

Laboratory Monitoring of Electrical Resistance of Concrete

*Ali Akbar Kafash Bazari**

*Chief of research and development of Tehran cement Co, Tehran, Iran
kafash@tehrancement.co.ir*

Mahdi Chini

*Assistant Professor of Road, Housing and Urban Development Research Centre, Tehran, Iran
m.chini@bhrc.ac.ir*

Abstract

Common methods of controlling setting, hardness, process of strength growth of concrete are tests for determining the setting time of mortar (ISIRI 392) and concrete (ISIRI 6046) and determining the compressive strength of concrete (ISIRI 3206). Since these physical and mechanical methods do not fully reflect the behavior of concrete and also it's time and money consuming, application of electrical resistance of concrete has been investigated. Therefore, in this study, an extensive laboratory operation was designed. In the first stage, 11 samples of cement were prepared, the phases of which varied, but due to laboratory cementation, their fineness and grading were almost the same. Physical and chemical analysis of cement samples were performed. In the next step, 22 concrete mixtures with 11 cement samples were prepared, so that 11 mixtures with the title of control (without additives) and 11 mixtures with constant dosage of commercial super plasticizer (based on poly carboxylate). Compressive strength tests has been performed at ages of 7, 28 and 90 days. Also, an electrical resistance test was performed, which was performed regularly from the time of cement contact with water until 31 days later. The results showed that at least three peaks of 8, 16 and 23 days in the electrical resistance curve are seen along the test time. In almost all samples, the electrical resistance is reduced to about 3 hours, which indicates the setting time of the concrete. Based on the results of this study, formula was presented.

Keywords: *Electrical Resistance, Cement, Concrete, Additives.*

** Corresponding Author*

Kafash Bazari, A., Chini, M. (2021). 'Laboratory Monitoring of Electrical Resistance of Concrete (Research Note)', Journal of Concrete Structures and Materials, 6(2), pp. 249-265. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.320030.1241>

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/>).

پایش آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی بتن

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۱۱-۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱-۰۳-۲۲

علی اکبر کفاش بازاری

رئیس مرکز تحقیق و توسعه مجتمع صنعتی سیمان تهران، تهران، ایران

kafash@tehrancement.co.ir

(نویسنده مسئول)

مهدی چینی

استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهران، ایران

چکیده

روش‌های رایج کنترل گیرش، سخت‌شدگی، روند کسب مقاومت بتن، آزمایش‌های تعیین زمان گیرش ملات ISIRI 392 و بتن ISIRI 6046 و تعیین مقاومت فشاری بتن ISIRI 3206 می‌باشد. با توجه به اینکه این روش‌های فیزیکی و مکانیکی با چارچوب عملی معین و قراردادی، بطور کامل رفتار بتن و روند تغییرات حالات فازها طی فرآیند هیدراته شدن را نمایش نمی‌دهد و همچنین زمان بر و هزینه بر هستند، استفاده از روش مقاومت الکتریکی بتن، امکان این پایش را میسر کرده است. از این‌رو در این مطالعه با طراحی یک عملیات آزمایشگاهی گسترده، رفتار الکتریکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول ۱۱ نمونه سیمان تهیه شدند که مقادیر فازهای آنها تنوع داشتند، اما به واسطه سیمان‌سازی آزمایشگاهی، نرمی و دانه‌بندی آنها شرایط تقریباً یکسانی داشت. آنالیز فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های سیمان صورت گرفت. در مرحله بعد ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان تهیه گردید، بطوریکه ۱۱ مخلوط با عنوان شاهد (فاقد افزودنی) و ۱۱ مخلوط با مقدار ثابت افزودنی فوق روان‌کننده (بر پایه پلی‌کربوکسیلات) بودند. بر روی مخلوط‌های بتنی آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی انجام شد که از زمان تماس سیمان با آب تا ۳۱ روز بعد بطور مرتب قرائت‌ها صورت گرفت. نتایج حاصله، نشان داد که حداقل سه پیک ۸، ۱۶ و ۲۳ روز در منحنی مقاومت الکتریکی طی مرور زمان آزمایش دیده می‌شود. تقریباً در همه نمونه‌ها مقاومت الکتریکی تا حدود ۳ ساعت کاهش یافته است که زمان گیرش بتن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این مطالعه، روابطی ارائه شد. واژه‌های کلیدی: مقاومت الکتریکی، سیمان، بتن، افزودنی.

پایش‌های مقاومت الکتریکی بتن با هدف ارائه اطلاعات سریع‌تر و آسان‌تر توسعه یافته‌اند. برخی از این روش‌ها استاندارد شده‌اند و حداکثر مقادیر نتایج آزمون در مشخصات عملکرد ذکر شده است. روش‌های الکتروشیمیایی شامل اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت آن به عنوان روش‌هایی برای ارزیابی خواص انتقالی و همچنین تغییرات در محلول‌های منافذ و ریزساختارها در مواد پایه سیمانی پیشنهاد شده‌اند [۱-۲]. این روش‌ها علاوه بر سرعت زیاد، اجازه ادامه آزمایش همان نمونه را حین کار و بدون ایجاد اختلال در آن را به ما می‌دهد. استفاده از روش مقاومت الکتریکی توسط محقق ژاپنی شیمیزو (۱۹۲۸) آغاز شد که سیمان پرتلند را با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آن مورد مطالعه قرار داد [۳]. این روش در علم بتن مدرن برای تعیین میزان آب در بتن [۴] نسبت آب به سیمان [۵]، تحقیق در مراحل اولیه گیرش خمیر سیمان و سفت شدن ملات [۶-۱۰]، تعیین زمان گیرش خمیر سیمان و بتن [۱۴-۱۰]، تحقیق و ارزیابی خواص ساختاری مختلف بتن‌ها از جمله ویژگی‌های نفوذپذیری آنها [۱۵-۱۹] و بررسی الگوهای مقاوم‌سازی [۲۰-۲۳] توسعه یافته است. مطالعات مونفور (۱۹۷۰) نیز در مورد خصوصیات الکتریکی بتن، به دو صورت DC^1 و AC^2 جهت بررسی تاثیر عمل‌آوری بتن بر مقاومت الکتریکی بتن بوده است [۲۴].

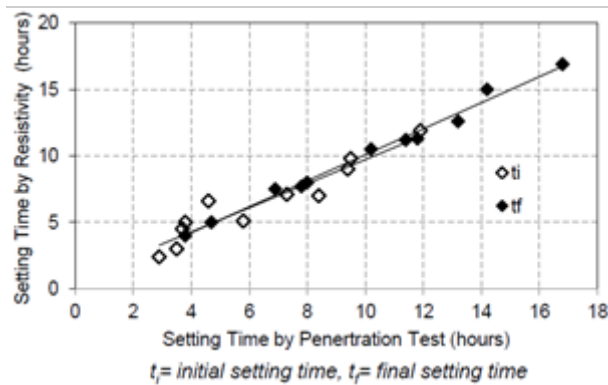
مایکل و همکاران (۲۰۰۶) مخلوط‌های بتنی مختلف با کارایی زیاد (HPC^3)، نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ حاوی، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره و نیز مخلوط بتنی معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۶۹ و سیمان پرتلند تهیه نمودند. آنها نمونه‌ها را در سه حالت اشباع، خشک و اشباع با سطح خشک (SSD) با نوار الکتریکی وینیل بسته‌بندی کردند. آزمون‌ها طی ۷ روز اول در دستگاه آزمایش استاندارد تعیین مقاومت الکتریکی بتن در برابر نفوذ یون کلرید (ASTM C1202) نگهداری شدند [۲۵] و سپس در اندازه‌گیری‌های بعدی در آب اشباع از آهک عمل‌آوری شدند. آزمایش دو نمونه مشابه در سنین مختلف ادامه داشت. هدایت الکتریکی با استفاده از تجهیزات این آزمایش اندازه‌گیری شد، اما چندین انحراف از روش آزمون استاندارد وجود داشته است. با توجه به رسانایی زیاد در سنین اولیه و حداکثر جریان مجاز ۵۰۰ میلی آمپر برای تجهیزات مورد استفاده، ۳۰ ولت به جای ۶۰ ولت معمول استفاده شد. محلول هیدروکسید سدیم ۰/۳ نرمال در هر دو محفظه آزمایش مصرف شده بود. این محققان یک روش خودکار برای جمع‌آوری داده‌ها در فواصل ۳ ساعته طی هفته اول و سپس در فواصل هفتگی تا رسیدن آزمون‌ها به سن ۲۸ روز استفاده کردند. در هر بازه آزمایش، ۳۰ ولت قبل از ثبت اندازه‌گیری مورد استفاده برای محاسبه رسانایی و ۱۵ دقیقه روی آزمون‌ها اعمال شده است. روش خودکار به کاربر اجازه می‌دهد که طی مدت زمان استفاده از ولتاژ مدنظر برای هر آزمایش، فاصله زمانی بین چرخه‌ها، تعداد چرخه‌ها و تعداد آزمون‌ها اعمال شود. در این مطالعه، تفاوت معنی‌داری میان اندازه‌گیری‌های انجام شده در ۵ و ۱۵ دقیقه وجود نداشته است. تاثیرات نسبت w/c و مواد مکمل سیمانی به وضوح در نتایج این مطالعه دیده شده است. بیشترین کاهش هدایت در هفته اول پس از عمل‌آوری رخ داده است. آنها با توجه به نتایج رابطه‌ای ارائه نمودند [۲۶].

لی و همکاران (۲۰۰۷) نتایج دو آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن تازه [۲۷] و تعیین مقاومت الکتریکی بتن را با هم مقایسه کردند که نشان داد ارتباط مستقیم و واضحی دارد (شکل ۱) [۲۸-۲۹].

¹ Direct current (DC)

² Alternating current (AC)

³ High-performance concrete (HPC)



شکل ۱: ارتباط زمان گیرش بتن و مقاومت الکتریکی آن [۲۸]

سنگول و جرو (۲۰۰۷) مقاومت الکتریکی برای کنترل کیفیت بتن حین ساخت و دوام آن را مطالعه نمودند. برنامه آزمایشگاهی این محققان عمدتاً بر اساس آزمایش الکتروود (ونر) مقاومت الکتریکی با فواصل پراب‌های مختلف و هندسه متفاوت آزمون‌ها بود. نتایج آنها نشان داد که برای شرایط آزمایش‌ها، مقاومت الکتریکی حاصل از روش ونر متفاوت از مقاومت کسب شده در روش دو الکتروود است. لذا نتیجه گرفتند که برای نوع خاصی از آزمون بتن با شرایط رطوبت و دما، روش ونر، یک روش آزمایشی مناسب و قابل اطمینان برای کنترل کیفیت مقاومت الکتریکی بر اساس عملکرد و در نتیجه دوام بتن است [۳۰].

اسپرگ و همکاران (۲۰۱۲) عوامل موثر بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در سیستم‌های سیمانی را بررسی نمودند. به زعم آنها چندین عامل کلیدی وجود دارد که می‌توانند نتایج مقاومت الکتریکی بتن را تحت تأثیر قرار دهند: هندسه، دما و عمل‌آوری آزمون. بنابراین آنها ابتدا با استفاده از سه هندسه متداول: الکتروودهای سطحی، تک محوری و جاسازی شده، نقش هندسه آزمون را بر مقاومت الکتریکی مطالعه نمودند. سپس نقش دمای آزمون و اهمیت عمل‌آوری (میزان هیدراته شدن و میزان اشباع) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که هر دو مقاومت محلول منافذ و اندازه‌گیری مقاومت آزمون از رابطه آرنیوس با انرژی فعال‌سازی مختلف هدایت (EA-Cond) پیروی می‌کند. همچنین آنها مشاهده کردند که وقتی آزمون‌های سخت شده در محلول‌های مختلف با حجم‌های مختلف عمل‌آوری می‌شوند، نتایج ناسازگار به دست می‌آید که به زعم آنها مربوط به رقیق شدن محلول منافذ است و به نظر می‌رسد که طیف فرکانس اندازه‌گیری شده را تغییر می‌دهد. به این ترتیب، آزمایش در فرکانس‌های متغیر، توانایی کاهش این اثرات را دارد، اما برای آزمایش در فرکانس ثابت حجم محلول اطراف آزمون باید به شدت کنترل شود [۳۱].

لیاسی و همکاران (۲۰۱۵) اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به دو روش تک محوره و ونر ارزیابی نمودند. بر این اساس، در حالی که روش تک‌محوری برای آزمون‌های بتنی یا مغزه‌های حفاری شده مناسب است، روش ونر انتخاب بهتری برای ارزیابی در محل است. رابطه غیرخطی بین مقاومت الکتریکی و مقادیر RCP1 تا حد زیادی نتیجه تغییرات در دما و خواص محلول منافذ در طول آزمایش RCP می‌باشد. رابطه بین مقاومت الکتریکی و ضریب نفوذ برای تعیین معیارهای مورد نیاز برای کنترل کیفیت بتن بر اساس دوام به ویژه معیارهای مورد نیاز برای طبقه بندی نفوذپذیری کلید بتن مناسب تر است [۳۲].

هیز و همکاران (۲۰۱۵) یک روش بهبود یافته برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن معرفی کردند که مشکلات ناشی از اثرات قطبی شدن و واکنش خازنی را برطرف می‌کند. نتایج بتن تازه و سخت شده حاصله با روش پیشنهادی نیز ارائه شد و با نتایج با استفاده از روش‌های مرسوم تر مقایسه گردید که مطلوب بوده است [۳۳].

¹ Rapid Chloride Penetration test (RCPT)

آذرسرا و گوپتا (۲۰۱۷) مقاومت الکتریکی بتن برای ارزیابی دوام را بطور مفصل بررسی نمودند. با توجه به نتایج مختلف و مقالات تحلیل شده، این محققان موارد زیر را تاکید نمودند: الف-تأثیر وجود میلگرد در بتن برای این ارزیابی؛ ب-وجود ترک و شواهد آن؛ ج-وضعیت رطوبت و دمای بتن [۲۲ و ۳۴] (حالت SSD توصیه شده است)؛ د- نحوه اتصال مناسب الکترودها ب بتن؛ ه-اثر نوع سنگدانه در نتایج؛ و- اثر فرآیند کربناته شدن؛ ز-اثر یون کلر (که با مقاومت رابطه معکوس دارد و همبستگی و رابطه مستقیم نتایج مقاومت الکتریکی بتن و میزان خوردگی‌ها)؛ ح-ارتباط مستقیم مقاومت فشاری بتن، مقاومت الکتریکی و تخلخل بتن [۳۵]؛ ط-نحوه آرایش هندسی قرارگیری الکترودها جهت اندازه‌گیری [۳۶-۳۷]؛ شرایط محیطی [۳۸].

میناگوا و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت الکتریکی بتن برای طراحی روش‌های ضد خوردگی الکتروشیمیایی یا شاخص دوام سازه‌های بتن مسلح را مطالعه کردند. در این مطالعه، مکانیسم وابستگی فاصله پراب‌ها به مقاومت الکتریکی ظاهری بتن با گرادیان رطوبت در جهت عمق بررسی شد. آنها مشاهده کردند که مقاومت الکتریکی ظاهری بتن با مقدار آب، عمق اندازه‌گیری و فواصل پراب‌ها ارتباط مستقیمی دارد [۳۹].

اوبلا و همکاران (۲۰۱۷) ارتباط مقاومت الکتریکی بتن تازه را با نسبت‌های مخلوط بتن ارزیابی نمودند. آنها مقاومت الکتریکی هر مخلوط را با یک قالب بتن تازه استوانه‌ای بررسی کردند. لذا نحوه تأثیر نسبت‌های مختلف مخلوط بتن (مقادیر مختلف سیمان و آب) بر مقاومت الکتریکی بتن ارزیابی شد. سیمان با تولید یون‌ها (عمدتا K^+ ، Na^+ و OH^-) که منبع اصلی هدایت الکتریکی می‌باشد و آب با ایجاد مجاری رسانا این اثر را می‌گذارد. در یازده مخلوط بتنی مذکور مقادیر w/c ، مقدار خمیر، میزان هوا، مقدار خاکستر بادی، میزان مصرف کننده کاهنده آب و مقدار قلیایی سیمان، متفاوت بود. به زعم آنها فقط اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن می‌تواند میزان عملکرد خمیر مخلوط یا محصول را پیش‌بینی کند [۴۰].

استاکلمبرگ و همکاران (۲۰۱۸) خواص ترکیبات سیمانی-بتنی (CCC1) را با استفاده از روش مقاومت الکتریکی بررسی نمودند. این ترکیبات طی فرآیند سخت شدن مداوم در حال تغییر هستند؛ بطوریکه در مراحل اولیه سخت شدن، خواص پلاستیکی چسبناک داشته، حال آنکه در ساختار نهایی، سنگ مصنوعی غالباً دارای خواص الاستیک است. پارامترهای فنی (نسبت w/c ، اسلامپ، زمان گیرش، مقاومت و غیره) نیز عمدتاً با یکدیگر ناسازگاری دارند. این امر، اجرای عملی و نظارت CCC را پیچیده می‌کند. در این مطالعه، از حسگرهای اندازه‌گیری مختلفی (سنسورهای الکتروود دوگانه نوع تستر [۹ و ۱۲]، سیستم‌های پیچیده بدون تماس [۶ و ۲۲] و چند الکتروود [۴۱] استفاده شده است [۴۲].

اوبلا و همکاران (۲۰۲۰) طی یک مطالعه مفصل بر روی مقاومت الکتریکی بتن، نتایج زیر را اعلام نمودند: ۱. طبقه‌بندی مخلوط‌های بتنی برای نفوذپذیری کلرید تا زمانی که از یک روش عمل‌آوری واحد استفاده شود، معتبر است؛ ۲. بسته به روش عمل‌آوری مورد استفاده و مقاومت اندازه‌گیری شده، مخلوط یکسان را می‌توان بر اساس معیارهای مربوطه در دو گروه مختلف برای نفوذپذیری کلرید طبقه‌بندی کرد؛ ۳. نتایج مقاومت سطحی حدود ۲۰-٪ کمتر از مقاومت اندازه‌گیری شده حجمی در آزمون‌های بتن در این مطالعه بود. در نتیجه، موارد متعددی وجود داشت که طبقه‌بندی نفوذپذیری کلرید بر اساس SR2 یک سطح از طبقه‌بندی بر اساس BR3 اندازه‌گیری شده را کاهش داد؛ ۴. نتایج رسانایی با نتایج RCP ارتباط خوبی دارد؛ ۵. درجه اشباع 4 اندازه‌گیری شده مخلوط‌های بتنی هوازائی شده به طور متوسط ۲۰٪ کمتر از مخلوط‌های معادل بتنی هوازائی نشده است. مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های بتنی هوازائی شده ۲۵٪ بیشتر و نتایج RCP5 در مقایسه با مخلوط‌های معادل بتن هوازائی

¹ *Cement-concrete Compositions (CCC)*

² *The Surface Resistivity (SR) Test*

³ *bulk resistivity (BR)*

⁴ *degree of saturation (DOS)*

⁵ *Chloride penetrability (RCP)*

نشده ۲۰٪ کمتر بود. برای یک مخلوط بتنی هوازائی شده، افزایش ۲-۳٪ میزان هوا، درجه اشباع را کمی کاهش داده و بر مقاومت تأثیر نمی‌گذارد؛ ۶. برای همه مخلوط‌های بتنی مورد ارزیابی، خشک شدن نمونه اشباع، مقاومت را افزایش می‌دهد؛ ۷. برای مخلوط‌های مختلف ارزیابی شده، نمونه‌هایی که تحت شرایط یکسان عمل‌آوری شود، دارای ارزش درجه اشباع متفاوتی در پایان دوره عمل‌آوری بودند؛ ۸. دقت آزمون BR به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از RCPT و تا حدی بهتر از آزمون SR1 است [۴۳].

کسلی و همکاران (۲۰۲۰) روش‌های پیشرفته اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی (و در نتیجه مقاومت الکتریکی) ملات و بتن را تجزیه و تحلیل نمودند. این محققان با بررسی بیش از بیست مطالعه دیگر، انواع روش‌های مختلف را شرح دادند که مزایا و معایب آنها با توجه به عملکرد، قابلیت اطمینان و میزان بلوغ آنها مشخص می‌شود. هر دو روش نظارت و بازرسی با استفاده از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی امکان‌پذیر است. مقاومت الکتریکی یک شاخص مهم برای وضعیت سلامتی ملات با بتن است، زیرا هر زمان که پدیده‌هایی باعث تغییر در رسانایی ملات با بتن می‌شود، تغییر کند، این روش به عنوان راهنما عمل می‌نماید. این محققان برای بکارگیری روش مقاومت الکتریکی بتن توصیه‌هایی (مانند توجه به رطوبت سطح اندازه‌گیری، دمای هوا و بتن، نحوه قرارگیری میلگرد، حداکثر اندازه سنگدانه‌های بتن، میزان فرکانس مورد استفاده و غیره) ارائه کردند [۴۴].

هدف از این مطالعه، بررسی بومی روش پایش مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از سیمان‌های متنوعی است که آنالیز شیمیائی دارند. از این روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن سخت شده مدنظر نبود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در مرحله اول ۱۱ نمونه کلینکر از کارخانه سیمان تهران نمونه‌گیری شد که مقادیر فازهای آنها تنوع داشتند. یک نمونه گچ تهیه و آنالیز شیمیائی شد. با استفاده از این کلینکرها و یک آسیاب آزمایشگاهی، سیمان‌سازی آزمایشگاهی صورت گرفت که ترکیبی از ۹۶٪ کلینکر و ۴٪ گچ با ملاک دستیابی به شاخص بلین 3000 ± 50 سانتی متر مربع بر گرم بود. نرمی و دانه‌بندی نمونه‌های سیمان شرایط تقریباً یکسانی داشتند. آنالیز فیزیکی و شیمیائی نمونه‌های سیمان صورت گرفت (شکل ۲). یک نمونه افزودنی فوق‌روان‌کننده پر مصرف در تهران نیز تهیه گردید. فوق‌روان‌کننده مذکور بر پایه پلی کربوکسیلات اتر بود. در مرحله بعد ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان تهیه گردید. ۱۱ مخلوط با عنوان شاهد (فاقد افزودنی) با هدف دستیابی به اسلامپ $8 \pm 0/5$ سانتی‌متر ساخته شد و ۱۱ مخلوط با عنوان دارای افزودنی نیز در شروع با هدف دستیابی به اسلامپ $8 \pm 0/5$ سانتی‌متر تهیه گردید؛ سپس به مقدار ۰/۳٪ وزنی سیمان از افزودنی فوق‌روان‌کننده (کاهنده آب) به مخلوط بتن اضافه شد تا اسلامپ بتن در محدوده S3 یعنی اسلامپ ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر گردد (BS8500-2003). بر روی مخلوط‌های بتنی آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی انجام شد که از زمان تماس سیمان با آب تا ۳۱ روز بعد بطور مرتب قرائت‌ها صورت گرفت.



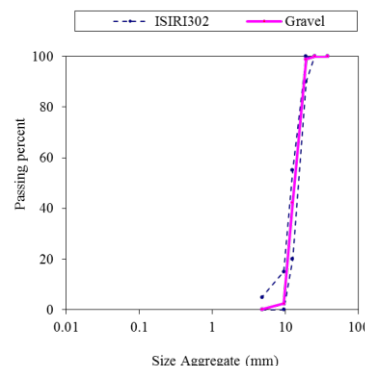
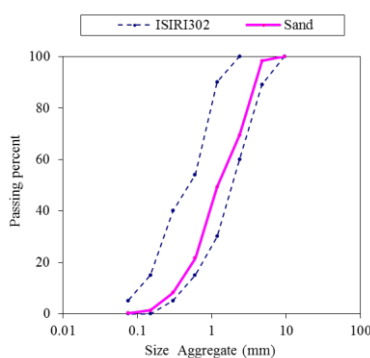
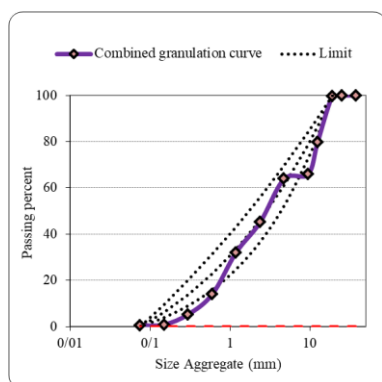
شکل ۲ سیمان‌سازی آزمایشگاهی و تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها

¹ surface resistivity (SR)

شکل ۳ و جدول ۱ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از غرب تهران (منطقه شهریار) می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)	مدول نرمی (FM)	جذب آب (%)	چگالی (SSD)	شکستگی (%)	عبوری از الک ۲۰۰ (%)
شن نیمه شکسته (بادامی)	۱۹	*	۲/۶	۲/۵۳	۷۹	۰/۱
ماسه طبیعی	*	۳/۵	۳/۹	۲/۵۴	*	۰/۲



شکل ۳ نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

در کلیه مخلوط‌ها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمون‌ها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر فازهای کلینکر مصرف شده در سیمان مصرفی باشد (شکل ۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز 350 kg/m^3 بود. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون اصلاح شده با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود $0/35$ در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد. برای تهیه این مخلوط 65% ماسه با 35% شن درشت استفاده شد (نمودار شکل ۳ و جدول ۲).

جدول ۲: مشخصات کلی طرح‌های مخلوط بتنی

مقدار افزودنی نسبت به سیمان (%)	مقدار وزنی در یک مترمکعب بتن (بر حسب کیلوگرم)					
	ماسه (SSD)	شن (SSD)	سیمان	آب	افزودنی	نسبت آب به سیمان
۰/۳	۱۱۶۲	۶۱۷	۳۵۰	۱۶۶	۱/۰۲۷	۰/۴۷

مقاومت فشاری بتن سخت شده $7, 28$ و 90 روزه همه مخلوط‌های بتنی اندازه‌گیری شدند (شکل ۴). اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با تنظیمات معرفی شده در مقاله NIST¹ توسط K. Obla بود [۸] که روشی جدید برای بتن تازه می‌باشد. از هر مخلوط بتنی ۲ قالب استوانه‌ای با طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر (4×8 اینچ) تهیه شد. قالب‌ها به صورت یکبار مصرف و مخصوص این پروژه طراحی و ساخته شدند، بطوریکه دو عدد پین فلزی (استیل) با فاصله ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در بتن مدفون شدند. جریان بین دو الکتروود وارد شده در آزمون عمل

¹ The National Institute of Standards and Technology (NIST)

گردید و ولتاژ به طور همزمان اندازه گیری شد. مقاومت الکتریکی از نسبت ولتاژ اندازه گیری شده به جریان اعمالی محاسبه و مستقیماً توسط دستگاه گزارش می شود. در مجموع ۴۴ قالب و ۸۸ پین تهیه شد که قرائت‌ها در سنین ۰، ۱، ۲، ۳، ۶، ۲۴، ۳۰، ۴۸، ۵۴، ۵۴، ... و ۷۷۴ ساعت (۳۲ روز) انجام گردید. دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی نیز متناسب با کار طراحی و تهیه شد.



شکل ۴ تهیه مخلوط‌های بتنی و آزمایش‌های مربوطه

مقاومت یا امپدانس الکتریکی (Z)، مقاومتی است که تحت یک اختلاف پتانسیل متناوب در برابر جریان الکتریکی متناوب ظاهر می شود و واحد SI آن اهم (Ω) است. عواملی همچون سطح مقطع رسانا، نحوه قرارگیری آنها، دما و مقاومت الکتریکی ویژه بر مقاومت الکتریکی موثرند. از این رو با موازی قرار دادن صفحات رسانا، φ (زاویه مابین دو الکتروود دستگاه حین اندازه گیری مقاومت الکتریکی) تثبیت گردید، همواره از دو صفحه رسانای ثابت (با مقاومت الکتریکی ویژه مشخص) در دمای نسبتاً ثابت آزمایشگاهی بهره گیری شد. مقاومت ویژه بتن مشخصه ذاتی آن بوده که مستقل از شکل هندسی نمونه است و معمولاً آن را با ρ نشان می دهند (رابطه ۱).

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

در روش تعیین مقاومت الکتریکی حجمی بتن، آزمونه بتنی بین دو الکتروود قرار می گیرد. برای اطمینان از اتصال مناسب نمونه و الکتروود از دو اسفنج مرطوب استفاده شد. یک جریان متناوب به نمونه اعمال شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود اندازه گیری گردید. رابطه ۲ ضریب هندسی مورد استفاده در این روش را نشان می دهد که A سطح مقطع نمونه و L ارتفاع نمونه استوانه ای بتن است.

$$K = A/L \quad (3)$$

نکات مهم در نحوه اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن بدین صورت بود:

- محل قرارگیری دستگاه به گونه ای بوده تا طی کل فرآیند آزمایشگاهی و برای قرائت آزمونه ها نیاز به جابجائی دستگاه وجود نداشته باشد؛
- مقدار K (که یک ضریب ثابت در محاسبات مقاومت می باشد) را در همه قرائت‌ها عدد ثابت ۱۰ در نظر گرفته شد؛
- در هر مرحله از قرائت‌ها، مقدار Z (مقاومت الکتریکی نمایشگر دستگاه) با اعداد قبلی و آزمونه های مشابه کنترل شد؛

- در صورتیکه دستگاه عدد نامرتب نشان می‌داد، مقادیر K و ϕ (زاویه مابین دو الکتروستگاه حین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی) کنترل می‌شد. با توجه به اینکه پراب و کابل‌های دستگاه به دو پین مدفون در بتن نصب می‌شدند و موازی یکدیگر بودند، مقدار ϕ باید صفر باشد تا مقدار Z صحت داشته باشد؛
- در هر مرحله از قرائت‌ها، تکرارپذیری حداقل یک قرائت کنترل شده است.
- ضریب مقدار قرائت شده ۰/۱۴۵ به عنوان مقاومت الکتریکی اعمال شد.

۳- نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل

جدول ۳ آنالیز شیمیائی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله که مقادیر C3S حدود ۶۱/۴-۴۹/۶٪ و C3A حدود ۷/۴-۳/۷٪ می‌باشند. بنابراین کلینکرهای متنوعی برای سیمان‌سازی وجود دارند.

جدول ۳: آنالیز شیمیائی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی (به روش شیمی تر)

Free CaO	C4AF	C3A	C2S	C3S	AlM	SiM	LSF	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	Sample Code
0.70	14.0	6.0	25.8	49.6	1.13	2.25	89.7	63.5	4.6	5.2	22.02	5263
1.01	12.8	5.0	26.5	50.0	1.09	2.56	89.1	63.12	4.2	4.56	22.4	5159
0.84	11.7	4.5	21.6	56.3	1.08	2.79	91.2	63.72	3.84	4.16	22.32	5154
0.39	12.1	3.7	16.5	61.4	0.99	2.77	93.2	63.88	3.96	3.94	21.9	5155
0.48	13.6	5.8	28.0	48.1	1.13	2.35	88.8	63.54	4.48	5.04	22.4	5162
0.70	12.5	6.1	35.7	41.5	1.19	2.58	85.8	63.34	4.12	4.92	23.34	5156
0.56	11.9	6.1	25.1	51.2	1.23	2.54	90.0	63.36	3.92	4.82	22.2	5158
0.39	11.9	6.0	25.8	51.3	1.22	2.60	89.8	63.86	3.9	4.76	22.5	5157
0.42	12.3	7.4	23.5	51.9	1.33	2.32	91.0	63.84	4.04	5.38	21.84	5153
0.45	11.8	5.6	19.4	57.8	1.19	2.59	92.4	64.16	3.88	4.6	21.96	5160
0.42	12.2	5.7	26.3	50.4	1.18	2.57	89.4	63.48	4	4.72	22.44	5161

آنالیز گچ مصرفی برای سیمان‌سازی آزمایشگاهی به صورت جدول ۴ می‌باشد. این آنالیز شیمیائی نشان می‌دهد که گچ مصرفی کیفیت مرغوبی دارد.

جدول ۴: آنالیز شیمیائی گچ مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی (به روش شیمی تر)

Molecular water	CaSO4	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
18.42	70.6	41.54	0.78	31.8	0.22	0.78	1.84

در جدول ۵ نتایج آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی آمده است. نتایج دانه‌بندی سیمان بیانگر شباهت در نرمی آنها بود.

جدول ۵: نتایج آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

Code	Compressive Strength-Mortar (kg/cm ²)			Setting Time (min)		Normal Consistency (%)	Retained on sieve (%)		Blaine (cm ² /gr)
	2 Days	7 Days	28 Days	Initial	Final		90 μ	45 μ	
5153	180	316	472	230	310	23.5	1.34	12.04	2951
5154	176	291	430	230	300	23.5	1.32	11.36	3052
5155	172	303	343	240	315	24.0	1.30	11.46	3052
5156	132	286	466	230	310	23.5	1.18	12.26	2951
5157	206	335	492	215	290	24.0	1.78	13.64	2985
5158	163	321	493	240	315	23.5	1.24	12.84	2951
5159	146	286	466	215	295	23.5	1.34	15.42	2985
5160	222	307	514	190	265	23.5	0.88	10.22	2985
5161	167	308	494	240	315	23.5	1.24	12.34	3019
5162	150	311	534	240	320	24.0	1.20	12.22	2951
5163	169	296	446	250	325	23.5	2.08	14.20	3019

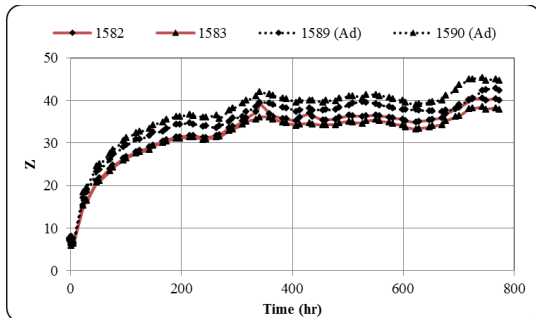
جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج بتن تازه و سخت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶: نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های بتنی ساخته شده با سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

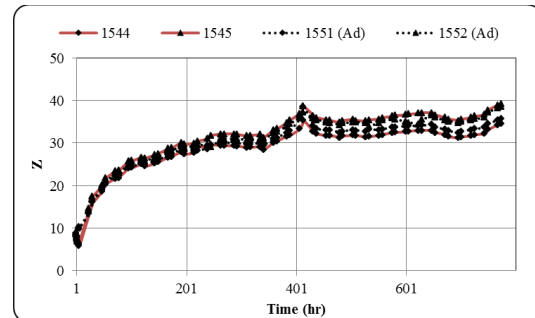
Code	Without Admixture (Normal)					With Admixture				
	Fresh Concrete		Compressive Strength- Concrete (kg/cm ²)			Fresh Concrete		Compressive Strength Concrete (kg/cm ²)		
	Slump (mm)	w/c	7 Days	28 Days	90 Days	Slump (mm)	w/c	7 Days	28 Days	90 Days
5153	80	0.55	247	397	488	80	0.47	250	411	479
5154	90	0.54	248	392	427	85	0.48	286	458	438
5155	80	0.59	219	377	433	80	0.54	236	373	468
5156	80	0.56	209	392	499	80	0.51	225	389	479
5157	80	0.53	246	440	545	80	0.48	272	429	438
5158	80	0.57	239	382	490	80	0.52	254	401	425
5159	80	0.54	278	439	582	80	0.50	272	436	564
5160	80	0.54	284	428	451	80	0.48	328	443	505
5161	80	0.51	274	453	496	80	0.46	299	462	463
5162	85	0.56	251	366	500	85	0.51	277	399	464
5163	80	0.54	271	390	470	80	0.50	272	363	463

نمودار نتایج مقاومت الکتریکی آزمون‌ها در شکل ۵ دیده می‌شود. - تقریباً سه پیک در همه آزمون‌ها مشاهده شد:

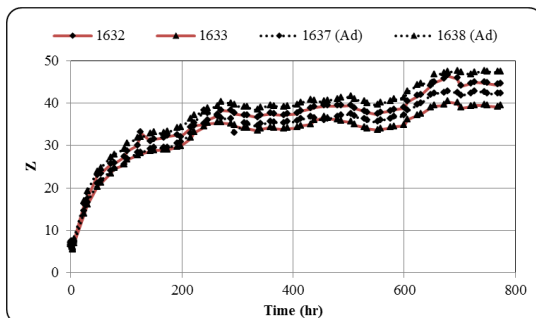
- ✓ پیک اول حدود ۲۰۰ ساعت (۸ روز) $\rho \approx 30 \Omega m$...
- ✓ پیک دوم حدود ۴۰۰ ساعت (۱۶ روز) $\rho \approx 36 \Omega m$...
- ✓ پیک سوم حدود ۵۶۰ ساعت (۲۳ روز) $\rho \approx 39 \Omega m$...



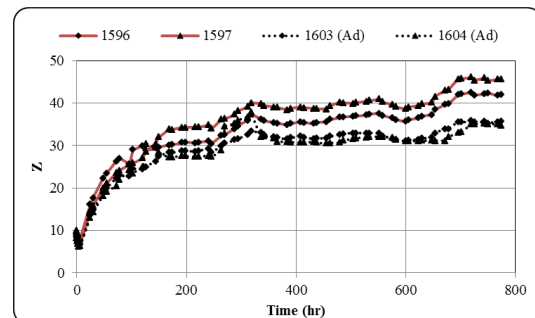
۱۵۴



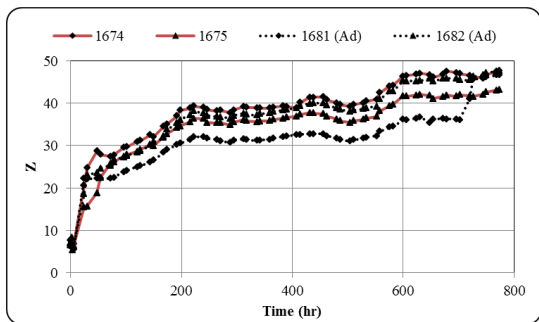
۱۶۲



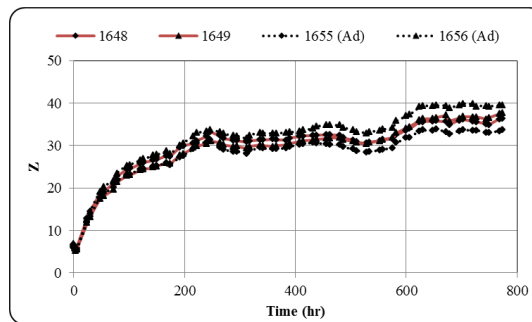
۱۵۳



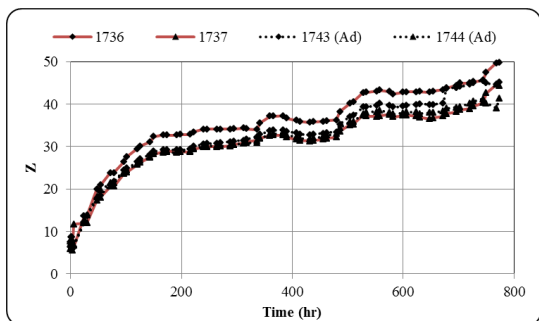
۱۶۳



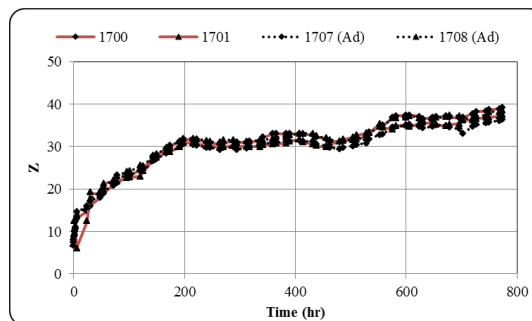
۵۱۵۵



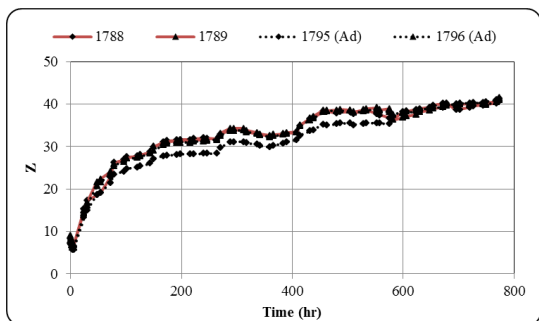
۵۱۶۰



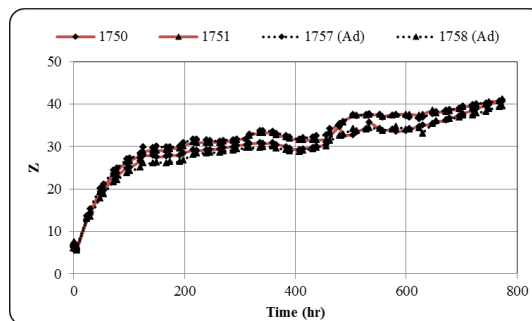
۵۱۵۹



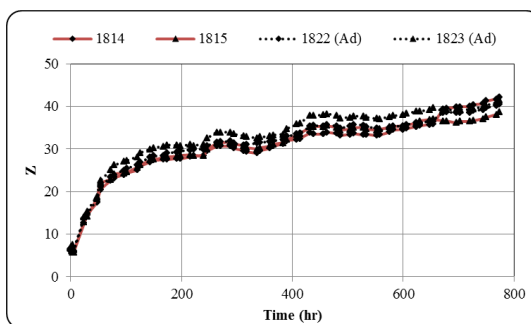
۵۱۶۱



۵۱۵۷

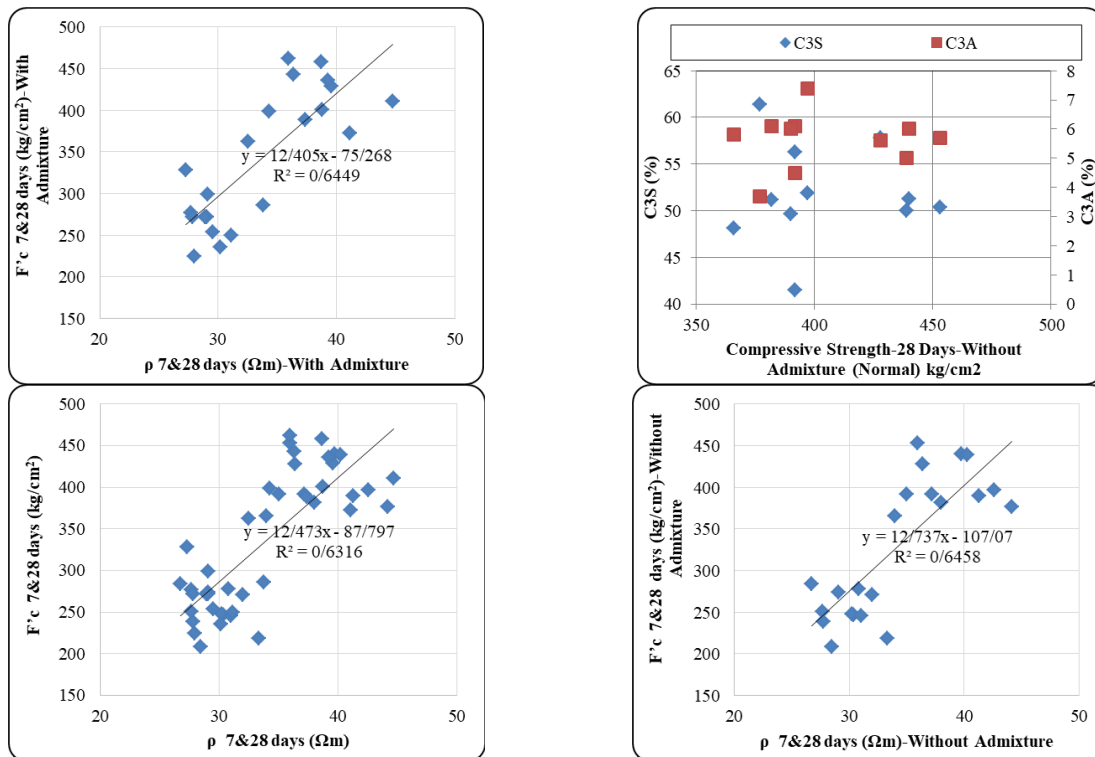


۵۱۵۶



۵۱۵۸

شکل ۵: منحنی‌های مقاومت الکتریکی طی مرور زمان برای ۲۲ مخلوط بتنی (۴۴ آزمون) جهت بررسی ارتباط مقاومت فشاری، الکتریکی و فازهای سیمان نمودارهای شکل ۶ ترسیم شد.



شکل ۶ نمودارهای ارتباط مقاومت فشاری با فازهای سیمان و مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری (۷ و ۲۸ روزه) در مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی

از نتایج و نمودارهای اشکال ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که:

- ✓ تقریباً در همه آزمون‌ها، مقاومت الکتریکی تا ۳ ساعت کاهش دارد که بیانگر زمان گیرش بتن است؛
- ✓ بین W/C و ρ رابطه ای وجود ندارد؛
- ✓ رابطه واضحی بین C_3A و C_3S با مقاومت فشاری بتن وجود ندارد؛
- ✓ رابطه مقاومت الکتریکی با مقاومت فشاری بتن به صورت زیر است ($R^2 = 0.63$):

$$F'c \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 12.5 \rho \text{ (}\Omega\text{m)} - 88 \quad (4)$$

باید توجه نمود که هدف از این ارزیابی و ارائه رابطه، حصول اطمینان از دستیابی به مقاومت فشاری به کمک روش مقاومت الکتریکی است و تخمین مقاومت فشاری در سنین مختلف نمی‌باشد. جهت تبیین بهتر مثالی ارائه می‌شود. در برخی پروژه‌ها، شرط اجرای مرحله بعدی، کسب حداقل مقاومت بتنی است. بطور مثال برای قالب‌برداری در یک پروژه، دستیابی به مقاومت حداقل ۱۰ مگاپاسکال و برای اعمال تنش کششی بر روی کابل‌های پیش تنیده که با گروت محصور شده‌اند، حداقل مقاومت ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. جهت این پایش‌ها نیاز است که آزمون‌هائی تهیه شوند و در فواصل زمانی مختلف تعیین مقاومت گردند. اما با روش مقاومت الکتریکی و رابطه فوق براحتی می‌توان از کسب مقاومت مدنظر، اطمینان حاصل نمود.

با توجه به اینکه در این مطالعه خاص، روش پایش مقاومت الکتریکی با اغلب مطالعات کمی تفاوت داشت و فقط مشابه تحقیقات اوبلا و همکاران (۲۰۱۸) بود، لذا امکان مقایسه دقیق وجود ندارد. البته روند تغییرات مقاومت الکتریکی طی زمان در این مطالعه مشابه مطالعات نیلی و تدین (۱۳۹۰) و لی و همکاران (۲۰۰۷) بود. این محققان به کمک آزمایش مقاومت الکتریکی، روند گیرش بتن را پایش نمودند و در این تحقیق روند سخت شدن و کسب مقاومت فشاری به کمک آزمایش مقاومت الکتریکی ارزیابی گردید. در این مطالعه مشابه تحقیقات سنگول و جرو (۲۰۰۷) و

هیز و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه‌گیری می‌شود که روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، پایشی مناسب و قابل اطمینان برای کنترل کیفیت بر اساس عملکرد و در نتیجه دوام بتن است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روابط معناداری مابین نتایج آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و برخی پارامترهای بتن مشاهده گردید که بر روی برخی مطالعات مشابه صحه‌گذاری شد. بر اساس نتایج این پروژه:

- ۱- تقریباً در همه آزمون‌ها، مقاومت الکتریکی تا ۳ ساعت کاهش یافته است که زمان گیرش را نمایش می‌دهد؛
- ۲- می‌توان گفت که سه قله در همه آزمون‌های مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود: ۲۰۰ ساعت (۸روز) با مقاومت الکتریکی حدود $30 \Omega m$ ؛ $p \approx 36 \Omega m$ حدود (۱۶ روز) با مقاومت الکتریکی حدود $39 \Omega m$ ؛ $p \approx 39 \Omega m$ حدود (۲۳ روز) با مقاومت الکتریکی حدود $39 \Omega m$ ؛
- ۳- بین W/C و p رابطه‌ای دیده نشد؛
- ۴- رابطه واضحی بین C3A و C3S با مقاومت فشاری بتن وجود ندارد؛
- ۵- بر اساس نتایج این مطالعه، رابطه مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری به صورت زیر است:

$$F'c \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 12.5 \rho \text{ (}\Omega\text{m)} - 88$$

قدردانی

از مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم شرکت سیمان تهران بابت همکاری‌های صورت گرفته بسیار سپاسگزاریم. از شرکت‌های البرز شیمی و نوین رضی آباد بابت تامین مواد اولیه این پروژه متشکریم.

مراجع

- [1]. Stackelberg D, Wilge B, Boiko S, Martauz P, Strigac J (2011) "Monitoring the strength properties of cement clinker on the basis of measurements of electrical resistivity. XIII". *International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid* 7: 8.
- [2]. Goldman FA, Shtakelberg DI, Gadaev NR, Steinbuk G (2015) "Monitoring of hardening of aerated concrete as measured by electrical resistance." *Jour/Concrete Technology* 3-4: 32-35.
- [3]. Shimizu Y (1928) "The science reports of the Tohoku Imperial University", 1st Series, Shendai, Japan 17(1): 423-429.
- [4]. Bramshuber W, Raupach M, Schröder P, Dauberschmidt C (2003) "Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. Part. I: Aspects of concrete technology". *International Symposium NDT-CE, Stuttgart* 2: 41.
- [5]. Mancio M, Moore JR, Brooks Z, Monteiro PJM, Glaser SD (2010) "Instantaneous in-situ determination of water-cement ratio of fresh concrete." *ACI Materials Journal* 107(6): 586-592.
- [6]. Wei X, Li Z (2006) "Early hydration process of Portland cement paste by electrical measurement." *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(1): 99-105.
- [7]. Li Z, Wei X, Li W (2003) "Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurement." *ACI Materials Journal* 100(3): 253-257.
- [8]. Obla K, Hong R, Sherman S, Bentz DP, Jones SZ (2018) "Relating the electrical resistance of fresh concrete to mixture proportions". *NIST, Advance Civil Engineer Materials* 7(1): 71-86.
- [9]. Xiao L, Li Z (2008) "Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement." *Cement and Concrete Research* 38: 312-319.

- [10]. Li Z, Xiao L, Wei X (2007) "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(5): 423-427.
- [11]. Andrade C, Rebolledo N (2011) "Setting and hydration evolution by resistivity and ultrasonic velocity." 13 Interns. *Congress on the Chemistry of Cement, Abstracts and Proceedings, Madrid* 7:8.
- [12]. Bentz DP (2014) "Activation energies of high-volume fly ash ternary blends: hydration and setting". *Cement and Concrete Composites* 53: 214-223.
- [13]. Bentz DP, Snyder KA, Ahmed A (2015) "Anticipating the setting time of high-volume fly ash concretes using electrical measurements: feasibility studies using pastes." *J Mater Civ Eng* 27(3): 1-6.
- [14]. McCarter WJ, Curran PN (1984) "The electrical response characteristics of setting cement paste." *Magazine of Concrete Research* 36(126): 42.
- [15]. Hope BB, Ip AK, Manning, DG (1985) "Corrosion and electrical impedance in concrete." *Cement and Concrete Research* 15(3): 525-534.
- [16]. Xinying Lu (1997) "Application of the Nernst-Einstein equation to concrete." *Cement and concrete research* 27(2): 293-302.
- [17]. Sengul O, Gjorv OE (2008) "Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction." *ACI Materials Journal* 105(6): 541-547.
- [18]. Monfore GE (1968) "The electrical resistivity of Concrete." *Journal of PCA*, pp. 35-48.
- [19]. Lio Y, Presuel Moreno FJ (2014) "Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using arrenius law." *ACI Materials Journal* 3(4): 433-442.
- [20]. Trimbak PV, Jolicoeur C, Khayat KH (2002) "Multi-probe conductivity method for monitoring time-depended processes in fresh cementations and other slurry systems." *Canada Patent: CA 2322931*.
- [21]. Lubeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC (2012) "Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag." *Cement & Concrete Composites* 34(3): 392- 399.
- [22]. Wei X, Xiao L (2012) "Effect of temperature on the electrical resistivity of Portland cement pastes." *Advances in Cement Research* 24(2): 69-76.
- [23]. Backe KR, Lile OB, Lomov SK (2001) "Characterizing curing cements slurries by electrical conductivity." *SPE Drilling & Completion*, pp. 201-207.
- [24]. Monfore, G E (1970). "THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE". *PCA, Portland Cement Assoc R & D Lab Bull*
- [25]. ASTM C1202 (2019). "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
- [26]. Michelle R. Nokken & R. Doug Hooton (2006). "Electrical Conductivity Testing". *PCA R&D Serial No. 3002*.
- [27]. ASTM C403 (2016). "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance".
- [28]. Li, Z., Xiao, L., and Wei, X. (2007), "Determination of Concrete Setting Time Using Electrical Resistivity Measurement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, pp. 423-427.
- [29]. Andrade C, Rebolledo N (2011) "Setting and hydration evolution by resistivity and ultrasonic velocity." 13 Intern. *Congress on the Chemistry of Cement, Abstracts and Proceedings, Madrid* 7:8.
- [30]. Ozkan Sengul & O.E. Gjorv (2007). "Electrical Resistivity Measurements for Quality Control during Concrete Construction". November 2008 *ACI Materials Journal* 105(6):541-547.

- [31]. Robert Spragg & Chiara Villani & Ken Snyder & Dale Bentz & Jeffrey W. Bullard & Jason Weiss. (2012). "Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems: Observations of Factors that Influence the Measurements". TRB 2013 Annual Meeting.
- [32]. Hamed Layssi & Pouria Ghods & Aali R. Alizadeh, & Mustafa Salehi (2015). "Electrical Resistivity of Concrete". *Concrete international*, MAY 2015, 37(5), page 41-46.
- [33]. B. P. Hughes & A. K. O. Soleit & R. W. Brierley (2015). "New technique for determining the electrical resistivity of concrete". *Magazine of Concrete Research*, Volume 37, Issue 133, December 1985, pp. 243-248
- [34]. Ozyildirim, C., "Effects of Temperature on the Development of Low Permeability in Concretes," VTRC R98-14, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA 1998.
- [35]. Qiao, C., Moradillo, M.K., Hall, H., Ley, M.T., and Weiss, J.W., (2019), "Electrical Resistivity and Formation Factor of Air-Entrained Concrete". *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 3, May, pp. 85-93.
- [36]. Pejman Azarsa & Rishi Gupta. (2017). "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review". *Advances in Materials Science and Engineering*, May 2017
- [37]. Spragg, R., Villani, C., Snyder, K., Bentz, D. P., Bullard, J. W., and Weiss, J., "Factors that Influence Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Vol. 2342, 2013, pp. 90-98.
- [38]. Spragg, R., Villani, C., and Weiss, J., "Electrical Properties of Cementitious Systems: Formation Factor Determination and the Influence of Conditioning Procedures," *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 5, No. 1, 2016, pp. 124-148.
- [39]. Hiroshi Minagawa, Shintaro Miyamoto, Makoto Hisada. (2017). "Relationship of Apparent Electrical Resistivity Measured by Four-Probe Method with Water Content Distribution in Concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 15 (2017), Issue 6.
- [40]. Obla, K. H.; Hong, R., Sherman, S., Bentz, D.P., and Jones, S.Z., 2018, "Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions," *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 7, No. 1, 2018, pp. 71-86.
- [41]. McCarter WJ, Chrisp TM, Staars G, Basheer M, Blewett J (2005) "Field monitoring of electrical conductivity of cover-zone concrete." *Cement and Concrete Composites* 27(7-8): 809-817.
- [42]. Stackelberg DI & Vilge BI & Boiko SV (2018). "Technological Monitoring for Hardening and Strengthening of Cement-concrete Compositions". *Advancements in Civil Engineering & Technology*, Volume 2 Issue 5.
- [43]. Karthik Obla & Colin L. Lobo & Rongjin Hong & Stuart Sherman. (August 2020). "Improving the Reliability of Resistivity Tests of Concrete". *National Ready Mixed Concrete Association*.
- [44]. Gloria Cosoli & Alessandra Mobili & Francesca Tittarelli & Gian Marco Revel & Paolo Chiariotti. (2020). "Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review". *Appl. Sci.* 2020, 10, 9152.