

# Electrical Resistivity of Concrete Mixtures Containing a High Volume of Pozzolanic Materials

Ali Zolghadri

M.S.C.E in Highway and Transportation Engineering, University of Zanjan

**Babak Ahmadi\***

Assistant Professor, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran  
[b.ahmadi@bhrc.ac.ir](mailto:b.ahmadi@bhrc.ac.ir)

Babak Froutan Mehr

Member of the Board of Directors, Fahab Beton Company, Tehran

## Abstract

*In this study, 19 different mixtures, including 11 air-entrained mixtures, three flowable mortar mixtures, and five self-consolidating concrete mixtures were fabricated to investigate the effect of different factors, including air content, type and composition of pozzolans, and water to binder ratio(w/b) on electrical resistivity. These mixtures were made by substituting between 30-60% of cement weight by pozzolanic materials with 0.28 to 0.34 w/b ratios. The pozzolanic materials included zeolite, pumice, wollastonite, and slag. Electrical Surface and bulk resistivity tests were performed at different ages on 100 mm x 200 mm cylindrical specimens, and the relationship between the test results was investigated. The results of the study indicated that the electrical resistivity is related to the water to binder ratio, type and composition of pozzolans used, replacement level of pozzolan materials, and entrained air amount. Among these factors, the w/b ratio and the replacement level of pozzolan used had a greater effect on the electrical resistivity of concrete. The combination of slag and zeolite had the greatest effect, and the combination of slag and wollastonite had the least effect on the development of electrical resistivity results in the mixtures. The result of regression analysis showed that there is a strong correlation between the results of bulk and surface resistivity of concrete at different ages.*

**Keywords:** bulk resistivity, surface resistivity, pumice, wollastonite, zeolite.

---

\* Corresponding Author

Zolghadri, A., Ahmadi, B., Froutan Mehr, B. Electrical resistivity of Concrete Mixtures Containing a High Volume of Pozzolanic Materials. Journal of Concrete Structures and Materials, 2021; 6(2): 46-60.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.320191.1243>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# بررسی مقاومت الکتریکی مخلوط های بتنی حاوی حجم بالایی از مواد پوزولانی

دریافت مقاله: ۲۵-۰۹-۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۱۴-۱۰-۱۴۰۰

علی ذوالقدری

کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه زنجان

بابک احمدی

استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

[b.ahmadi@bhrc.ac.ir](mailto:b.ahmadi@bhrc.ac.ir)

(نویسنده مسئول)

بابک فروتن مهر

عضو هیئت مدیره شرکت فهاب بتن

## چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر عواملی چون مقدار هوای بتن، نوع و ترکیب پوزولان مصرفی و نسبت آب به مواد سیمانی روی مقاومت الکتریکی بتن، ۱۹ مخلوط مختلف شامل ۱۱ مخلوط بتن هوادار، ۳ مخلوط ملات با کارایی بالا، و ۵ مخلوط بتن خودتراکم ساخته شد. این مخلوط ها با ترکیبات مختلف جایگزینی بین ۳۰ تا ۶۰ درصدی پوزولان به جای سیمان مصرفی و در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ ساخته شدند. پوزولانهای مصرفی شامل زئولیت، پومیس، ولاستونیت و سرپاره بودند. آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی در سنین مختلف عمل آوری روی آزمونهای استوانه ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر انجام گرفت و ارتباط این دو آزمایش با هم بررسی شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مقاومت الکتریکی و در نتیجه دوام بتن به نسبت آب به مواد سیمانی مخلوط، نوع و ترکیب پوزولان مصرفی، مقدار مواد سیمانی مصرفی و مقدار هوای بتن ارتباط دارد. در بین پارامترهای تاثیر گذار روی مقاومت الکتریکی بتن، نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار سیمان و پوزولان مصرفی، اثر بیشتری از سایر عوامل بررسی شده داشتند. در این بین، ترکیبات سرپاره و زئولیت بیشترین اثر و ترکیبات سرپاره و ولاستونیت کمترین تاثیر را در بهبود نتایج مقاومت الکتریکی داشتند. نتیجه‌ی حاصل از آنالیز رگرسیونی نشان داد که صرف نظر از نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به مواد سیمان و همچنین مقدار هوای بتن، ارتباط معناداری بین نتایج مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی در سنین مختلف عمل آوری وجود دارد. کلمات کلیدی: مقاومت الکتریکی سطحی، مقاومت الکتریکی حجمی، پومیس، ولاستونیت، زئولیت.

خوردگی ناشی از کلرید یکی از مشکلات اساسی در سازه‌های زیرساختی مانند رویه‌های بتنی، عرشه پل‌ها و سازه‌های دریایی است. به همین دلیل، باید روش‌هایی به منظور ارزیابی سازه‌ها در برابر نفوذ یون کلرید برای کنترل، جلوگیری و یا کاهش سرعت آن اتخاذ گردد. در نتیجه مقاومت الکتریکی به عنوان ابزاری غیر مستقیم در جهت ارزیابی دوام سازه‌های بتنی در دهه‌های اخیر توسعه یافته است [1].

مقاومت الکتریکی روشی غیر مخرب است که می‌توان بوسیله آن ریز ساختار بتن را ارزیابی کرد. مقاومت الکتریکی به طور غیر مستقیم به حجم تخلخل و رسانایی محلول‌های قلیایی موجود در خلل و فرج بتن ارتباط دارد. همچنین این روش می‌تواند به منظور پیش‌بینی ضریب انتشار یون‌های کلرید و نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار گیرد [2].

به طور معمول، مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید توسط آزمایش RCPT مطابق با استاندارد ASTM C1202-12 ارزیابی می‌گردد. اما به علت زمان بر بودن انجام این روش، و احتمال بروز نتایج غیرقابل قبول در صورت تغییرات دمایی، روشی سریع جهت کنترل کیفیت مستمر بتن نیست [3]. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی به وسیله‌ی دستگاه ۴ نقطه‌ای ونر یکی از روش‌های غیرمخرب و سریع تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید است. FDOT (دپارتمان حمل و نقل فلوریدا) روشی را به منظور استانداردسازی قرائت‌های مقاومت الکتریکی توسعه داده‌است [4]. کسلر و همکاران [5] در FDOT روی ۵۲۹ نمونه بررسی آزمایشگاهی جهت امکان‌سنجی جایگزینی آزمایش مقاومت الکتریکی به جای RCPT در کنترل کیفیت انجام دادند. از نتایج مطالعه‌ی آنها دسته‌بندی مخلوط‌ها از نظر نفوذ یون کلرید با استفاده از آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی بود. پژوهش دیگری که توسط تیکالسی و همکاران [6] روی مخلوط‌های بتن توانمند در سن ۹۱ روز که حاوی دوده سیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی و متاکائولین انجام گرفت، نشان داد که نتایج مقاومت الکتریکی با نتایج آزمایش RCPT همبستگی بالایی دارند. ماریاگا و همکاران [7] روی مخلوط‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با درصد جایگزینی مختلف به جای سیمان مطالعه کردند. نتایج مطالعه‌ی آنها نشان داد که مقاومت الکتریکی و شار بار منتقل شده، معیاری مناسب و غیر مستقیم از نفوذ یون کلرید است که برای مخلوط‌های حاوی سیمان پرتلند و سرباره دیده شد. ایسنوگل و همکاران [8] نشان دادند که اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی توسط دستگاه چهار نقطه‌ای ونر در اندازه-گیری‌های تک آزمایشگاهی و چند آزمایشگاهی دقت بهتر و تغییرات کمتری نسبت به آزمایش نفوذپذیری سریع شده یون کلرید در مخلوط‌های مختلف بتنی با عملکرد بالا (HPC) نشان می‌دهد. دارن و همکاران [9] ارتباط بین نفوذ یون کلرید و مقاومت الکتریکی را در بتن‌های توانمند بررسی کردند. یکی از یافته‌های آنها بدست‌آوردن ضریب همبستگی بالا در محدوده بین ۰/۹۴-۰/۹۹ بود که نشان دهنده مناسب بودن استفاده از روش مقاومت الکتریکی برای ارزیابی کنترل کیفیت بتن‌های توانمند و پیش‌بینی میزان خوردگی است.

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، اندازه‌گیری آن به وسیله‌ی الکترودهای صفحه‌ای در دو سر نمونه است که اصطلاحاً به آن روش مقاومت الکتریکی حجمی گفته می‌شود [10]. این آزمایش در محیطی رسانا انجام می‌شود. لازم به ذکر است که سطح تماس باید تا حد امکان صاف باشد تا فشار تماسی مناسب ایجاد شود و از اسفنج اشباع بین نمونه و صفحات برای ایجاد رسانایی بهتر استفاده گردد [10]. اسپراگ و همکارانش [11] مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی ۱۲ مخلوط سیمانی را در سنین، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز اندازه‌گیری کردند و نمودار همبستگی در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز را ارائه دادند. علاوه بر این، اثر مقاومت الکتریکی الکتروود نیز مورد بحث قرار گرفت. طبق نتایج بدست‌آمده مشاهده شد که تأثیر نوع الکتروود بر نتایج مقاومت الکتریکی در بتن‌های با مقاومت بالا معنی‌دار نیست و نتایج مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی با هم ارتباط دارند.

تحقیقات پیشین نشان می‌دهند عواملی که بر مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلرید تأثیر می‌گذارند عبارتند از: نسبت آب به سیمان، وجود پوزولان‌ها، وجود افزودنی‌های پلیمری، وجود حباب‌های هوا و آرایش آنها، نوع سنگدانه، دمای عمل‌آوری، نوع عمل‌آوری و درجه تراکم بتن [12].

با مطالعه تحقیقات انجام‌گرفته مشاهده شد که بررسی زیادی روی اثر جایگزینی مقادیر زیادی از پوزولان‌ها به جای سیمان مصرفی و ارتباط نتایج مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی این مخلوط‌ها منتشر نشده‌است. در این پژوهش به منظور بررسی اثر مقدار هوای بتن، نسبت آب به مواد سیمانی، نوع، ترکیب، و مقدار پوزولان‌ها روی نتایج مقاومت الکتریکی، ۱۹ مخلوط بتن هوادار، بتن خودتراکم و ملات با کارایی بالا، مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام گرفت. پوزولان‌های مصرفی شامل زئولیت، پومیس، ولاستونیت و سرباره بودند که در ترکیبات مختلف بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ جایگزین سیمان مصرفی شدند. همچنین بررسی ارتباط نتایج مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی این مخلوط‌ها نیز انجام شد.

## ۲. مواد و مصالح و نسبت‌های مخلوط

### ۲.۱ مواد و مصالح مصرفی

به منظور ساخت طرح مخلوط‌ها از سیمان پرتلند نوع یک استفاده شد. ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و پوزولان‌های مصرفی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی (S)، زئولیت طبیعی (Z)، ولاستونیت (W) و پومیس (P) در جدول ۱ آورده شده است. در ساخت مخلوط‌های بتن هوادار و بتن خودتراکم سیمان کارخانه D؛ و در ساخت مخلوط ملات‌های با کارایی بالا از هر سه سیمان کارخانه دلیجان (D)، تهران (T) و کردستان (K) استفاده شد. درصد فازهای سیمان مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. فوق روان‌کننده‌ی مصرفی برای دستیابی به محدوده روانی مورد نیاز بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با درصد مواد جامد ۴۰، چگالی ۱/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود و از مواد حبابساز به منظور دستیابی به مقدار هوای مورد نظر استفاده شد. از دو نوع شن به ترتیب با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شد. شن درشت دانه از نوع سیلیسی شکسته و شن ریز دانه از نوع سیلیسی طبیعی بود. شن ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متری به ترتیب با چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۵۶ و ۲/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جذب آب آنها به ترتیب ۲/۳ و ۲/۶ درصد بودند. ماسه مصرفی از نوع طبیعی با چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، جذب آب ۲/۷ درصد و مدول نرمی ۳/۳ بود. دانه بندی سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان و پوزولان مصرفی

نوع	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									مشخصات فیزیکی
	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>	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	
سیمان (D)	۲۰/۷۵	۴/۷۲	۴/۱۶	۶۳/۸۰	۱/۲۱	۰/۲۸	۰/۶۹	۲/۲۵	۳۱۷۰	۳۳۸
سیمان (T)	۲۱/۳۵	۴/۶۵	۳/۷۲	۶۳/۳۴	۲/۵۴	۰/۳۱	۰/۶۴	۱/۷۶	۳۱۸۰	۳۱۷
سیمان (K)	۲۱/۵۸	۵/۰۰	۴/۵۰	۶۲/۳۳	۱/۹۳	۰/۴۲	۰/۹۳	۲/۴۲	۳۱۴۰	۳۲۶
سرباره	۳۶/۳۹	۱۰/۴۰	۱/۰۴	۳۷/۸۱	۹/۰۶	۰/۷۵	۰/۵۷	۲/۰۲	۲۹۰۰	۴۵۰
زئولیت	۶۹/۷۸	۱۲/۴۵	۰/۶۶	۲/۶۱	۱/۱۵	۱/۹۳	۰/۶۳	۰/۱۴	۲۱۰۰	۴۰۰
ولاستونیت	۵۱/۷۲	-	-	۴۸/۲۸	-	-	-	-	۲۸۰۰	-
پومیس	۶۱/۳۰	۱۸/۸۰	۵/۵۰	۸/۵۰	۲/۲۰	۱/۶۰	۱/۹۰	۰/۲۰	۲۶۳۰	۴۵۰

جدول ۲- فازهای سیمان مصرفی

نسبت C <sub>3</sub> S / C <sub>2</sub> S	فازهای سیمان				سیمان
	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	
۳/۵۹	۱۲/۹۵	۵/۵۰	۵۷/۹۰	۱۶/۱۰	سیمان (D)
۲/۲۷	۱۱/۳۲	۶/۰۳	۵۱/۶۰	۲۲/۷۲	سیمان (T)
۱/۴۵	۱۳/۶۹	۵/۶۴	۴۲/۸۱	۲۹/۵۷	سیمان (K)

جدول ۳- دانه بندی سنگدانه مصرفی

چشمه الک (میلیمتر)	۰/۱۵	۰/۳	۰/۶	۱/۱۸	۲/۳۸	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹
شن درشت دانه (%)	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵	۴/۹	۴۶/۸	۹۵/۸
شن ریز دانه (%)	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۳	۷۴/۱	۹۹/۶	۱۰۰
ماسه (%)	۹/۸	۲۵/۵	۳۶/۳	۴۵/۱	۶۵/۷	۹۵/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

## ۲.۲ نسبت‌های مخلوط

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر نوع مخلوط و پوزولان‌های مختلف روی نتایج مقاومت الکتریکی از سه نوع مخلوط به ترتیب، بتن هوادار با کارایی پایین (مقدار هوای ۳ تا ۱۲ درصد و اسلامپ ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر)، ملات با کارایی بالا (جریان اسلامپ ۶۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر) و همچنین بتن خودتراکم (جریان اسلامپ ۶۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر) در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۲۸/ تا ۳۴/۰ استفاده شد. ۱۱ طرح مخلوط بتن هوادار با عیار مواد سیمانی ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب، نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۲۸/ تا ۳۴/۰ و جایگزینی ترکیبی پوزولان‌ها؛ سه مخلوط ملات با عیار مواد سیمانی ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب با سه سیمان نوع ۱ تهیه شده از ۳ کارخانه مختلف با نسبت آب به مواد سیمانی ۳۲/۰ حاوی پوزولان زئولیت و سربراره؛ و همچنین پنج طرح مخلوط بتن خودتراکم با مقدار مواد سیمانی ۳۲/۰ حاوی پوزولان زئولیت و سربراره؛ و همچنین پنج طرح مخلوط بتن دو نسبت آب به مواد سیمانی ۳۳/۰ و ۳۴/۰، ساخته شدند. نسبت‌های حجمی سنگدانه‌های مصرفی در دانه بندی-های مختلف در جدول ۴ و جزئیات نسبت‌های وزنی مواد، مصالح مصرفی در مخلوط‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. حروف S, Z, P و W در جدول ۵ به ترتیب معرف سربراره، زئولیت، پومیس و ولاستونیت هستند و عدد مقابل آنها در کد مخلوط، درصد استفاده از این پوزولان‌ها را نسبت به کل مواد سیمانی نشان می‌دهد. آخرین عدد ارائه شده در کد مخلوط مربوط به نسبت آب به مواد سیمانی است. حروف SCC در ابتدای کد مخلوط‌ها نشان‌دهنده‌ی مخلوط-های بتن خودتراکم و حروف CEM نشان‌دهنده‌ی ملات‌های ساخته شده با سه محصول سیمان است. در کد مخلوط‌های بتن هوادار فقط مقدار پوزولان مصرفی و نسبت آب به مواد سیمانی آورده شده است. لازم به ذکر است که کلیه مخلوط‌های بتن خودتراکم دارای محدوده جریان اسلامپ ۶۵۰-۷۵۰ میلی‌متر، زمان قیف ۷، ۵ تا ۱۲ ثانیه، زمان T<sub>50</sub> بین ۲ تا ۵ ثانیه و شاخص پایداری چشمی ۰ یا ۱ بودند.

جدول ۴- نسبت‌های حجمی سنگدانه مصرفی در بتن

نسبت‌های حجمی سنگدانه مصرفی	شماره دانه بندی		
	شن درشت دانه	شن ریز دانه	ماسه
۰/۴	۰/۶	۰/۰	۱
۱/۰	۰/۰	۰/۰	۲
۰/۷	۰/۲۱	۰/۰۹	۳

جدول ۵- نسبت‌های مخلوط طرح‌ها بصورت وزنی در یک متر مکعب

شماره	کد مخلوط	w/b	پوزولان				سیمان	شماره دانه بندی	افزودنی		هوای بتن (درصد)
			سرپاره (S)	زنولیت (Z)	ولاستونیت (W)	پومیس (P)			(درصد وزنی مواد سیمانی)		
			کیلوگرم بر متر مکعب						فوق روان کننده	حباساز	
۱	S36-0.28	۰/۲۸	۳۲۰	۱۸۰	-	-	-	۱/۱۷	۰/۲۹	۱۲/۰	
۲	S40-0.3	۰/۳۰	۳۰۰	۲۰۰	-	-	-	۰/۳۴	۰/۱۲	۷/۸	
۳	S32Z8-0.28	۰/۲۸	۳۰۰	۱۶۰	۴۰	-	-	۰/۶۱	۰/۱۲	۶/۱	
۴	S32W8-0.3	۰/۳۰	۳۰۰	۱۶۰	-	۴۰	-	۰/۴۰	۰/۱۰	۵/۱	
۵	S34W16-0.3	۰/۳۰	۲۵۰	۱۷۰	-	۸۰	-	۰/۴۲	۰/۱۲	۶/۹	
۶	S34P16-0.3	۰/۳۰	۲۵۰	۱۷۰	-	-	۸۰	۰/۴۸	۰/۱۱	۷/۸	
۷	S33Z5W5-0.3	۰/۳۰	۲۸۵	۱۶۵	۲۵	۲۵	-	۰/۴۳	۰/۱۴	۷/۲	
۸	S52Z8-0.3	۰/۳۰	۲۰۰	۲۶۰	۴۰	-	-	۰/۵۰	۰/۱۰	۳/۵	
۹	S36Z8-0.28	۰/۲۸	۲۸۰	۱۸۰	۴۰	-	-	۰/۶۱	۰/۱۲	۴/۰	
۱۰	S40Z20-0.34	۰/۳۴	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰	-	-	۰/۶۲	۰/۱۳	۵/۱	
۱۱	S32Z8-0.3	۰/۳۰	۳۰۰	۱۶۰	۴۰	-	-	۰/۴۷	۰/۱۲	۳/۰	
۱۲	CEMT-S28Z8-0.32	۰/۳۲	۳۲۰	۱۴۰	۴۰	-	-	۰/۴۰	-	۲/۰	
۱۳	CEMD-S28Z8-0.32	۰/۳۲	۳۲۰	۱۴۰	۴۰	-	-	۰/۴۰	-	۱/۹	
۱۴	CEMK-S28Z8-0.32	۰/۳۲	۳۲۰	۱۴۰	۴۰	-	-	۰/۴۰	-	۱/۷	
۱۵	SCC-S30-0.34	۰/۳۴	۳۸۵	۱۶۵	-	-	-	۰/۵۰	-	۱/۰	
۱۶	SCC-S21Z15-0.33	۰/۳۳	۳۵۲	۱۱۶	۸۲	-	-	۰/۶۳	-	۱/۲	
۱۷	SCC-S28Z8-0.34	۰/۳۴	۳۵۲	۱۵۴	۴۴	-	-	۰/۷۴	-	۱/۵	
۱۸	SCC-S26Z10-0.34	۰/۳۴	۳۵۲	۱۴۳	۵۵	-	-	۰/۸۹	-	۱/۰	
۱۹	SCC-S20Z8P8-0.34	۰/۳۴	۳۵۲	۱۱۰	۴۴	۴۴	-	۰/۶۵	-	۱/۳	

### ۳. آزمایش‌ها

#### ۳.۱ آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی کلیه مخلوط‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی-متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از نمونه‌گیری از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمون در دمای  $21 \pm 2$  درجه سلسیوس در حوضچه‌های آب و آهک عمل آوری شدند. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی با استفاده از دستگاه چهار نقطه‌ای ونر محصول شرکت پروسک با نام تجاری Resipod (در شکل ۱ نمایش داده شده است) با فواصل یکسان ۳۸ میلی‌متری نقاط پرآب از هم انجام گرفت. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها مطابق استاندارد [13] AASHTOT358 انجام شد. با توجه به استاندارد، به دلیل عمل-آوری نمونه‌ها در حوضچه‌ی آب و آهک نتایج آزمون مقاومت الکتریکی سطحی درضریب ۱/۱ ضرب و گزارش شد. مقاومت الکتریکی حجمی روی همان نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر با استفاده از همان دستگاه شرکت انجام شد. اسفنج‌های دستگاه به حالت اشباع از آب درآمده و سپس به همراه الکتروود رسانا در ابتدا و انتهای آزمون قرار داده می‌شوند به گونه‌ای که الکتروودها کاملاً در تماس با اسفنج اشباع درآیند. نحوه اندازه‌گیری حجمی مقاومت الکتریکی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه‌ی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی حجمی آزمونه



شکل ۱- نحوه‌ی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی آزمونه

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴.۱ مقاومت الکتریکی سطحی

در شکل ۳ و ۴، به ترتیب نتایج مقاومت الکتریکی سطحی مخلوط‌های بتن هوادار، بتن خودتراکم و ملات‌های ساخته‌شده با استفاده از سیمان نوع ۱ تهیه شده از ۳ کارخانه مختلف (K و T،D) ارائه شده است. به منظور مقایسه ساده‌تر نتایج این مخلوط‌ها داده‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه حاصل از اندازه‌گیری در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که در شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نتایج مقاومت الکتریکی صرف از نظر از نوع و مشخصات مخلوط افزایش می‌یابد. با مقایسه‌ی دو مخلوط بتن هوادار S40-0.3 و S36-0.28 با جایگزینی تقریباً یکسان سرباره مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث بهبود مقاومت الکتریکی شده است، این در حالی است که درصد هوای مخلوط S36-0.28، ۱۲ درصد و S40-0.3، ۷/۸ درصد اندازه‌گیری شده است. این بهبود مقاومت در سن ۲۸ روز و ۵۶ روز به ترتیب ۱۱ و ۸ درصد بوده است. همچنین با مقایسه‌ی دو مخلوط S32Z8-0.3 و S32Z8-0.28 حاوی ترکیب سرباره و ژئولیت نیز می‌توان مشاهده نمود که روند مشابهی حاصل شده است. مخلوط S32Z8-0.28 با مقدار هوای حدود ۲ برابر بیشتر و نسبت آب به مواد سیمانی کمتر نتایج مقاومت الکتریکی سطحی بهتری را در سنین مختلف نشان داده است. به ترتیب در سن ۲۸ و ۵۶ روز، مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، ۴۴ درصد و ۸ درصد مقاومت الکتریکی بالاتری از مخلوط دیگر دارد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری به خوبی نشان‌دهنده‌ی تاثیر بیشتر نسبت آب به مواد سیمانی در مقایسه با مقدار هوای بتن است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با مقایسه نتایج دو مخلوط S32Z8-0.28 و S36Z8-0.28 با مقادیر تقریباً یکسان جایگزینی سرباره و پوزولان ژئولیت و نسبت آب به مواد سیمانی برابر، پس از سن ۵۶ روز، نتایج مقاومت الکتریکی بالاتری برای مخلوط S36Z8-0.28 با مقدار هوای کمتر (مخلوط S36Z8-0.28 و S32Z8-0.28 به ترتیب ۴/۰ و ۶/۱ درصد هوا دارند) اندازه‌گیری شده است. در سن ۶۳ روز ۶ درصد و در سن ۷۷ روز ۲۶ درصد مقاومت الکتریکی بالاتری در مخلوط با مقدار هوای کمتر مشاهده شد. در سنین پایینتر نتایج عکسی برای این دو مخلوط یافت شده است. این نتیجه عکس که تا سن ۲۸ روز ادامه دارد، می‌تواند ناشی از جایگزینی بیشتر سرباره به جای سیمان مصرفی در مخلوط S36Z8-0.28 باشد که سرعت انجام واکنش هیدراسیون و در نتیجه کاهش خلل و فرج را در سنین پایین کاهش داده است (در مقایسه با دیگر مخلوط) [14]. نتایج این دو مخلوط نشان می‌دهد که افزایش مقدار هوای بتن در شرایط یکسان می‌تواند باعث کاهش نتایج مقاومت الکتریکی گردد. با مشاهده‌ی نتایج دو مخلوط S34W16-0.3 و S34P16-0.3 در شکل ۳ با مقادیر جایگزینی به ترتیب ۱۶ درصد ولاستونیت و ۱۶ درصد پومیس و مقدار سرباره و آب به مواد سیمانی برابر می‌توان دریافت که تا سن ۵۶ روز تقریباً این دو پوزولان عملکرد مشابهی را از نظر مقاومت الکتریکی داشتند اما پس از سن ۵۶ روز، نتایج بهتری برای مخلوط حاوی پومیس حاصل شده است (درصد هوای دو مخلوط تقریباً برابر است). مخلوط حاوی پومیس در سن ۶۳

روز ۸ درصد و در سن ۷۷ روز ۱۰ درصد نتایج مقاومت الکتریکی بالاتری از مخلوط حاوی ولاستونیت داشته است. با مقایسه دو طرح S40-0.3 و S32W8-0.3 می‌توان مشاهده کرد که جایگزینی ۸ درصدی ولاستونیت به جای سربراره باعث کاهش مقاومت الکتریکی در سنین مختلف آزمون شده است. این افت مقاومت در سن ۲۸ روز ۱۴ درصد و در سن ۵۶ روز ۱۷ درصد بوده، این در حالی است که مخلوط دارای ۴۰ درصد سربراره (S40-0.3) دارای مقدار هوای بیشتری نیز هست.

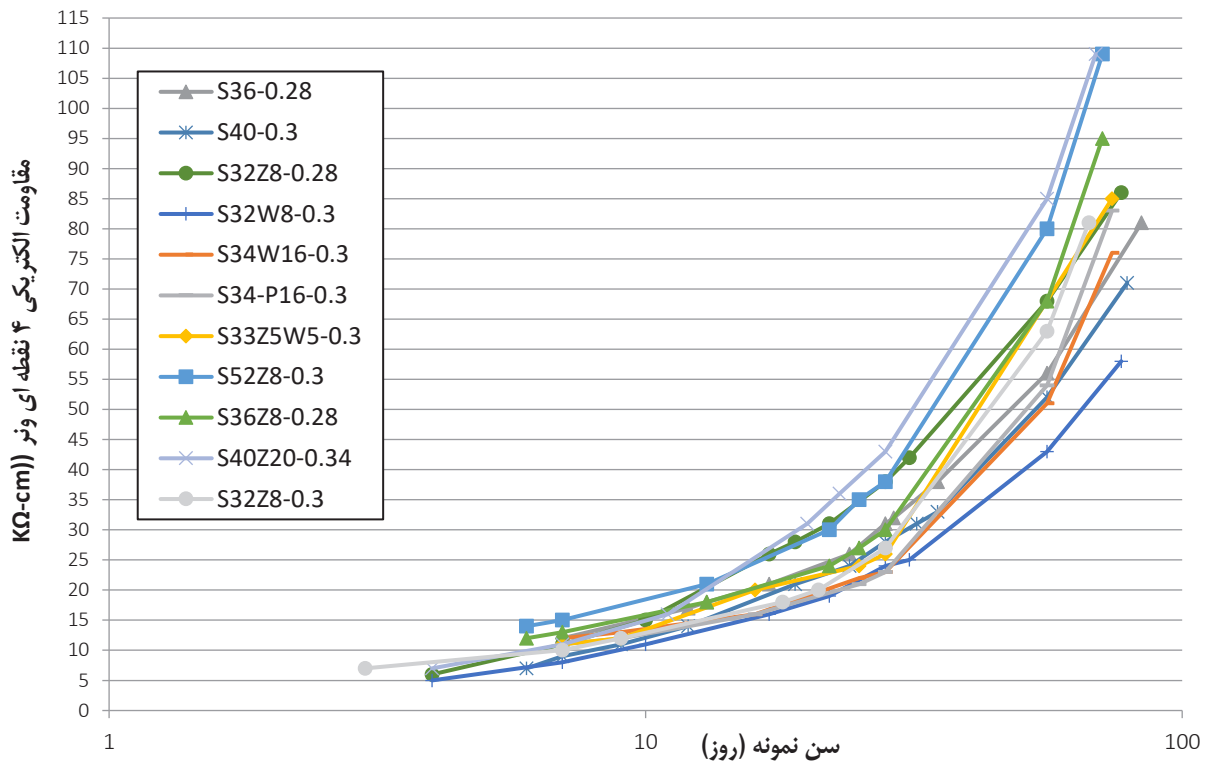
با افزایش مقدار جایگزینی پوزولان‌ها به جای سیمان مصرفی از ۴۰ به ۶۰ درصد نتایج بهتری حاصل شد. با مشاهده نتایج مقاومت الکتریکی دو طرح S52Z8-0.3 و S32Z8-0.3 به ترتیب با مقادیر ۵۲ و ۳۲ درصد سربراره و مقدار ژئولیت و نسبت آب به مواد سیمانی برابر می‌توان به وضوح مشاهده کرد که افزایش مقدار جایگزینی مواد سیمانی باعث بهبود قابل توجه مقاومت الکتریکی شده است. در سن ۲۸ روز، ۳۷ درصد و در سن ۵۶ روز، ۲۷ درصد افزایش مقاومت الکتریکی حاصل شده که با افزایش سن عمل آوری این بهبود، ادامه یافته است. علاوه بر این، با مشاهده نتایج مقاومت الکتریکی دو مخلوط S40Z20-0.34 و S52Z8-0.3 می‌توان دریافت، مخلوط S40Z20-0.34 که حاوی ۲۰ درصد ژئولیت و ۴۰ درصد سربراره است نتایج مقاومت الکتریکی بیشتری را از مخلوط S52Z8-0.3 با ۵۲ درصد سربراره و ۸ درصد ژئولیت، در سنین پس از ۱۴ روز کسب کرده است. در سن ۲۸ روز ۱۱ درصد و در سن ۵۶ روز ۶ درصد مقاومت الکتریکی مخلوط S40Z20-0.34 بالاتر از مخلوط دیگر بود. این در حالی است که مخلوط S52Z8-0.3 دارای نسبت آب به مواد سیمانی کمتر و ۱/۶ درصد، مقدار هوای بیشتری از مخلوط S40Z20-0.34 است. به نظر می‌رسد مقاومت الکتریکی کمتر مخلوط حاوی جایگزینی ۲۰ درصد ژئولیت در سنین کمتر از ۱۴ روز به علت خلل و فرج بیشتر این مخلوط به دلیل درصد هوای بیشتر و نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر باشد که با افزایش سن عمل آوری، واکنش هیدراسیون کامل‌تر شده و در ادامه آن، انجام واکنش پوزولانی، کاهش خلل و فرج ریزساختار بتن را در پی داشته که بهبود مقاومت الکتریکی در سنین بالاتر مشاهده می‌گردد [15].

با مشاهده نتایج مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتن خودتراکم ارائه شده در شکل ۴ می‌توان دریافت که مخلوط SCC-S30-0.3 با وجود نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از سایر مخلوط‌ها، به دلیل جایگزینی کمتر پوزولان به جای سیمان مصرفی (۳۰ درصد جایگزینی وزنی سربراره به جای سیمان)، عملکرد ضعیف‌تری را نسبت به سایر مخلوط‌ها نشان داده است. به نظر می‌رسد که پوزولان سربراره به علت مقدار عنصر  $\text{SiO}_2$  کمتر در مقایسه با سایر پوزولان‌ها (در جدول ۱ قابل مشاهده است) و مقدار زیاد  $\text{CaO}$ ، بیشتر خاصیت سیمانی ایفا کرده و واکنش پوزولانی کمتری در این مخلوط در مقایسه با سایر مخلوط‌ها انجام شده (تبدیل پورتلندیت به کلسیم سیلیکات هیدراته) که در نتیجه رشد مقاومت الکتریکی کم‌تری را در پی داشته است.

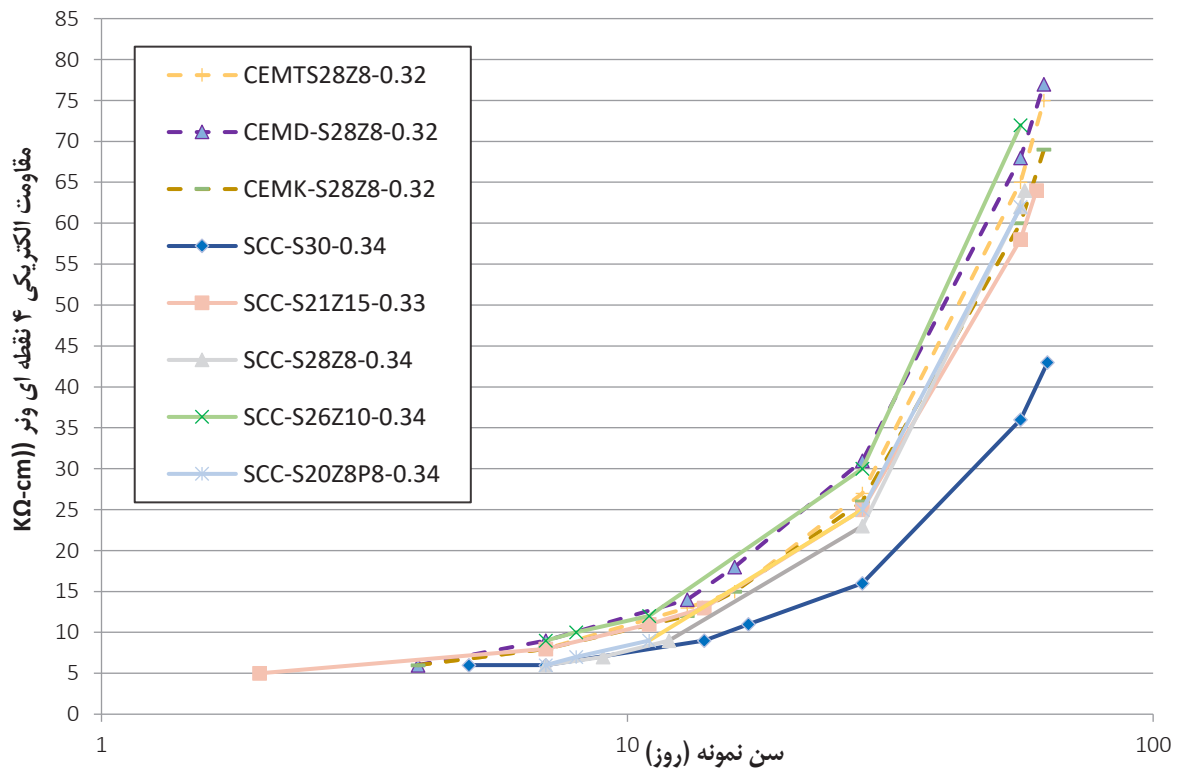
با مقایسه نتایج الکتریکی مخلوط‌های ساخته شده با سه سیمان نوع ۱ از سه کارخانه مختلف ارائه شده در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که مخلوط CEMD-S28Z8-0.32 در مقایسه با دو مخلوط دیگر، نتایج مقاومت الکتریکی بهتری را کسب کرده است. با مشاهده داده‌های جدول ۲ مربوط به فازهای مختلف سیمان می‌توان دریافت که فاز  $\text{C}_3\text{S}$  سیمان مربوط به این کارخانه بیشترین مقدار و فاز  $\text{C}_2\text{S}$  کمترین مقدار را دارد. به بیانی دیگر نسبت  $\text{C}_3\text{S} / \text{C}_2\text{S}$  سیمان تولیدی این کارخانه در مقایسه با دو کارخانه دیگر مقادیر بیشتری دارد. مقاومت الکتریکی مخلوط ساخته شده با سیمان D، ۱۳ درصد بیشتر از مقاومت الکتریکی مخلوط ساخته شده با سیمان K و ۵ درصد بیشتر از سیمان T در سن ۵۶ روز است. نسبت  $\text{C}_3\text{S} / \text{C}_2\text{S}$  سیمان نشان دهنده‌ی سرعت کسب مقاومت سیمان است که بالاتر بودن این نسبت به سرعت کسب مقاومت سریع‌تر سیمان دلالت دارد [16].

در مجموع، با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که کاهش مقدار سیمان مصرفی و جایگزینی آن با پوزولان و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در مخلوط‌ها بیشترین اثر را در کسب نتایج بهتر مقاومت الکتریکی داشتند. برای ترکیبات حاوی پوزولان طبیعی ژئولیت بهترین نتایج و برای پوزولان ولاستونیت ضعیف‌ترین نتایج مقاومت الکتریکی حاصل شد (در شکل ۳ قابل مشاهده است).





شکل ۳- نتایج مقاومت الکتریکی سطحی مخلوط‌های بتن هوادار شده



شکل ۴- نتایج مقاومت الکتریکی سطحی مخلوط‌های بتن خودتراکم و ملات با کارایی زیاد

به منظور ارزیابی و دسته بندی مخلوطها از لحاظ نفوذ پذیری، در استاندارد [13] AASHTO T358 جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از مقاومت الکتریکی سطحی مخلوطها در سنین ۲۸ روز با محدوده‌ی ارائه شده توسط استاندارد مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، تمامی مخلوطهای ساخته شده به غیر از مخلوط SCC-S30-0.3 از نظر نفوذ پذیری در رده‌ی کم و بسیار کم هستند. دو مخلوط S40Z20-0.34 و S52Z8-0.3 با ۶۰ درصد جایگزینی پوزولان به جای سیمان مصرفی در رده‌ی نفوذ پذیری بسیار کم دسته بندی شده است که بر اهمیت کاهش مقدار سیمان مصرفی و جایگزینی آن با پوزولانها در نتیجه بهبود دوام بتن دلالت دارد.

جدول ۶- رده بندی نفوذ پذیری یون کلرید [13]

مقادیر مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه (کیلو اهم- سانتی متر)	نفوذ پذیری یون کلرید
۱۲ <	زیاد
۲۱-۱۲	متوسط
۳۷-۲۱	کم
۲۵۴-۳۷	بسیار کم
>۲۵۴	ناچیز

جدول ۷- نتایج مقاومت الکتریکی در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز به همراه رده بندی نفوذ یون کلرید

ردنه نفوذ پذیری [13] (نتایج ۲۸ روزه معیار است)	مقاومت الکتریکی سطحی (کیلو اهم- سانتی متر)			کد طرح	شماره
	سن ۵۶ روز	سن ۲۸ روز	سن ۷ روز		
کم	۵۶	۳۱	۱۲	S36-0.28	۱
کم	۵۲	۲۸	۹	S40-0.3	۲
کم	۶۸	۳۹	۱۱	S32Z8-0.28	۳
کم	۴۳	۲۴	۸	S32W8-0.3	۴
کم	۵۱	۲۳	۱۲	S34W16-0.3	۵
کم	۵۴	۲۳	۱۱	S34P16-0.3	۶
کم	۵۸	۲۷	۱۱	S33Z5W5-0.3	۷
بسیار کم	۸۰	۳۸	۱۵	S52Z8-0.3	۸
کم	۶۸	۳۰	۱۳	S36Z8-0.28	۹
بسیار کم	۸۵	۴۳	۱۱	S40Z20-0.34	۱۰
کم	۶۳	۲۷	۱۰	S32Z8-0.3	۱۱
کم	۶۵	۲۷	۸	CEMT-S28Z8-0.32	۱۲
کم	۶۸	۳۱	۹	CEMD-S28Z8-0.32	۱۳
کم	۶۰	۲۶	۸	CEMK-S28Z8-0.32	۱۴
متوسط	۳۶	۱۶	۶	SCC-S30-0.34	۱۵
کم	۵۸	۲۵	۸	SCC-S21Z15-0.33	۱۶
کم	۶۲	۲۳	۶	SCC-S28Z8-0.34	۱۷
کم	۷۲	۳۰	۹	SCC-S26Z10-0.34	۱۸
کم	۶۱	۲۵	۶	SCC-S20Z8P8-0.34	۱۹

## ۴.۲ مقاومت الکتریکی حجمی

نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی حجمی در جدول ۸ آورده شده است. مقاومت الکتریکی حجمی در تمامی سنینی که مقاومت الکتریکی سطحی انجام گرفته اندازه‌گیری نشده است و اندازه‌گیری آن در این سنین با هدف بررسی چگونگی ارتباط این دو پارامتر با یکدیگر بوده است.

جدول ۸- نتایج مقاومت الکتریکی حجمی در سنین مختلف اندازه‌گیری

شماره	کد طرح	سن (روز)	مقاومت الکتریکی (کیلو اهم - سانتی متر)	سن (روز)	مقاومت الکتریکی (کیلو اهم - سانتی متر)
۱	S36-0.28	۴۲	۲۳	۸۴	۴۴
۲	S40-0.3	۳۳	۱۸	۷۹	۳۹
۳	S32Z8-0.28	۳۱	۲۳	۷۷	۴۹
۴	S32W8-0.3	۳۱	۱۴	۷۷	۳۳
۵	S34W16-0.3	۲۸	۱۲	۷۴	۴۰
۶	S34P16-0.3	۲۸	۱۲	۷۴	۴۷
۷	S33Z5W5-0.3	۲۸	۱۳	۷۴	۴۴
۸	S52Z8-0.3	۲۵	۱۷	۷۱	۵۸
۹	S36Z8-0.28	۲۵	۱۴	۷۱	۵۰
۱۰	S40Z20-0.34	۲۳	۱۸	۶۹	۵۸
۱۱	S32Z8-0.3	۲۱	۱۱	۶۷	۴۴
۱۲	CEMT-S28Z8-0.32	۱۶	۷	۶۲	۳۸
۱۳	CEMD-S28Z8-0.32	۱۶	۹	۶۲	۴۰
۱۴	CEMK-S28Z8-0.32	۱۶	۷	۶۲	۳۲
۱۵	SCC-S30-0.34	۱۷	۵	۶۳	۲۴
۱۶	SCC-S21Z15-0.33	۱۳	۷	۶۰	۳۵
۱۷	SCC-S28Z8-0.34	۱۲	۴	۵۷	۳۲
۱۸	SCC-S26Z10-0.34	۱۱	۶	۵۷	۴۱
۱۹	SCC-S20Z8P8-0.34	۱۱	۵	۵۶	۳۶

## ۴.۳ ارتباط بین مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی بتن

با هدف بررسی چگونگی ارتباط بین نتایج مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی بتن از آنالیز رگرسیونی استفاده شده است. نتیجه‌ی این بررسی در شکل ۵ ارائه شده و نتیجه حاصل از این ارتباط در معادله‌ی ۱ ارائه شده است (این ارتباط بین نتایج مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی در سنین بین ۱۱ تا ۸۴ روز برقرار شده است). همانگونه که مشاهده می‌شود ارتباط قوی بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، صرف نظر از نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین مقدار هوای بتن، رابطه‌ی خطی بین نتایج حاصل شده است. نتیجه‌ی به دست آمده نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی حجمی در حدود ۵۴ درصد مقاومت الکتریکی سطحی بتن است. ارتباط به دست آمده در این پژوهش با شرایط دمایی عمل‌آوری نمونه‌ها در محدوده‌ی  $2 \pm 21$  درجه سلسیوس است و با تغییر این شرایط ممکن است که نتایج بدست آمده دچار تغییر شود (محدوده دمایی ذکر شده در استاندارد ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس است).

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دمای عمل‌آوری آزمون‌ها، به ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش دما سه درصد افت مقاومت الکتریکی سطحی اتفاق می‌افتد [12]. ولی در مورد مقاومت الکتریکی حجمی موردی ذکر نشده که باید بررسی گردد.

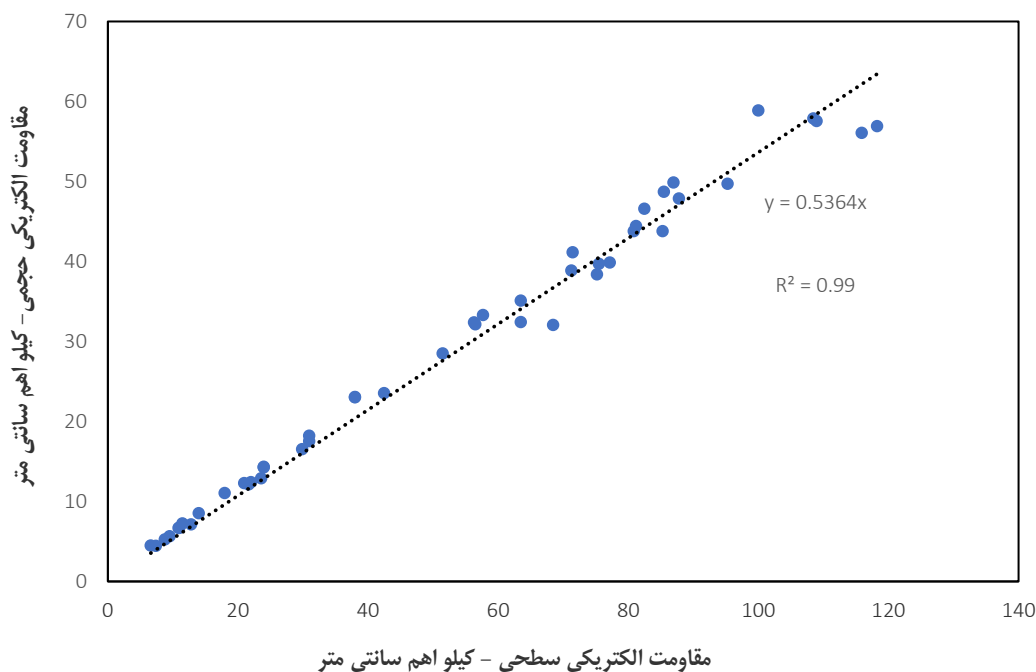
$$BR=0.5364*SR, R^2=0.996$$

(۱)

که در آن:

BR: مقاومت الکتریکی حجمی بتن بر حسب کیلو اهم سانتی متر

SR: مقاومت الکتریکی سطحی بتن بر حسب کیلو اهم سانتی متر



شکل ۵- ارتباط بین نتایج مقاومت الکتریکی سطحی و حجمی بتن

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش روی ۱۹ مخلوط شامل بتن هوادار، بتن خودتراکم و ملات با کارایی بالا مطالعه انجام گرفت. به منظور ارزیابی مقاومت الکتریکی این مخلوط‌ها پوزولان‌های مختلف شامل زئولیت، پومیس، ولاستونیت و سرباره در ترکیبات مختلف بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ جایگزین سیمان مصرفی شدند. نتایج زیر حاصل این بررسی است:

- با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، نتایج مقاومت الکتریکی صرف از نظر از نوع و مشخصات مخلوط افزایش یافت. این بهبود مقاومت الکتریکی و در نتیجه دوام بتن به نسبت آب به مواد سیمانی مخلوط، نوع پوزولان مصرفی، مقدار جایگزینی پوزولان و مقدار هوای بتن بستگی داشت.

- در بین پارامترهای تاثیر گذار روی مقاومت الکتریکی بتن کاهش مقدار سیمان مصرفی و جایگزینی آن با پوزولان و همچنین کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در مخلوط‌ها اثر بیشتری از سایر عوامل بررسی شده داشتند. در این

بین ترکیبات سرباره و پوزولان زئولیت بیشترین اثر و ترکیبات سرباره و ولاستونیت کمترین تاثیر را در بهبود نتایج مقاومت الکتریکی داشتند.

- بررسی تاثیر سیمان نوع یک سه کارخانه مختلف با ترکیبات شیمیایی نزدیک به هم بر روی مقاومت الکتریکی ملات با کارایی بالا نشان داد که نسبت فازهای  $C_3S / C_2S$  سیمان‌ها در نتایج مقاومت الکتریکی تاثیر گذار بوده و با افزایش این نسبت، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است. تاثیر نسبت فاز  $C_3S / C_2S$  سیمان‌ها در نتایج مقاومت الکتریکی ۵۶ روزه بین ۵ تا ۱۳ درصد بود.

- تمامی مخلوط‌های ساخته شده از لحاظ نفوذ یون کلرید با محدوده‌ی ارائه شده در استاندارد مقایسه و دسته بندی شدند. تمامی مخلوط‌های به غیر از مخلوط SCC-S30-0.3 با ۳۰ درصد جایگزینی سرباره، و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳، از لحاظ نفوذ پذیری یون کلرید در رده‌ی کم و بسیار کم قرار گرفتند.

- نتیجه‌ی حاصل از آنالیز رگرسیون نشان داد که صرف نظر از نوع پوزولان مصرفی، سن عمل‌آوری، نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین مقدار هوای بتن، ارتباط قوی با ضریب  $R^2 = ۰/۹۹$  بین نتایج مقاومت الکتریکی حجمی و سطحی در سنین مختلف وجود دارد. مقاومت الکتریکی حجمی بتن در حدود ۵۴ درصد مقاومت الکتریکی سطحی بتن (با شرایط دمایی عمل‌آوری  $21 \pm 2$  درجه سلسیوس) بود.

## ۶. قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود را نسبت به حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و شرکت فهاب بتن اعلام می‌دارند.

## ۷. مراجع

[1]. Ghosh, P. and Q. Tran, Correlation between bulk and surface resistivity of concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2015. 9(1): p. 119-132.

[2]. Christensen, B.J., et al., Impedance spectroscopy of hydrating cement-based materials: measurement, interpretation, and application. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994. 77(11): p. 2789-2804.

[3]. Julio-Betancourt, G. and R. Hooton, Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. *Cement and concrete research*, 2004. 34(6): p. 1007-1015.

[4]. FDOT, F., FM 5-578: Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability. *Florida Department of Transportation*, 2004.

[5]. Kessler, R.J., R.G. Powers, and M.P. Mario Paredes. Resistivity measurements of water saturated concrete as an indicator of permeability. in *CORROSION 2005*. 2005. OnePetro.

[6]. Tikalsky, P., et al., Development of performance properties of ternary mixtures: laboratory study on concrete. 2011, Iowa State University. *National Concrete Pavement Technology Center*.

- [7]. Marriaga, J., P. Claisse, and E. Ganjian. *Application of traditional techniques on chloride resistance assessment of GGBS concrete. in Proceedings of Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2010.*
- [8]. Icenogle, P.J. and T.D. Rupnow, *Development of precision statement for concrete surface resistivity. Transportation research record, 2012. 2290(1): p. 38-43.*
- [9]. Lim, D.T., et al., *Evaluation of high performance concrete using electrical resistivity technique. Proceedings of the Our World in Concrete and Structures, 2011.*
- [10]. Newlands, M.D., et al., *Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete. Materials and structures, 2008. 41(4): p. 621-632.*
- [11]. Spragg, R.P., et al., *Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. Advances in Civil Engineering Materials, 2012. 1(1): p. 1-17.*
- [12]. Elkey, W. and E.J. Sellevold, *Electrical resistivity of concrete. 1995.*
- [13]. AASHTO, *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2015, AASHTO USA.*
- [14]. Li, Z., X. Wei, and W. Li, *Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurements. Materials Journal, 2003. 100(3): p. 253-257.*
- [15]. Poppe, A.-M. and G. De Schutter, *Cement hydration in the presence of high filler contents. Cement and Concrete Research, 2005. 35(12): p. 2290-2299.*
- [16]. Ben-Bassat, M., P. Nixon, and J. Hardcastlet, *The effect of differences in the composition of Portland cement on the properties of hardened concrete. Magazine of Concrete Research, 1990. 42(151): p. 59-66.*