering Department, Technology and Engineering Faculty, Mazandaran University, Babolsar, Iran

ABSTRACT

This paper investigates the effects of microsilica as a partial replacement for cement on the compressive strength, electrical resistance, and durability of concrete. Concrete specimens were prepared with varying percentages of microsilica (0 to 30% by cement weight) and a constant water-to-cement ratio (0.48). The specimens were tested for various mechanical and electrical properties. The results indicated that adding up to 15% microsilica significantly increased compressive strength (maximum value of 588.64 kg/cm² at 120 days) and improved the matrix structure of the concrete. However, microsilica content beyond 15% resulted in reduced compressive strength due to decreased hydrated cement content and increased non-reactive materials. Additionally, bulk and surface electrical resistivity increased significantly up to 20% microsilica replacement, indicating reduced permeability and enhanced resistance to corrosive agents. Microsilica transforms calcium hydroxide into calcium silicate hydrate (CSH) gel, reducing porosity, improving the matrix density, and increasing the durability of concrete against the penetration of chloride ions and other harmful chemical agents. A linear and significant correlation ($R^2 > 0.99$) was observed between bulk and surface electrical resistivity. These findings suggest that electrical resistivity can be used as a quick and non-destructive method for assessing concrete quality, particularly for microsilica-containing concretes in harsh environmental conditions such as coastal and industrial.

ARTICLE INFO

Receive Date: 2 May 2025

Revise Date: 12 June 2025

Accept Date: 16 July 2025

Keywords:

Concrete Durability

Cement

Microsilica

Permeability

Electrical Resistivity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.495744.3610

*Corresponding author: Ehsan Jahani.

Email address: e.jahani@umz.ac.ir

بررسی رابطه بین مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی بتن حاوی میکروسیلیس

احمد صالحی^۱، احسان جهانی^{۲*}، محمد رضائزاد^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

این مقاله تأثیر میکروسیلیس به عنوان جایگزین جزئی سیمان بر مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و دوام بتن را بررسی کرده است. نمونه‌ها با درصدهای مختلف میکروسیلیس (۰ تا ۳۰ درصد وزنی سیمان) و نسبت ثابت آب به سیمان (۰/۴۸) ساخته شدند و تحت آزمایش‌های مختلف مکانیکی و الکتریکی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که افزودن میکروسیلیس تا ۱۵ درصد موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری (بیشینه مقدار ۵۸۸/۶۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در سن ۱۲۰ روز) و بهبود ساختار ماتریس بتن می‌شود. با افزایش درصد میکروسیلیس به بیش از ۱۵ درصد، کاهش مقاومت فشاری به دلیل کاهش میزان سیمان هیدراته‌شده و افزایش مواد غیرواکنشی مشاهده شد. همچنین، مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی بتن با افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد به‌طور چشمگیری افزایش یافت، که نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر عوامل خوردنده است. میکروسیلیس با تبدیل هیدروکسید کلسیم به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH)، باعث کاهش تخلخل، بهبود چگالی ماتریس بتن و افزایش دوام بتن در برابر نفوذ یون‌های کلرید و سایر عوامل شیمیایی مخرب شد. این مطالعه رابطه خطی و معناداری بین مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی بتن ($R^2 > 0/99$) را نشان داد و استفاده از مقاومت الکتریکی را به عنوان یک روش سریع و غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت بتن پیشنهاد کرد. یافته‌ها کاربرد بالقوه بتن‌های حاوی میکروسیلیس در سازه‌های تحت شرایط محیطی سخت، نظیر مناطق ساحلی و صنعتی، را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: دوام بتن، سیمان، میکروسیلیس، نفوذ پذیری، مقاومت الکتریکی بتن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/jsce.2025.495744.3610	doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.495744.3610		۱۴۰۴/۰۷/۳۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۵	۱۴۰۴/۰۴/۲۵	۱۴۰۴/۰۳/۲۲	۱۴۰۴/۰۲/۱۳
احسان جهانی					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	
e.jahani@umz.ac.ir						

۱- مقدمه

امروزه مقاومت الکتریکی بتن به عنوان شاخصی غیرمخرب برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی و مقاومت در برابر نفوذ یون‌های مخرب (مانند یون کلر) مورد توجه است [۱ و ۲]. تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که افزودن مواد پوزولانی نظیر میکروسیلیس به بتن، با کاهش حجم منافذ و افزایش تولید ژل سیلیکات-کلسیم (C-S-H) در ریزساختار، مقاومت الکتریکی بتن را به طور چشمگیری افزایش داده و فرایند خوردگی آرماتور را کند می‌کند. به بیان دیگر، در حضور میکروسیلیس بتن متراکم‌تر شده و مقاومت حجمی (مقاومت واقعی الکتریکی در سراسر حجم نمونه) آن به مقدار بیشتری می‌رسد که این امر ارتباط مستقیمی با دوام و طول عمر بتن دارد. این وضعیت لزوم ارزیابی دقیق مقاومت الکتریکی بتن‌های میکروسیلیسی را برجسته می‌کند.

روش‌های استاندارد مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد. آزمون مقاومت سطحی با چهار پروب (استاندارد AASHTO T358) از مزیت سادگی و سرعت بالا برخوردار است، در حالی که مقاومت حجمی (استاندارد ASTM C1760) معرف مستقیم‌تری از رفتار الکتریکی تمام مقطع بتن است [۳ و ۴]. مطالعات میدانی نشان داده است که اندازه‌گیری مقاومت سطحی اغلب نتایج محافظه‌کارانه‌ای در تطابق با نفوذپذیری بتن ارائه می‌کند، در حالی که نتایج مقاومت حجمی گاهی به طور غیرمحافظه‌کارانه‌تری عمل می‌کند [۳]. از طرف دیگر، پژوهش‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که بین مقاومت سطحی و مقاومت حجمی بتن رابطه‌ای تقریباً خطی برقرار است. برای نمونه، در مطالعه لی و ژائو ضریب تعیین خطی بین این دو کمیت در انواع مخلوط‌های بتن (از جمله مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس) همواره بالاتر از ۰/۸ گزارش شده است که نشان می‌دهد روند تغییرات مقاومت‌ها با زمان مشابه است [۴]. همچنین نسبت هندسی میانگین مقاومت سطحی به مقاومت حجمی در این مطالعات در محدوده ۲/۲۵ تا ۲/۶۶ قرار داشته و با مقدار نظری حدود ۲/۶۳ همخوانی دارد [۴].

با وجود دستاوردهای فوق، شکاف مهمی در مطالعات موجود مشاهده می‌شود. بسیاری از تحقیقات پیشین یا بر مجموعه‌ای محدود از مخلوط‌های بتن (معمولاً چند طرح سه‌تایی) تمرکز داشته‌اند و دامنه درصد‌های جایگزینی میکروسیلیس و هندسه نمونه‌ها را به طور گسترده بررسی نکرده‌اند. برای مثال، لی و ژائو نشان داده‌اند که در برخی مخلوط‌های بتن با میکروسیلیس، به ویژه در سنین اولیه (مانند ۷ روز)، ضریب همبستگی بین مقاومت سطحی و حجمی کاهش می‌یابد [۲ و ۴]. از سوی دیگر، گوش و همکاران نیز خاطرنشان کرده‌اند که مطالعات گذشته معمولاً بر مخلوط‌های محدودی محدود بوده و تنوع درصد‌های SCM را پوشش نداده‌اند [۲]. این امر نشان می‌دهد که هنوز به طور سیستماتیک رابطه‌ی بین مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی در بتن‌های غنی‌شده با میکروسیلیس، در شرایط مختلف (سن هیدراسیون، ابعاد و شکل نمونه‌ها، درصد‌های متفاوت میکروسیلیس) تحقیق نشده است.

در این پژوهش سعی شده است خلأهای فوق پوشش داده شود. بررسی حاضر با طراحی جامع آزمایش‌ها، چندین نسبت جایگزینی سیمان با میکروسیلیس (۱/۲۵ الی ۳۰ درصد) را مدنظر قرار داده و مقاومت حجمی را در شش سن مختلف از جمله ۷ تا ۱۲۰ روز و مقاومت سطحی را در سنین بالا (۹۰ و ۱۲۰ روز) اندازه‌گیری کرده است. نمونه‌ها در شکل‌ها و ابعاد گوناگون (از جمله استوانه‌ها و مکعب‌های استاندارد با اندازه‌های متفاوت) تهیه شده‌اند تا اثر هندسه بر نتایج بررسی شود. به علاوه، تعداد تکرار بالا برای هر ترکیب و شرایط آزمون لحاظ شده است تا دقت آماری نتایج افزایش یابد. در تحلیل داده‌ها نیز با استفاده از روش‌های آماری مناسب ضریب همبستگی بین مقاومت‌ها تعیین شده و رابطه‌های تجربی استخراج می‌شوند. این ویژگی‌ها نوآوری پژوهش را تشکیل می‌دهد و آن را از مطالعات قبلی متمایز می‌کند.

۱-۱- مقاومت الکتریکی بتن

اندازه گیری خصوصیات انتقالی بتن، به ویژه مقاومت آن در برابر نفوذ سیال و یون، نقش مهمی در درک عملکرد بلند مدت بتن و دوام آن دارد. آزمایش های الکتریکی به طور گسترده برای اندازه گیری خواص الکتریکی بتن (مانند مقاومت و رسانایی)، به عنوان روش های غیرمستقیم سریع و غیرمخرب برای تعیین کمیت خواص انتقال بتن استفاده می شود [۵-۸]. اندازه گیری های ساده و سریع، چندین آزمایش الکتریکی برای تعیین خواص الکتریکی بتن توسعه یافته و استاندارد شده اند. از جمله روش آزمایش ASTM C1202 برای نشان دادن توانایی مقاومت الکتریکی بتن در برابر نفوذ یون کلرید (معروف به آزمایش نفوذپذیری سریع کلرید (RCPT))، آزمایش مقاومت سطحی بتن T 358 AASHTO و آزمون مقاومت حجمی بتن ASTM C1876 می توان نام برد [۹-۱۲]. آزمون مقاومت الکتریکی توده ای یا حجمی بتن، که به عنوان آزمون مقاومت تک محوری نیز شناخته می شود، ابتدا به عنوان AASHTO TP119 توسط مقامات انجمن ایالتی و حمل و نقل بزرگراهی آمریکا در سال ۲۰۱۵ استاندارد شد و بعداً به عنوان ASTM C1876 توسط انجمن آزمایش و مواد آمریکا و CSA A23.2-26C توسط انجمن استانداردهای کانادا در سال ۲۰۱۹ تحت عنوان "توده ای یا حجمی" استفاده شد. زیرا جریان اعمال شده از تمام فازهای بتن اشباع، از جمله چسب سیمان، سنگدانه ها و منافذ عبور می کند [۱۳، ۱۴]. در اندازه گیری مقاومت الکتریکی حجمی به طور معمول، دو صفحه الکترود بر روی هر دو سطح انتهایی نمونه بتن با محیط رسانا، مانند اسفنج اشباع، یا ژل رسانا قرار می گیرند [۱۵]. یک ولتاژ ۶۰ ولتی با جریان متناوب و فرکانس ۵۰ هرتزی در سطح مقطع نمونه بین دو الکترود (صفحه مسی) اعمال می شود، جریان عبوری از شبکه منفذی داخل نمونه بتن اندازه گیری می شود. مقاومت به عنوان نسبت افت ولتاژ به جریان اندازه گیری شده محاسبه می شود و مقاومت بر اساس شکل و اندازه نمونه محاسبه می شود. ولتاژ نیز بدین دلیل متناوب اعمال می شود که سیگنال AC می تواند اثر قطبی یا پلاریزاسیون الکتریکی را از بین ببرد [۱۶]. تحقیقات نشان می دهد که یک همبستگی قوی بین مقاومت حجمی و مقادیر کولن ASTM C1202 وجود دارد [۱۷-۲۰]، همانطور که در طبقه بندی نفوذپذیری یون کلرید مطابق با مقادیر شارژ ASTM C1202 و مقادیر مقاومت حجمی، که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: طبقه بندی نفوذپذیری یون کلرید (Obla and Lobo-2021)

نقوذ پذیری یون کلرید	مقاومت الکتریکی حجمی (اهم-متر)	شارعبوری (کولمب)
زیاد	<۵۰	>۴۰۰۰
متوسط	۵۰-۱۰۰	۲۰۰۰-۴۰۰۰
کم	۱۰۰-۲۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰
خیلی کم	۲۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰
ناچیز	>۲۰۰۰	<۱۰۰

مقاومت الکتریکی با ضرب مقاومت در ضریب هندسی، همانطور که در رابطه (۱) نشان داده شده است، محاسبه می شود.

$$\rho = R \times k \quad (1)$$

که در آن، R مقاومت الکتریکی نمونه می باشد که از تقسیم ولتاژ دو سر نمونه بر جریان عبوری از نمونه محاسبه می گردد، که در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

در آزمایش مقاومت الکتریکی حجمی، k ضریب هندسی نسبت سطح مقطع بتن به طول نمونه های بتنی است (ASTM C1876، ۲۰۱۹)، که در رابطه (۳) نشان داده شده است. که A سطح مقطع نمونه و L طول نمونه می باشد.

$$k = \frac{A}{L} \quad (3)$$

همچنین ضریب هندسی k برای مقاومت الکتریکی سطحی طبق AASHTO T 358 در رابطه (۴) نشان داده شده است. در اینجا a فاصله بین پروب ها در مقاومت الکتریکی سطحی می باشد.

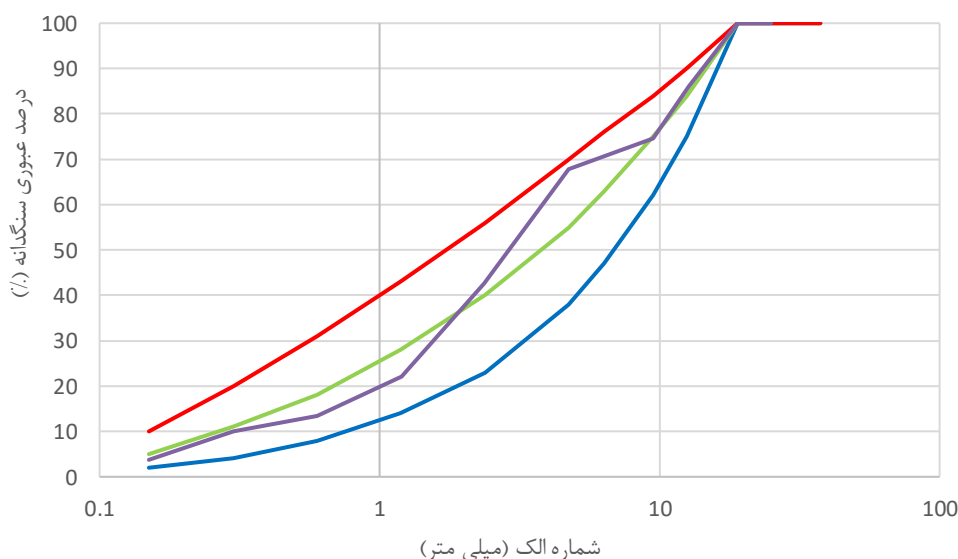
$$k = 2\pi \times a \quad (4)$$

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۹ طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴۸ و مقادیر مختلف میکروسیلیس شامل ۰، ۱/۲۵، ۲/۵، ۳/۷۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ درصد جایگزین سیمان مورد بررسی قرار می گیرد. مشخصات مصالح مصرفی مورد استفاده در آزمایش به قرار زیر می باشد:

۲-۱- سنگدانه

سنگدانه بکار رفته در طرح اختلاط ها شامل ماسه شکسته با مدول نرمی ۴/۶۹ و شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر می باشد. وزن مخصوص شن و ماسه نیز به ترتیب برابر ۲/۷۱ و ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. منحنی دانه بندی ترکیبی بصورت نسبت ۲۹ درصد شن به ۷۱ درصد ماسه در شکل ۱ نشان داده شده است. که در اینجا منحنی های قرمز، سبز، آبی به ترتیب حد بالا، حد میانی و حد پائین روش ملی طرح اختلاط ایران و منحنی زرد نیز دانه بندی ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق می باشد.



شکل ۱: دانه بندی ترکیبی سنگدانه با نسبت شن به ماسه ۲۹ به ۷۱ درصد

۲-۲- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه نکا با چگالی ۳/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد استفاده شده است. مشخصات سیمان مورد استفاده در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۲: ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲

سیمان پرتلند نوع ۲	ترکیبات شیمیایی
۶۴/۷۹	اکسید کلسیم (%)
۱۹/۹۹	دی اکسید سیلیسیوم (%)
۱/۷۲	اکسید منیزیم (%)
۴/۹۵	اکسید آلومینیوم (%)
۳/۴۳	اکسید آهن (%)
۳/۱۲	تری اکسید گوگرد (%)
۰/۳۹	اکسید سدیم (%)
۰/۶۱	اکسید پتاسیم (%)
۰/۷	دی اکسید تیتانیوم (%)
-	اکسید منگنز (%)
-	پنتاکسید فسفر (%)
۰/۹۶	افت وزن در اثر سرخ شدن (%)

۲-۳- میکروسیلیس

میکروسیلیس به عنوان یکی از پرکاربردترین پوزولان های طبیعی در کشور می باشد. میکروسیلیس یا دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2) در بتن با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و حاصل این واکنش سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) می باشد، لذا با از بین رفتن هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن به ژل بتن (CSH) می شود و سبب بهبود مشخصات فیزیکی و دوامی بتن می گردد. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس نیز در جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده می باشد که طبق استاندارد ملی شماره ۱۳۲۷۸ و استاندارد ASTM C1240 است. در این تحقیق میزان بهبود مولفه های بتن به ازای درصد های مختلف جایگزینی میکروسیلیس به سیمان مورد بررسی قرار می گیرد [۲۱، ۲۲].

جدول ۳: خصوصیات شیمیایی میکروسیلیس

شاخص ASTM	میکروسیلیس	خصوصیات شیمیایی
حداقل ۸۵	۹۵	دی اکسید سیلیسیوم (%)
-	۲/۲	اکسید کلسیم (%)
-	۰/۶	اکسید منیزیم (%)
-	۰/۸	اکسید آلومینیوم (%)
-	۰/۶	اکسید آهن (%)
-	۰/۳	کربن (%)
حداکثر ۳	۱ >	رطوبت (%)
حداکثر ۶	۳ >	افت وزن در اثر سرخ شدن (%)

جدول ۴: خصوصیات فیزیکی میکروسیلیس

شاخص ASTM	میکروسیلیس	خصوصیات فیزیکی
-	خاکستری	رنگ
برحسب نیاز	۲/۲۶ (g/cm ³)	وزن مخصوص
حداقل ۱۵	۱۵ (m ² /g)	سطح مخصوص
-	آمورف	ساختار
حداقل ۱۰۵	۱۱۵-۱۱۰	شاخص فعالیت پوزولانی در ۷ روز (%)

۲-۴- روان کننده بتن

به منظور ایجاد کارایی مناسب در بتن از روان کننده های بتن استفاده می گردد. روان کننده های بتن براساس مواد تشکیل دهنده دارای انواع مختلفی می باشند. از جمله مواد تشکیل دهنده لیگنوسولفانات ها، پلی نفتالین ها، پلی کربوکسیلات ها و سایر مواد می باشد. در این تحقیق از روان کننده های پایه پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۰۹ g/cm³ استفاده شده است.

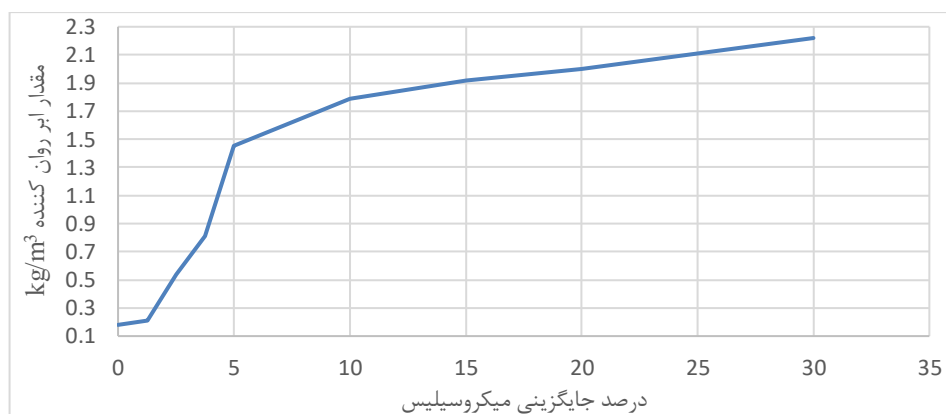
۲-۵- آب

آب مصرفی از آب شهری بابلسر و دارای PH بین ۶/۵ تا ۸/۵ می باشد که در محدوده ی مقادیر مجاز BS 8500-2 و ASTM C1602/C1602M قرار دارد [۲۳، ۲۴].

۲-۶- طرح مخلوط

در این تحقیق، طرح اختلاط بتن بر اساس روش ملی طرح مخلوط بتن ایران و با هدف دستیابی به مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال طراحی شده است [۲۵]. این روش ملی با هدف تأمین مقاومت و دوام مطلوب بتن، مجموعه ای از مراحل محاسباتی برای تعیین نسبت های اجزای تشکیل دهنده بتن ارائه می دهد و بر پایه اصول علمی و تجربی طراحی اختلاط تنظیم گردیده است. در فرآیند طراحی، نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm) برابر ۰/۴۸ انتخاب شد که مقدار ثابتی در تمام طرح ها بوده است. مقدار سیمان مصرفی برابر با ۴۳۷/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. هوای محبوس در بتن برای همه طرح ها ۱/۲ درصد فرض گردید و مقدار اسلامپ هدف برابر ۹±۱ سانتی متر مطابق با استاندارد ASTM C143 به عنوان معیار کنترل کارایی تعیین شد [۲۶]. همچنین در تمامی طرح ها از سیمان پرتلند تپ ۲ با چگالی ۳/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب، سنگدانه های طبیعی شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی متر و منحنی دانه بندی مطابق الزامات روش ملی (شکل ۱) استفاده شد. ابتدا طرح شاهد (فاقد میکروسیلیس) با همین مشخصات تهیه و آزمایش شد. سپس طرح های حاوی میکروسیلیس با درصدهای جایگزینی ۱۰، ۲۵ تا ۳۰ درصد وزنی سیمان ساخته شدند. میکروسیلیس به صورت جایگزین بخشی از سیمان وارد طرح گردید. با توجه به تأثیر ذرات بسیار ریز میکروسیلیس در کاهش روانی، برای حفظ اسلامپ هدف، از ابرروان کننده پایه پلی کربوکسیلات به صورت افزایشی استفاده شد. مقدار دقیق مصرف فوق روان کننده در هر طرح به صورت تجربی و مرحله ای تعیین شد، به گونه ای که اسلامپ نهایی در بازه ۸ تا ۱۰ سانتی متر باقی بماند.

درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس به همراه مقدار متناظر فوق روان کننده در جدول ۵ ارائه شده است. نحوه نام گذاری طرح ها به این صورت بوده است که، حرف ابتدائی نشان دهنده میکروسیلیس، عدد بعدی نشان دهنده درصد جایگزینی میکروسیلیس به جای سیمان می باشد. روند تغییر مقدار فوق روان کننده با افزایش درصد میکروسیلیس در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که در درصدهای بالاتر (۲۰٪ و ۳۰٪)، مصرف فوق روان کننده به حدود ۲ کیلوگرم بر مترمکعب رسید که به عنوان نقطه اشباع عملکرد روان ساز در نظر گرفته شد. با وجود این، در طرح های دارای درصد بالای میکروسیلیس، دستیابی به روانی هدف با چالش همراه بود.



شکل ۲: رابطه بین درصد میکروسیلیس و مقدار ابر روان کننده

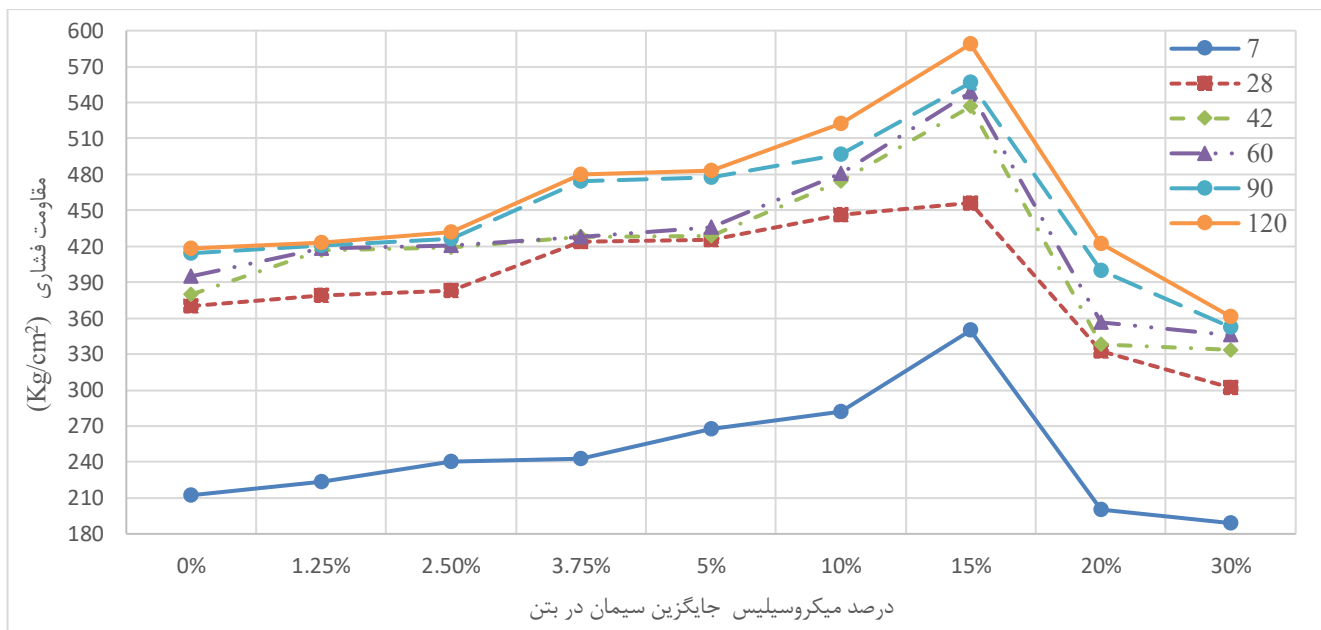
جدول ۵: طرح مخلوط بتن حاوی درصد های مختلف میکروسیلیس (جایگزینی با سیمان)

ردیف	نام طرح	نسبت آب به موادسیمانی	سیمان (Kg/m³)	آب (Kg/m³)	شن (Kg/m³)	ماسه (Kg/m³)	میکروسیلیس (Kg/m³)	ابر روان کننده (Kg/m³)
۱	M-0	۰/۴۸	۴۳۷/۱۵	۲۱۰/۲۱	۵۰۵/۹۵	۱۲۴۰/۳۵	۰	۰/۱۸
۲	M-1.25	۰/۴۸	۴۳۱/۶۹	۲۱۰/۲۱	۵۰۵/۴۱	۱۲۳۹/۰۳	۵/۴۶	۰/۲۱
۳	M-2.5	۰/۴۸	۴۲۶/۲۳	۲۱۰/۲۱	۵۰۴/۸۸	۱۲۳۷/۷۱	۱۰/۹۲	۰/۵۴
۴	M-3.75	۰/۴۸	۴۲۰/۷۶	۲۱۰/۲۱	۵۰۴/۳۴	۱۲۳۶/۴۰	۱۶/۳۹	۰/۸۱
۵	M-5	۰/۴۸	۴۱۵/۳۰	۲۱۰/۲۱	۵۰۳/۸۰	۱۲۳۵/۰۸	۲۱/۸۵	۱/۴۵
۶	M-10	۰/۴۸	۳۹۳/۴۴	۲۱۰/۲۱	۵۰۱/۶۵	۱۲۲۹/۸۱	۴۳/۷۱	۱/۷۹
۷	M-15	۰/۴۸	۳۷۱/۵۸	۲۱۰/۲۱	۴۹۹/۵۰	۱۲۲۴/۵۴	۶۵/۵۷	۱/۹۲
۸	M-20	۰/۴۸	۳۴۹/۷۲	۲۱۰/۲۱	۴۹۷/۳۵	۱۲۱۹/۲۷	۸۷/۴۳	۲
۹	M-30	۰/۴۸	۳۰۶/۰۱	۲۱۰/۲۱	۴۹۳/۰۵	۱۲۰۸/۷۳	۱۳۱/۱۴	۲/۲۲

۳- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- مقاومت فشاری

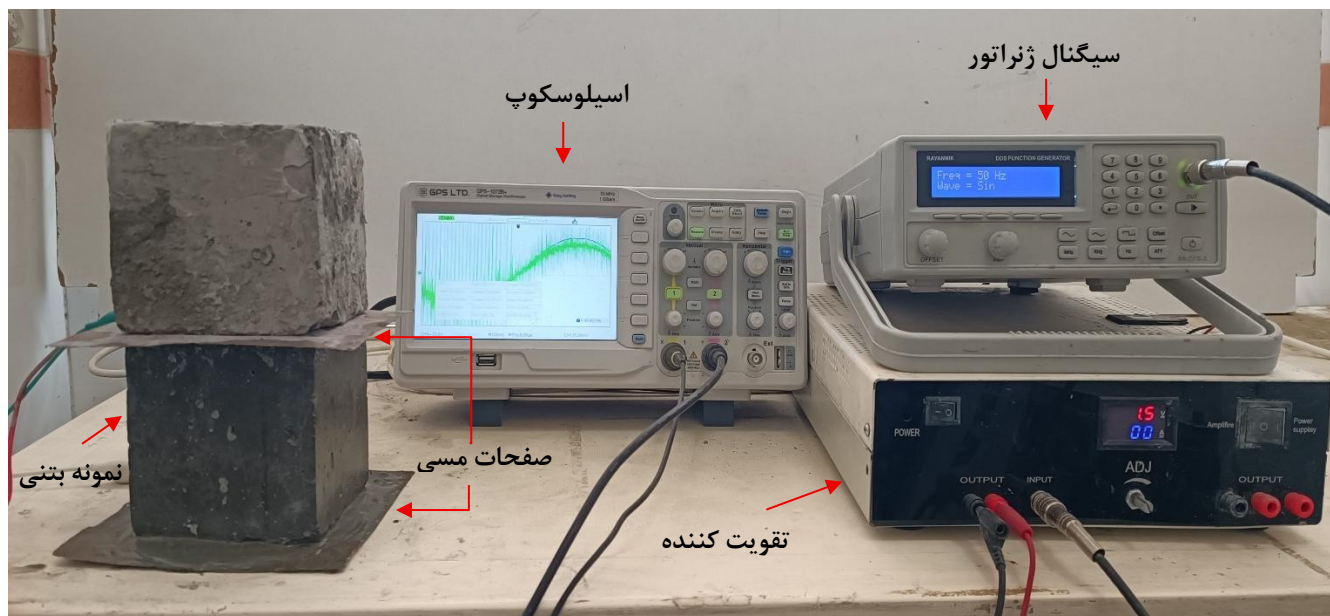
با توجه به شکل ۳ که نشان دهنده نمودار مقاومت فشاری در سنین و درصد های مختلف جایگزینی میکروسیلیس با سیمان می باشد، با افزایش درصد جایگزینی تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری افزایش می یابد اما بیش از آن باعث کاهش مقاومت می گردد. این مقاومت در سنین ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ روز در ۱۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان به ترتیب ۳۴۹/۷۷، ۴۵۶/۲۲، ۵۳۶/۵۵، ۵۴۸/۶۵، ۵۵۶/۴۹، ۵۸۸/۶۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد.



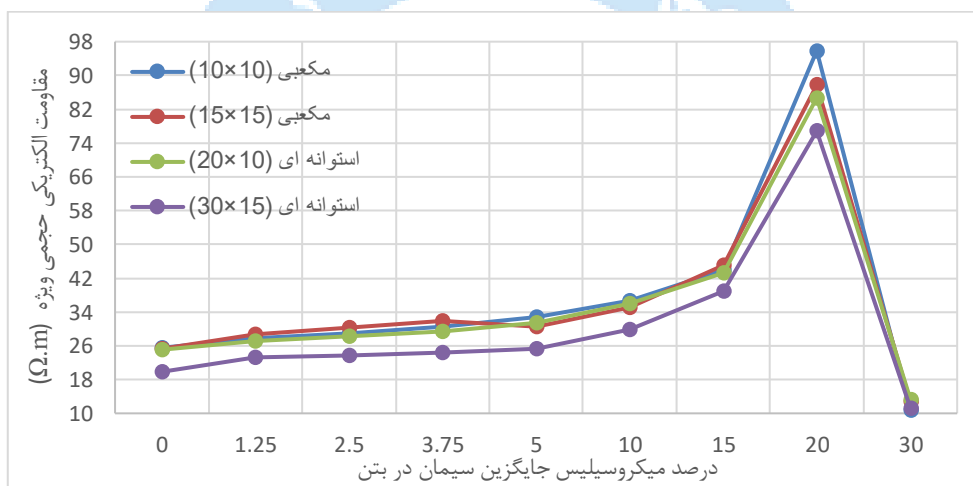
شکل ۳: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز

۳-۲- مقاومت الکتریکی حجمی

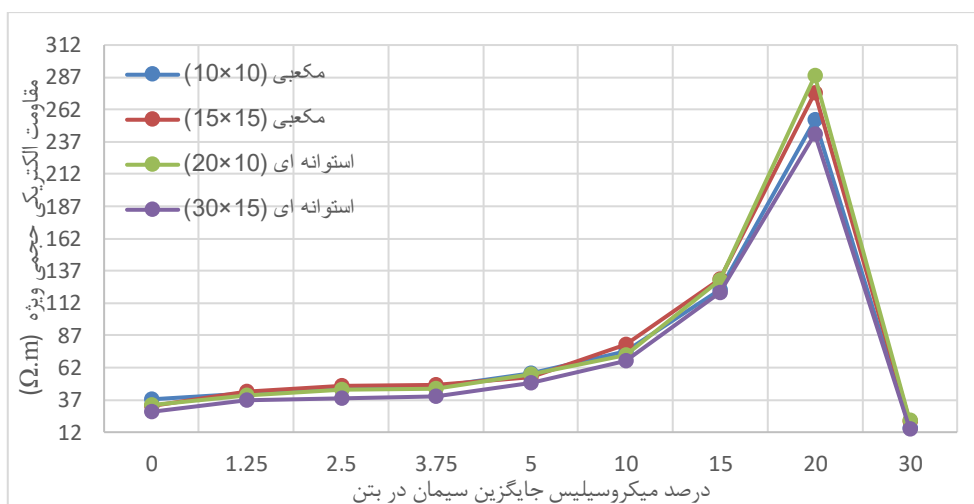
دستگاه مقاومت الکتریکی حجمی مورد استفاده در این آزمایش که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، از ۳ بخش اصلی تشکیل شده است. ۱- تقویت کننده سیگنال، که جهت تقویت و افزایش دامنه ولتاژ اعمالی به نمونه‌ها در آزمایشگاه ساخته شده است. ۲- سیگنال ژنراتور (فانکشن ژنراتور) جهت اعمال سیگنال سینوسی با فرکانس ۵۰ هرتز. ۳- اسیلوسکوپ برای نمایش شکل موج ولتاژ و جریان دو سر نمونه. ولتاژ اعمالی، نسبت آب به سیمان در خمیر به کار رفته در آزمون مقاومت الکتریکی نمونه‌ها ثابت می‌باشد. همچنین در آزمون حجمی جهت آزمایش عمود بر محور بتن ریزی بود. با توجه به شکل ۵ الی ۹ که نمودارهای مقاومت الکتریکی می‌باشد. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان تا ۲۰ درصد مقاومت الکتریکی ویژه نیز افزایش یافت که در سنین ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ روزه و در نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰ به ترتیب ۹۵/۸۳، ۲۵۳/۸۵، ۳۰۰، ۳۴۵، ۴۶۰، ۵۷۵ اهم متر و در نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ به ترتیب ۸۷/۷۱، ۲۷۵، ۲۹۱/۱۸، ۳۴۵، ۴۷۰/۴۵، ۶۳۱/۱۰ اهم متر و در نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ ۸۴/۶۸، ۲۸۹/۴۷، ۳۲۵/۸۸، ۳۸۷/۰۹، ۴۵۱/۶۰، ۶۷۷/۴۱ و در استوانه ۱۵×۳۰ نیز ۷۶/۸۱، ۲۴۲/۹۸، ۳۰۳/۷۲، ۳۱۸/۶۶، ۴۳۷/۸۰، ۶۰۷/۴۵ اهم متر می‌باشد اما با افزایش تا ۳۰ درصد مقاومت الکتریکی ویژه به شدت کاهش یافت.



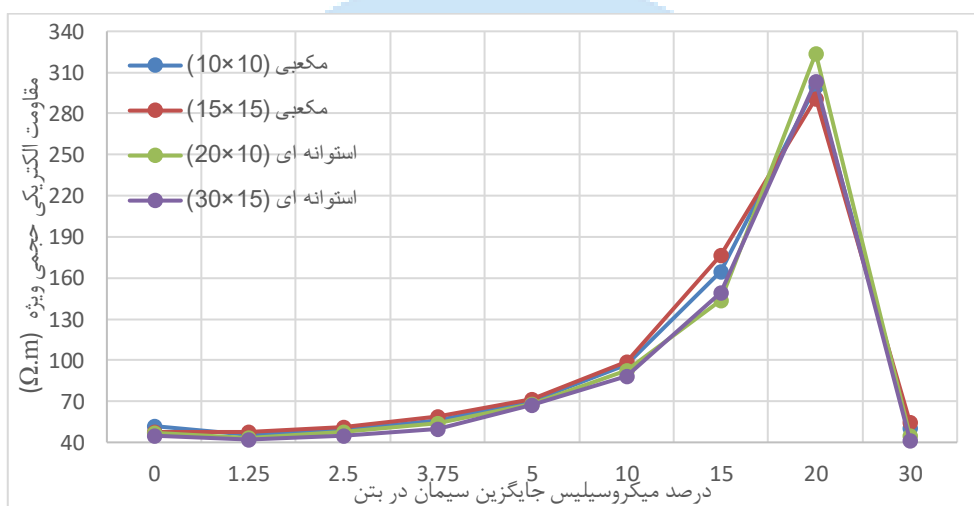
شکل ۴: ادوات دستگاه مقاومت الکتریکی حجمی بتن



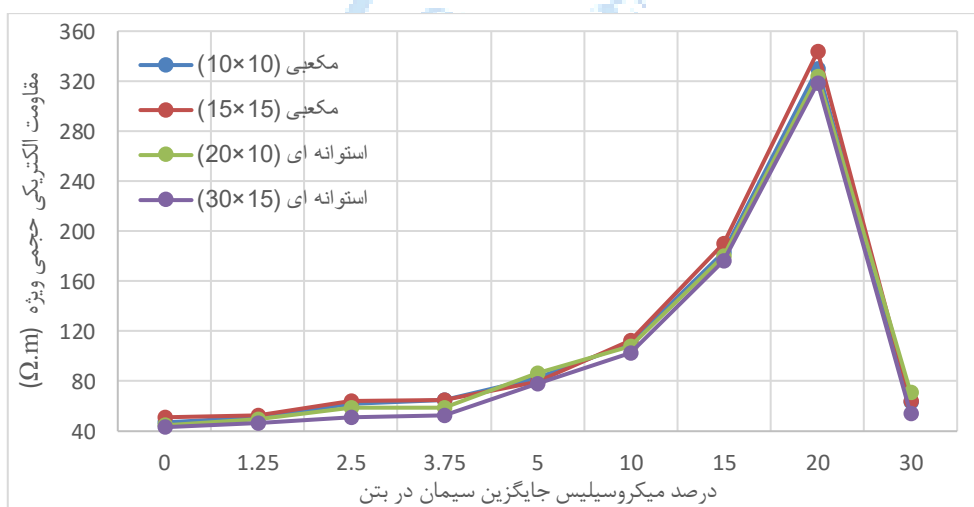
الف. مقاومت الکتریکی حجمی ۷ روزه



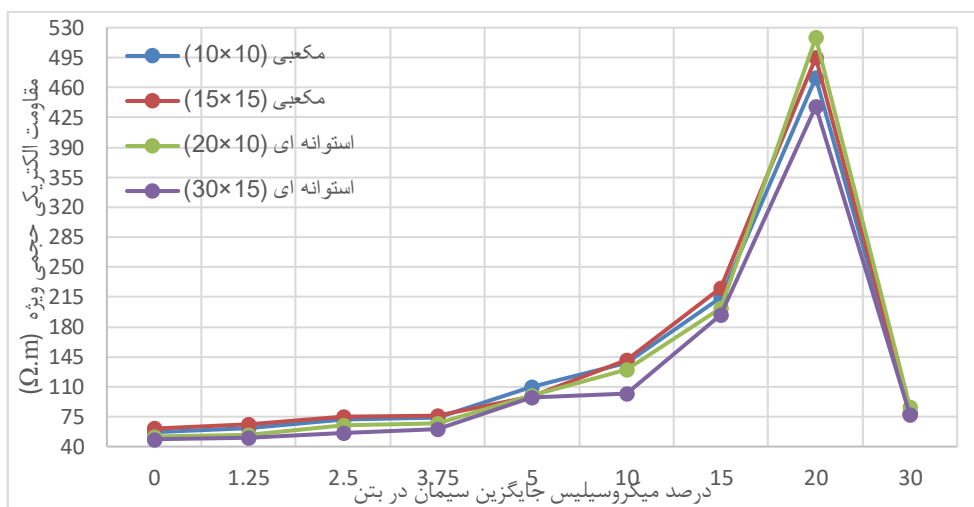
ب. مقاومت الکتریکی حجمی ۲۸ روزه



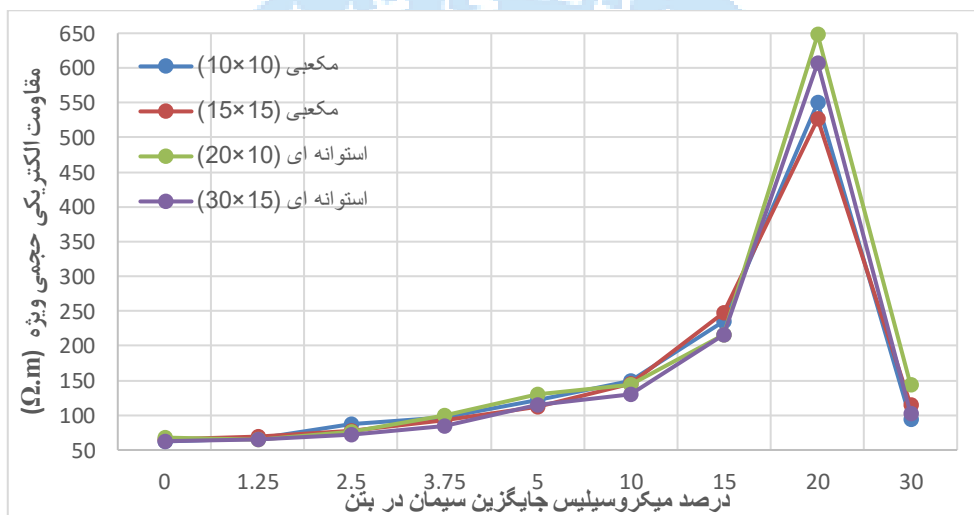
ج. مقاومت الکتریکی حجمی ۴۲ روزه



د. مقاومت الکتریکی حجمی ۶۰ روزه

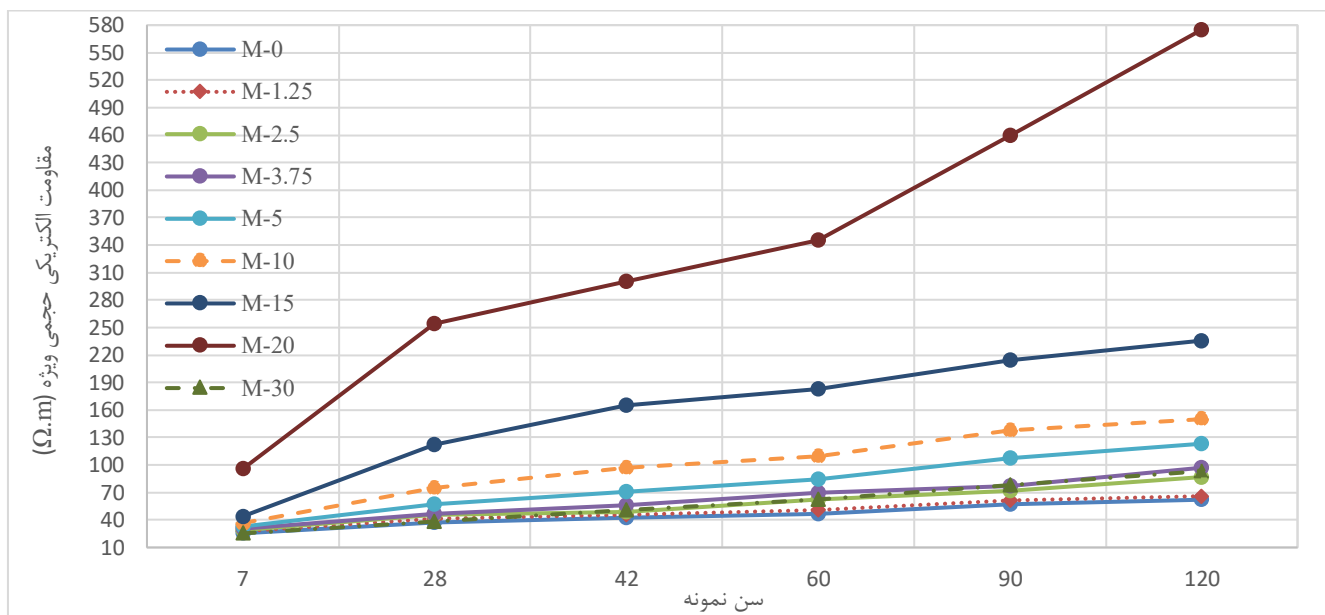


ه. مقاومت الکتریکی حجمی ۹۰ روزه

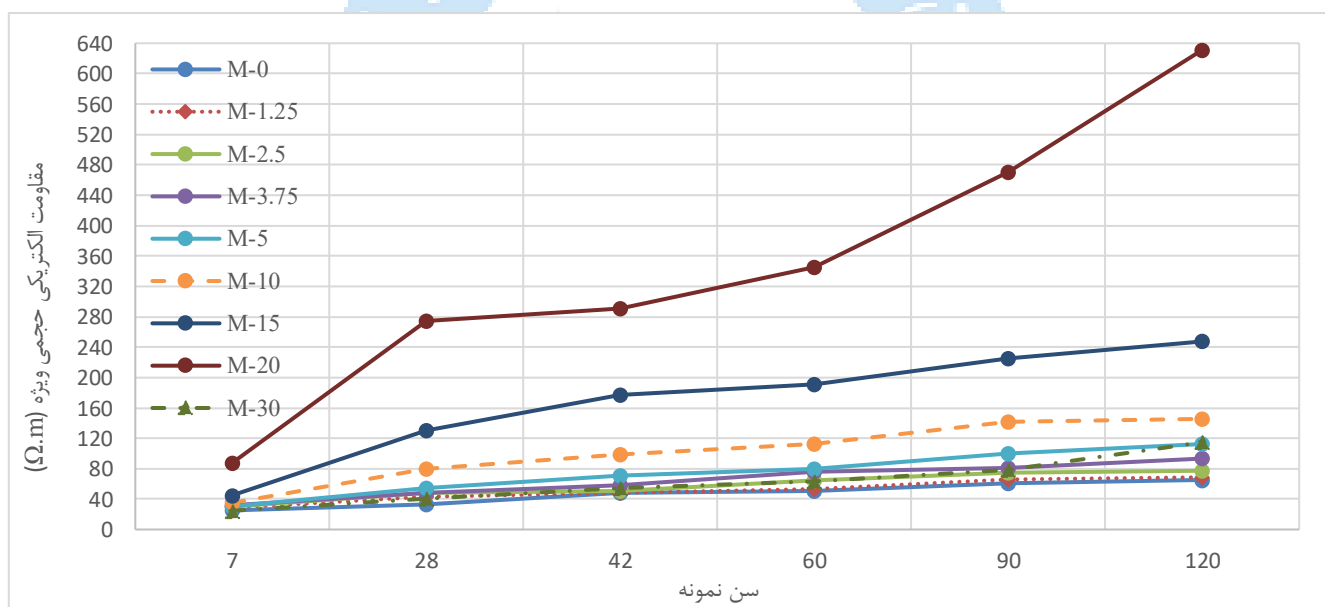


ی. مقاومت الکتریکی حجمی ۱۲۰ روزه

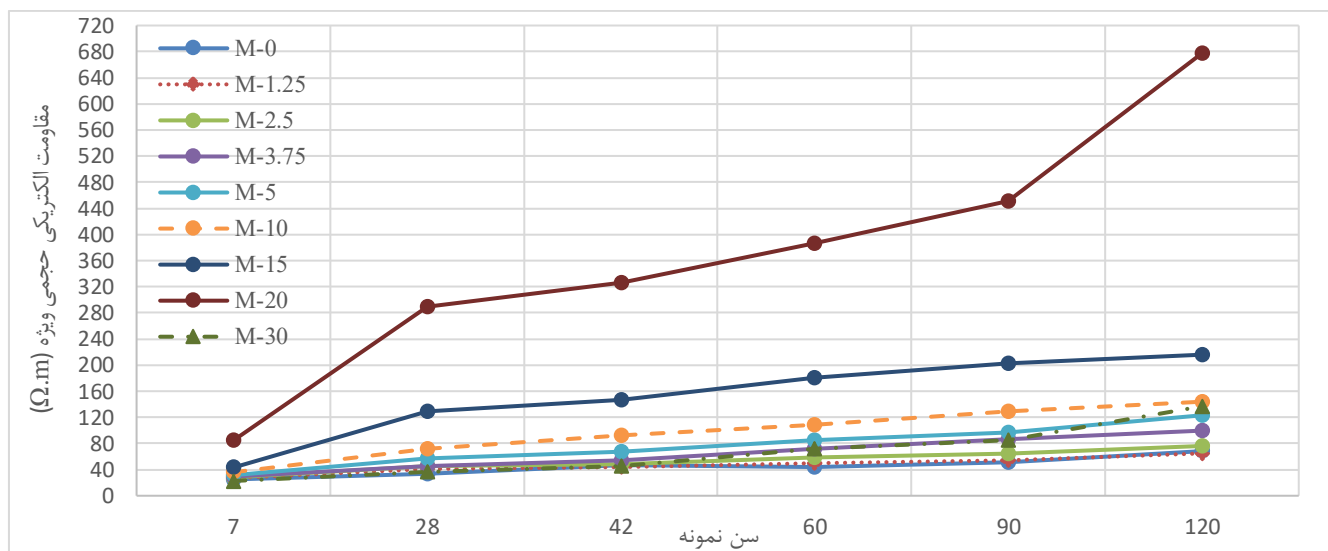
شکل ۵: نتایج آزمون مقاومت الکتریکی حجمی بتن



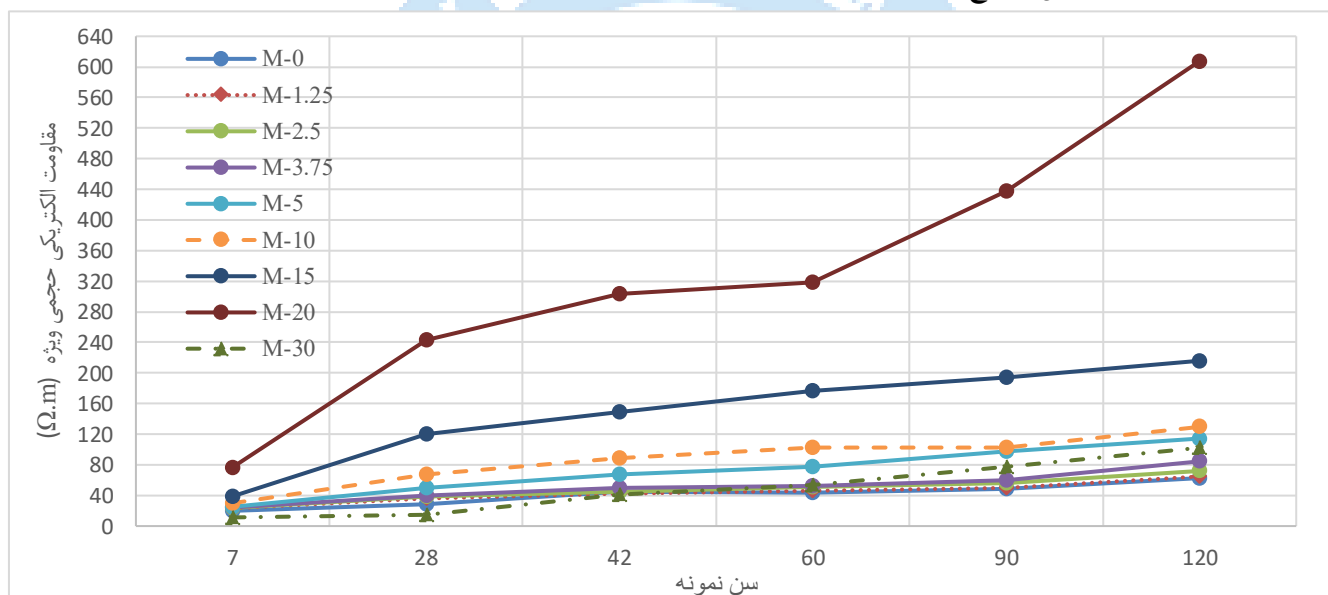
شکل ۶: نتایج مقاومت الکتریکی نمونه مکعبی ۱۰×۱۰ در سن ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روزه



شکل ۷: نتایج مقاومت الکتریکی نمونه مکعبی ۱۵×۱۵ در سن ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز



شکل ۸: نتایج مقاومت الکتریکی نمونه استوانه‌ای ۲۰×۱۰ در سن ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز

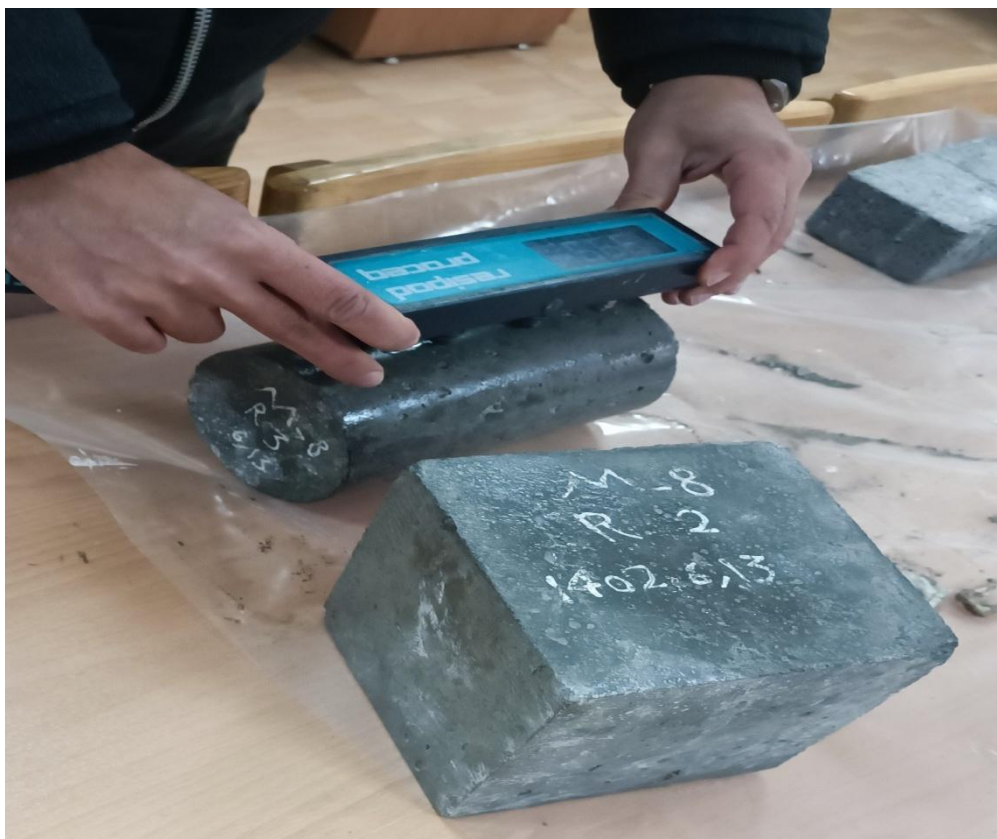


شکل ۹: نتایج مقاومت الکتریکی نمونه استوانه‌ای ۳۰×۱۵ در سن ۷، ۲۸، ۴۲، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز

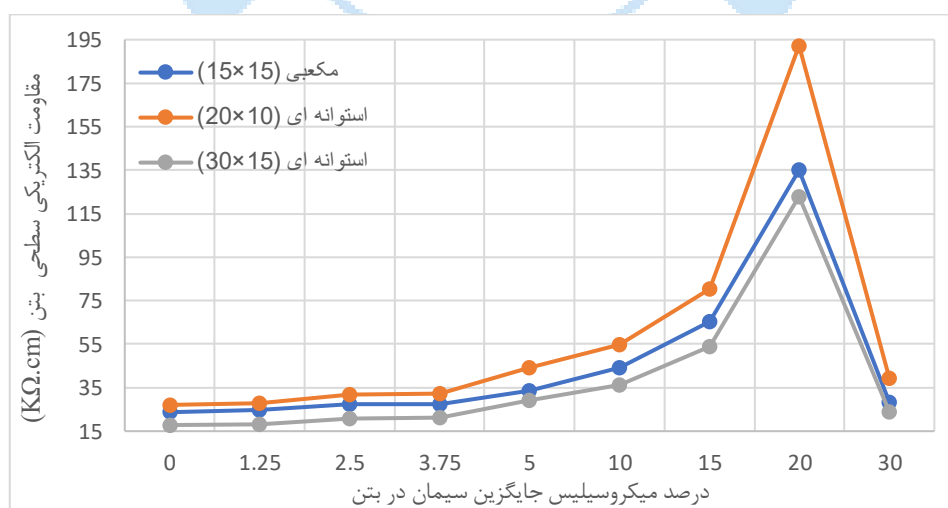
۳-۳- مقاومت الکتریکی سطحی

آزمون مقاومت الکتریکی سطحی با استفاده از دستگاه Resipode از شرکت Proceq انجام گردید (شکل ۱۰). دستگاه مقاومت الکتریکی سطحی مورد استفاده دارای ۴ پروب بوده که فاصله مرکز تا مرکز آن‌ها ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. ۲ پروب بیرونی ولتاژ را اعمال نموده و دو پروب داخلی اختلاف پتانسیل آن‌ها را اندازه می‌گیرد. با توجه به شکل ۱۱ که نمودار مقاومت الکتریکی سطحی بتن حاوی درصد‌های جایگزینی میکروسیلیس در سن ۹۰ و ۱۲۰ روز می‌باشد، با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس تا ۲۰ درصد مقاومت الکتریکی سطحی افزایش یافته و در ۳۰ درصد به شدت افت می‌کند. مقادیر مقاومت الکتریکی سطحی در ۲۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس برای نمونه با اشکال هندسی مختلف برابر است با: نمونه مکعبی ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری در سنین ۹۰ و ۱۲۰ روز به ترتیب برابر ۱۳۴/۹۹، ۱۳۵/۵۶ کیلو اهم سانتی‌متر، برای نمونه استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متری ۱۹۲/۲۷، ۲۳۸/۵۶ کیلو اهم سانتی‌متر و برای نمونه استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری ۱۲۲/۹۲ و ۱۳۴/۴۰ کیلو اهم سانتی‌متر می‌باشد. در طبقه‌بندی نفوذ یون کلر که بر اساس دیپارتمان حمل و نقل فلوریدا

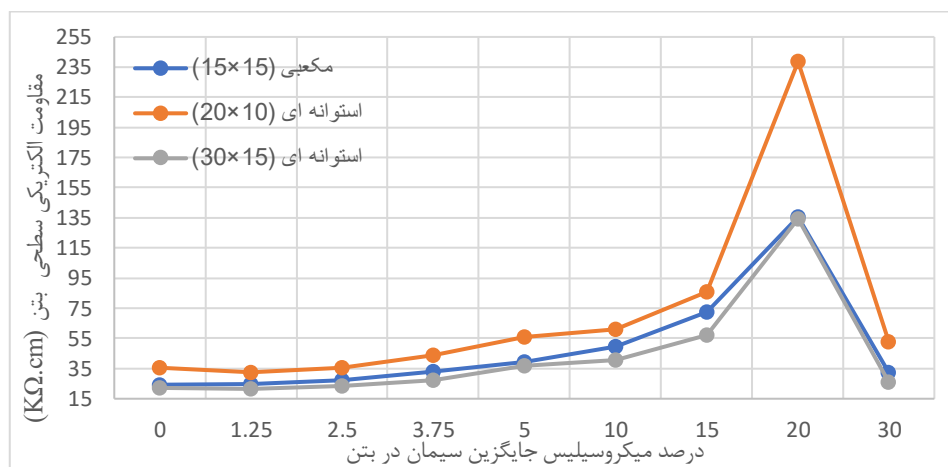
آمریکا (FDOT) می‌باشد نیز در طبقه نفوذپذیری خیلی کم و ناچیز برای استوانه 200×100 میلی‌متری و برای استوانه 300×150 میلی‌متری در طبقه خیلی کم قرار می‌گیرد [۲۷].



شکل ۱۰: دستگاه مقاومت الکتریکی سطحی (ونر ۴ پروب)



(الف)

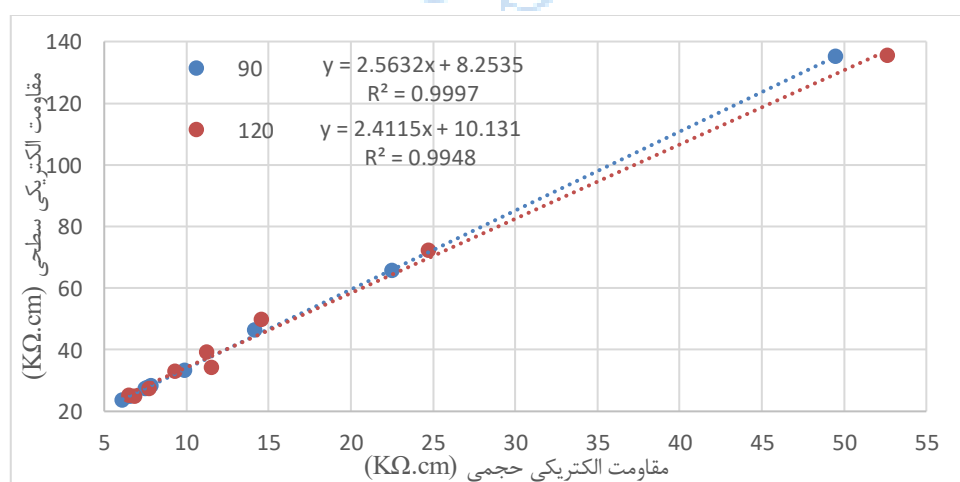


(ب)

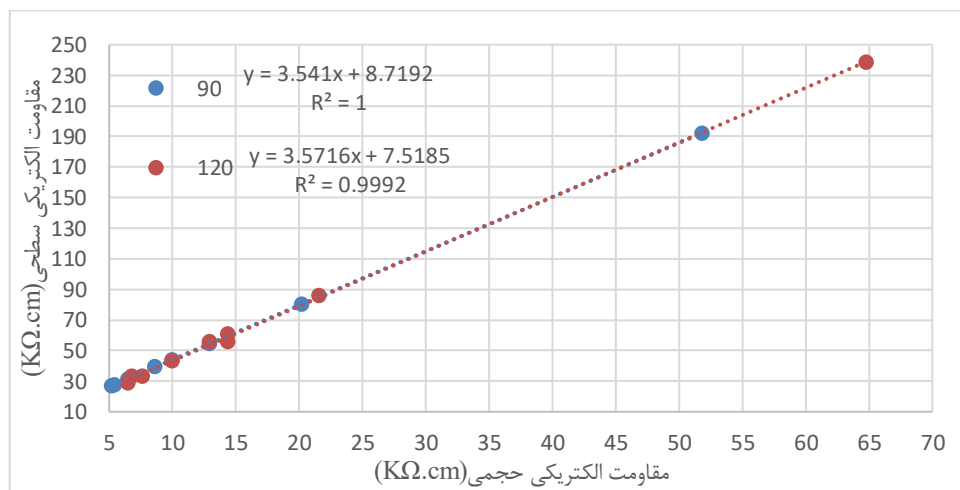
شکل ۱۱: مقاومت الکتریکی سطحی بتن حاوی درصد‌های جایگزینی میکروسیلیس با سیمان در سنین ۹۰ (الف) و ۱۲۰ (ب) روز.

۳-۴- همبستگی مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی

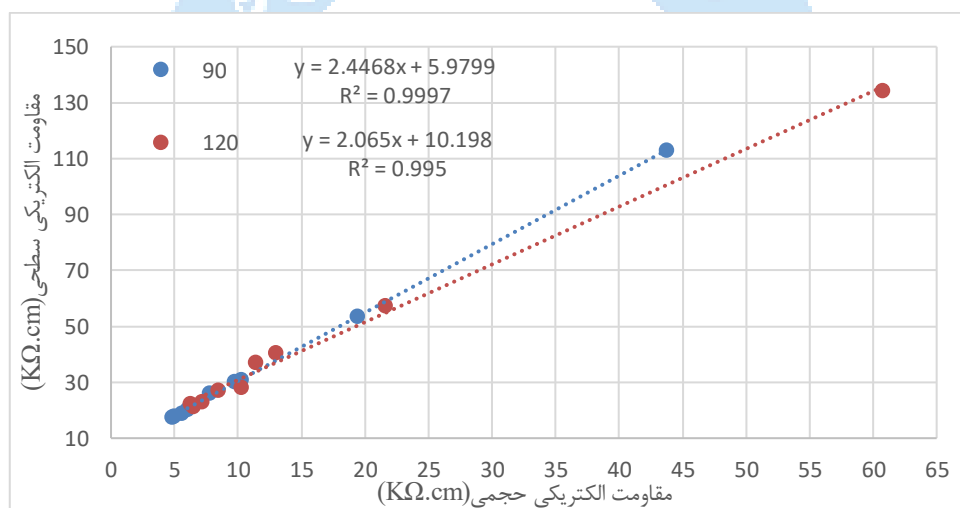
همبستگی قوی بین مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی در روزهای ۹۰ و ۱۲۰ در طرح‌های بتن حاوی میکروسیلیس ایجاد شده است. مقادیر داده‌های مقاومت الکتریکی از میانگین داده‌های چهار نمونه از هر طرح می‌باشد. شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ این همبستگی را نشان می‌دهد. اکثر طرح‌های حاوی میکروسیلیس مقادیر رگرسیون برای روند خطی بالاتر از ۰/۹۹ است، این ثابت می‌کند که تمام طرح مخلوط‌ها به خوبی در دو نوع مختلف اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در سنین ۹۰ و ۱۲۰ روز همبستگی خطی دارند. معیارهای ارزیابی عملکرد این همبستگی شامل واریانس، انحراف استاندارد، میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، میانگین درصد خطای مطلق، ضریب تعیین R^2 و ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد. که نتایج در جدول ۶ مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که عمدتاً معیارهای صحت سنجی این همبستگی در طول زمان افزایش می‌یابد. اعتقاد بر این است که این ممکن است به دلیل تغییرات جزئی در دما یا تفاوت در شرایط آزمایش یا ویژگی‌های مواد مورد استفاده باشد. که ممکن است در آزمایشگاه رخ داده باشد و می‌تواند در طول زمان تغییر کند.



شکل ۱۲: همبستگی مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه مکعبی ۱۵×۱۵



شکل ۱۳: همبستگی مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه استوانه ۲۰×۱۰



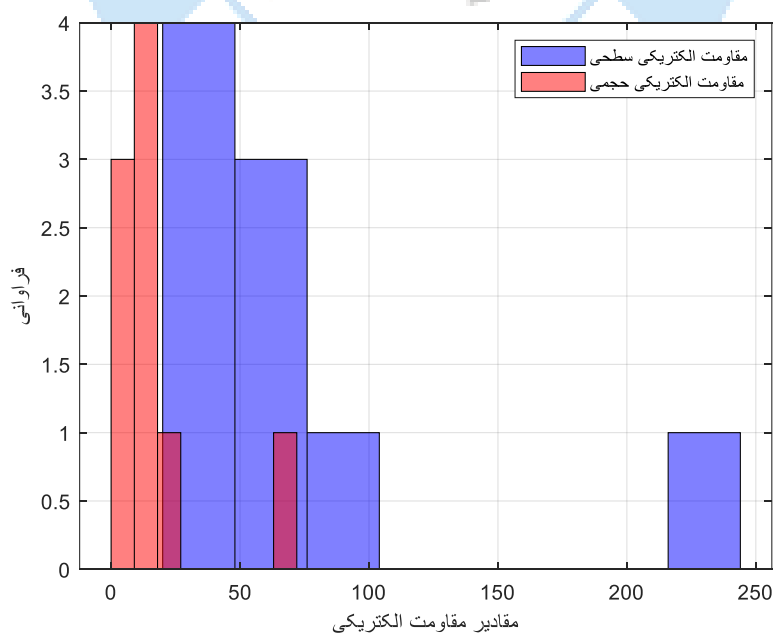
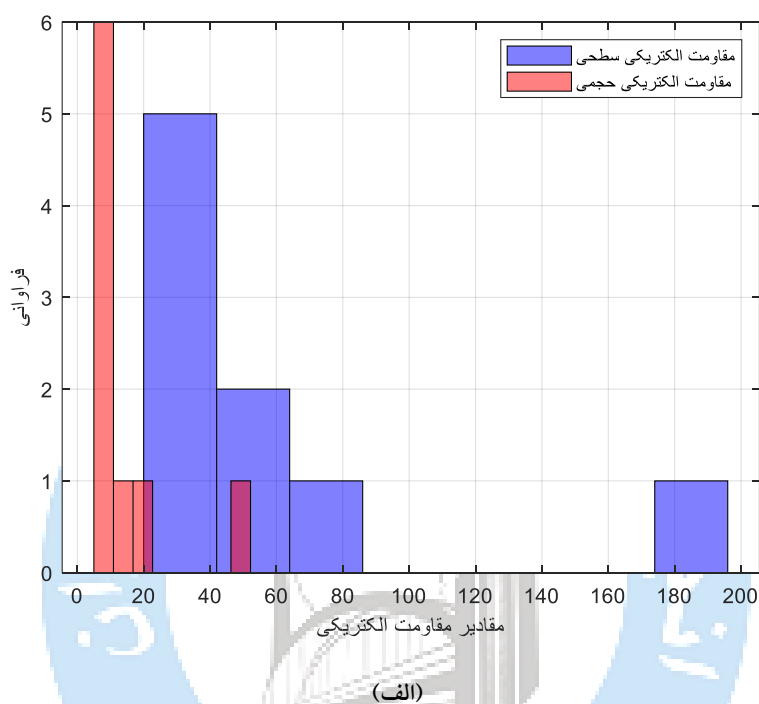
شکل ۱۴: همبستگی مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه استوانه ۳۰×۱۵

جدول ۶: نتایج صحت سنجی همبستگی مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی

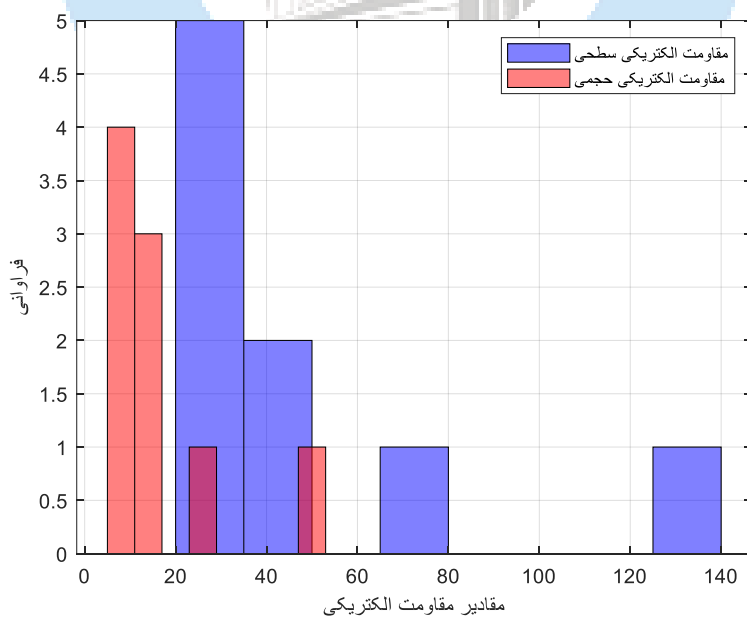
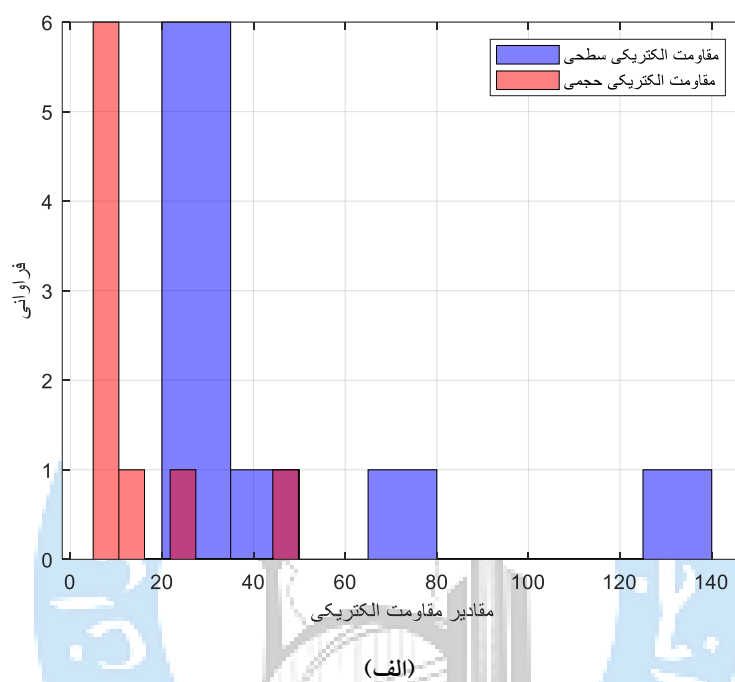
۱۲۰ روز			۹۰ روز			معیارهای ارزیابی عملکرد
نمونه استوانه	نمونه مکعبی	نمونه استوانه	نمونه استوانه	نمونه مکعبی	نمونه استوانه	
۳۰×۱۵	۲۰×۱۰	۱۵×۱۵	۳۰×۱۵	۲۰×۱۰	۱۵×۱۵	واریانس
۱/۱۸	۰/۸۱	۱/۷۲	۰/۰۸	.	۰/۲۳	انحراف معیار
۱/۰۸	۰/۹۰	۱/۳۱	۰/۲۸	.	۰/۴۷	میانگین مربعات خطا MSE
۵/۷۶	۳/۰۸	۵/۹۵	۰/۲۳	.	۰/۳۷	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE
۲/۴۰	۱/۷۵	۲/۴۴	۰/۴۸	.	۰/۶۱	میانگین خطای مطلق MAE
۲/۱۴	۱/۵۰	۲/۰۶	۰/۳۸	.	.	میانگین درصد خطای مطلق MAPE
۶/۴۶	۳/۲۰	۵/۰۹	۱/۶۲	1.092×10^{-15}	۰/۹۸۸۰	

۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۴۷	۰/۹۹۹۷	۱	۰/۹۹۹۶	ضریب تعیین R^2
۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۹۸	۱	۰/۹۹۹۱	ضریب همبستگی پیرسون PCC

شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نمودار هیستوگرام مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه‌ها در سنین ۹۰ و ۱۲۰ روز نشان می‌دهد. مقاومت الکتریکی سطحی گسترده‌تر از مقاومت الکتریکی حجمی توزیع شده است. مقادیر مقاومت الکتریکی سطحی در بازه‌های بالاتری نسبت به مقاومت الکتریکی حجمی قرار دارند. این امر به دلیل تأثیر متفاوت شرایط رطوبتی و طرح اختلاط در اندازه‌گیری‌های سطحی و حجمی است. که روش اندازه‌گیری سطحی تأثیر بیشتری از کاهش نفوذپذیری بتن می‌پذیرد.

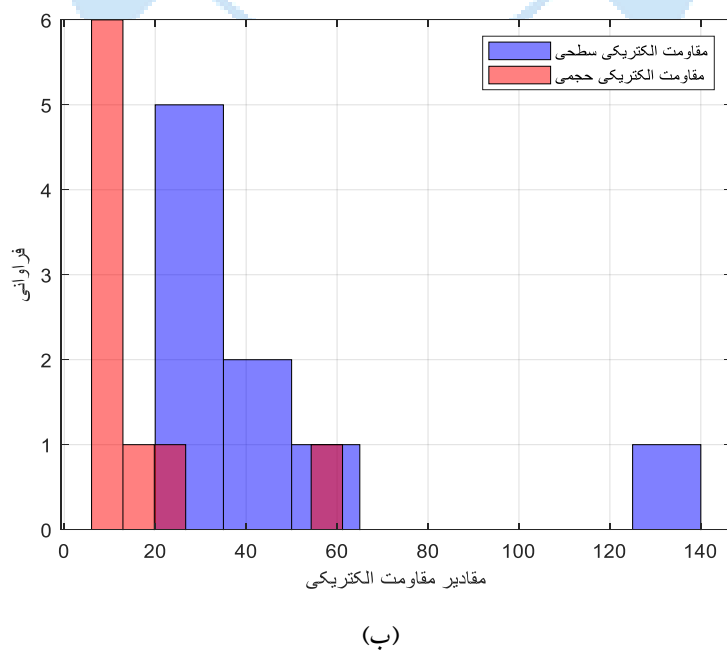
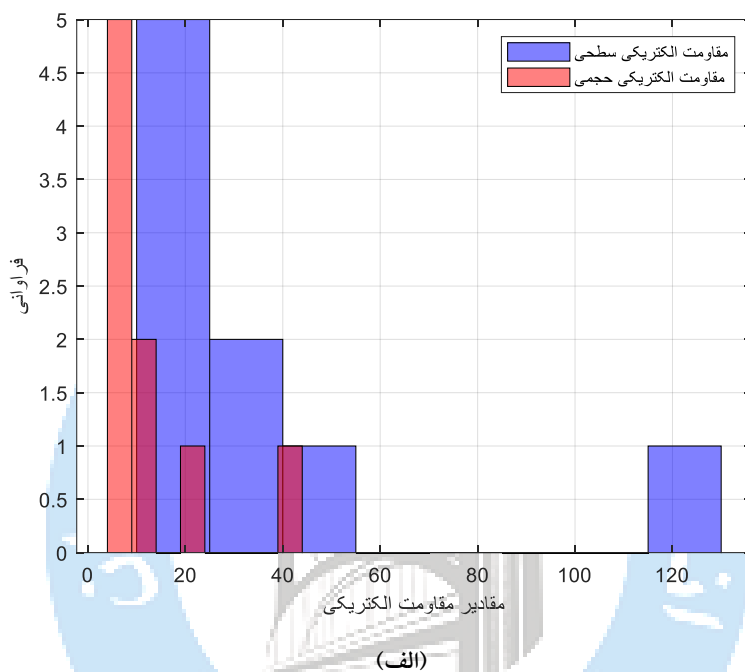


(ب)

شکل ۱۵: نمودار هیستوگرام مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه مکعبی 15×15 در سنین: (الف) ۹۰ روز و (ب) ۱۲۰ روز

(ب)

شکل ۱۶: نمودار هیستوگرام مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه استوانه 20×10 در سنین: (الف) ۹۰ روز و (ب) ۱۲۰ روز



شکل ۱۷: نمودار هیستوگرام مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی نمونه استوانه ۳۰×۱۵ در سنین: (الف) ۹۰ روز و (ب) ۱۲۰ روز

۴- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی تأثیرات استفاده از میکروسیلیس به عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن بر خواص مکانیکی، الکتریکی و دوامی بتن پرداخت. یافته‌های این تحقیق نشان داد که میکروسیلیس نقش مهمی در بهبود خواص بتن ایفا می‌کند و از آن می‌توان برای دستیابی به بتن‌های با دوام و کارآمد استفاده کرد. در ادامه، نتایج اصلی این مطالعه به تفصیل ارائه شده است:

۱- افزودن میکروسیلیس تا درصد جایگزینی بهینه (۱۵ درصد وزنی سیمان) باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن شد. این افزایش به بهبود ساختار ماتریس بتن و کاهش تخلخل نسبت داده شد.

۲- در سن ۱۲۰ روز، نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس بالاترین مقاومت فشاری (۵۸۸/۶۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) را نشان دادند، در حالی که مقادیر بالاتر از این درصد (۲۰ و ۳۰ درصد) باعث کاهش مقاومت فشاری شدند. این کاهش می‌تواند ناشی از کاهش مقدار سیمان هیدراته و افزایش میزان مواد غیرواکنش‌دهنده باشد.

۳- مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی بتن با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۲۰ درصد به طور قابل توجهی افزایش یافت. مقاومت الکتریکی بالاتر نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری بتن و بهبود مقاومت آن در برابر حمله عوامل خوردنده است.

۴- نتایج نشان داد که میکروسیلیس می‌تواند به طور مؤثری خواص انتقالی بتن را بهبود بخشد و از نفوذ یون‌های کلرید و سایر عوامل شیمیایی مهاجم جلوگیری کند.

۵- همبستگی قوی و خطی بین مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی مشاهده شد. با ضریب تعیین $R^2 < 0.99$ می‌تواند مبنایی برای استفاده از روش‌های سریع‌تر و غیرمخرب برای ارزیابی کیفی بتن باشد.

۶- هر دو مقاومت سطحی و حجمی با افزایش زمان (از ۹۰ به ۱۲۰ روز) افزایش یافته‌اند. این افزایش به دلیل تکامل بیشتر ساختار بتن، کاهش رطوبت و انسداد منافذ است.

۷- مقاومت الکتریکی سطحی نسبت به مقاومت حجمی، مقادیر بالاتری دارد، زیرا این روش بیشتر تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد. مقاومت سطحی برای ارزیابی نفوذپذیری سطحی و مقاومت حجمی برای بررسی خصوصیات درونی بتن مناسب هستند. همچنین افزایش مقاومت‌ها با گذشت زمان نشان می‌دهد که بتن در حال تکامل است و کیفیت آن بهبود می‌یابد.

۸- نتایج نشان داد که میکروسیلیس از طریق واکنش پوزولانی، کلسیم هیدروکسید را به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) تبدیل می‌کند که باعث بهبود چگالی ماتریس بتن و کاهش تخلخل آن می‌شود. مقاومت بالاتر در برابر نفوذ یون‌ها و عوامل مهاجم به ویژه در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس مشاهده شد. این امر نشان‌دهنده قابلیت این نوع بتن برای استفاده در سازه‌های تحت شرایط محیطی سخت (مانند مناطق ساحلی یا صنعتی) است.

۵- محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به نسبت آب به سیمان ثابت بررسی شده (۰/۴۸)، استفاده از یک نوع سیمان استفاده شده (پرتلند

نوع ۲)، عدم بررسی رفتار بتن در شرایط محیطی واقعی (نمک پاشی، یخ زدگی، خنثی سازی کلر) و آزمون‌ها در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده انجام شده، نه محیط واقعی اشاره کرد. همچنین برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردد به بررسی تأثیر میکروسیلیس در ترکیب با سایر پوزولان‌ها (مثلاً نانو سیلیس، خاکستر بادی و افزودنی‌های نوین)، مطالعه رفتار الکتریکی بتن در شرایط اشباع/خشک متفاوت، توسعه مدل‌های عددی برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی در زمان، تأثیر ابعاد نمونه و جهت‌گیری بتن‌ریزی بر نتایج مقاومت الکتریکی به ویژه ضریب ثابت اصلاح سلولی پرداخته شود.

مراجع

- [1] Hooton, R.D., Pun, P., Kojundic, T., Fidjestol, P. (1997). Influence of silica fume on chloride resistance of concrete. In: Proceedings of the International Symposium on High Performance Concrete, Chicago, USA, (Ed. P. Johal), Precast/Prestressed Concrete Institute, pp. 245–249.
- [2] Tran, Q., Ghosh, P. (2022). Variation of electrical resistivity and charge passed in high-performance concrete. *Materials* (Basel), 15(19).
- [3] Malakooti, A. (2016). Investigation of concrete electrical resistivity as a performance based test. M.Sc. Thesis, Utah State University.
- [4] Ghosh, P., Tran, Q. (2015). Correlation between bulk and surface resistivity of concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 119–132.
- [5] Zheng, J.Y., Zhu, J., Kwan, A. (2018). Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*, 168, 622–632.
- [6] Sharkawi, A., Elaty, M., Hussein Khalifa, O. (2018). Synergistic influence of micro-nano silica mixture on durability performance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 164, 579–588.
- [7] McCarter, W., Forde, M., Whittington, H. (1981). Resistivity characteristics of concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 71(1), 107–117.
- [8] Morris, W., Moreno, E.I., Sagüés, A.A. (1996). Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and Concrete Research*, 26(12), 1779–1787.
- [9] Poursaeed, A., Weiss, W.J. (2010). An automated electrical monitoring system (AEMS) to assess property development in concrete. *Automation in Construction*, 19(4), 485–490.
- [10] Spragg, R., Castro, J., Nantung, T., Paredes, M., Weiss, W. (2011). Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. *Advances in Civil Engineering Materials*, 21.
- [11] Coyle, A., Spragg, R., Armikhanian, A., Weiss, W. (2016). Measuring the influence of temperature on electrical properties of concrete.
- [12] ASTM C1202-19, American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [13] AASHTO T358-19, American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Washington, DC, USA.
- [14] ASTM C1876-19, American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for bulk electrical resistivity of concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [15] AASHTO TP119-15, American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). Standard method of test for electrical resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. Washington, DC, USA.
- [16] CSA A23.2-26C-19, Canadian Standards Association. (2019). Bulk electrical resistivity of concrete. Mississauga, ON, Canada.
- [17] Rajabipour, F., Weiss, J. (2008). Parameters affecting the measurements of embedded electrical sensors for concrete health monitoring applications. *ACI Symposium Publication*, 252.
- [18] Weiss, W.J., Spragg, R.P., Isgor, O.B., Ley, M.T., Van Dam, T. (2018). Toward performance specifications for concrete: Linking resistivity, RCPT and diffusion predictions using the formation factor for use in specifications. In: Hordijk, D.A., Luković, M. (Eds.), *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer, Cham, pp. 2057–2065.
- [19] Obla, K., Lobo, C. (2021). Electrical tests for concrete penetrability, Part 1. *ACI Materials Journal*, 118, 45.
- [20] Douglas, R.H., Gita, C. (2015). Adoption of resistivity tests for concrete acceptance. *ACI Symposium Publication*, 303.
- [21] INSO 13278, Iranian National Standardization Organization. (2017). Silica fume (Microsilica) Used in Cementitious Mixtures-Specification, Tehran, pp. 17.
- [22] ASTM C1240-20, American Society for Testing and Materials, Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. (2020). ASTM International, West Conshohocken, PA: ASTM International.

- [23] B.S. 8500-2, British Standard Institution. (2023). Code of practice for design of concrete structures, in: Part 2: Specification for constituent materials and composite construction, British Standards Institution (BSI), London.
- [24] ASTM C1602/C1602M-22, American Society for Testing and Materials. (2022). Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [25] Building and Housing Research Center (BHRC). (2012). *Iranian National Method for Mix Design of Concrete (Publication No. 479)*. Tehran: Ministry of Roads and Urban Development. (In Persian).
- [26] ASTM C143/C143M-20, American Society for Testing and Materials. (2020). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [27] FDOT Standard FM5-578. (2004). Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability. Florida Department of Transportation.

