

مطالعه‌ی آزمایشگاهی هم‌بستگی بین نتایج روش‌های مختلف در

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن

حسن پارسیان^۱، محسن تدین^۲، داود مستوفی نژاد^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- مربی بازنشسته دانشکده‌ی فنی، دانشگاه بوعلی سینا

۳- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

dmostofi@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۱/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۳/۲۷]

چکیده- هدف این پژوهش، ارائه‌ی روابطی برای پیش‌بینی نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با روش استاندارد ASTM C1760 به کمک نتایج روش‌های دیگر است. روش طیف نگاری مقاومت ظاهری، رایج‌ترین در مطالعات آزمایشگاهی، روش ASTM C1760، تنها مورد دارای دستور استاندارد، روش یک الکترودی، تکنیک جدیدی در اندازه‌گیری‌های کارگاهی و روش چهار الکترودی، متداول‌ترین روش کارگاهی است. به این منظور، ۴۹ طرح مخلوط بتن با مقاومت‌های الکتریکی پایین تا بسیار بالا در نظر گرفته شده و برای هر طرح، ۴ آزمونه‌ی استوانه‌ای و یک آزمونه‌ی دال مسلح ساخته شده و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با روش‌های گفته شده در سن ۲۸ روزه انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اختلاف قابل چشم‌پوشی بین نتایج روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 وجود دارد؛ اما به طور معناداری، مقاومت‌های الکتریکی اندازه‌گیری شده با روش ASTM C1760، کمی بیشتر از نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری در همان بتن است. در روش چهار الکترودی، عوامل متعددی از جمله عدم رعایت تناسب بین فاصله الکترودها و ابعاد سازه می‌تواند موجب بروز خطاهای سیستماتیک در نتایج باشد که به همین علت، نتایج اندازه‌گیری با این روش در حدود ۱۴۰ درصد از روش استاندارد بزرگ‌تر است. در روش یک الکترودی نیز به علت عدم وجود رابطه‌ی جامعی برای محاسبه‌ی ثابت سلول، ابتدا مقدار این ثابت در مقایسه با نتایج روش استاندارد به دست آمده و سپس مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه شده است. نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با این روش نیز اختلاف ناچیزی با روش استاندارد دارد. از آن‌جا که امکانات و شرایط اندازه‌گیری با روش استاندارد در همه‌ی پروژه‌ها فراهم نیست، دست‌آورد این پژوهش می‌تواند در پیش‌بینی آن از نتایج سایر روش‌ها موثر باشد.

واژگان کلیدی: مقاومت الکتریکی بتن، طیف نگاری مقاومت ظاهری، ASTM C1760، یک الکترودی، چهار الکترودی.

۱- مقدمه

طیف وسیعی از کاربردهای آن تأثیر می‌گذارد [۱].

منظور از مقاومت الکتریکی در بتن، مقاومت الکتریکی یک هادی با حجم واحد و مقطع عرضی ثابت است؛ به طوری که جریان به صورت پیوسته عبور کند و یکنواخت توزیع شده باشد [۲]. به بیان ساده‌تر، مقاومت الکتریکی می‌تواند به صورت مقاومت الکتریکی مکعبی از بتن با ضلع ۱ متر یا ۱ سانتی‌متر که بین صفحات با بار مخالف قرار گرفته است، تعریف شود [۱]. البته این تعریف مربوط به مقاومت الکتریکی حجمی است و اگر بخش قابل ملاحظه‌ای از جریان از سطح هادی عبور کند،

امروزه به علت رشد و توسعه‌ی سازه‌های بتنی، لزوم توجه به مسائل دوامی و نیاز به سنجش غیرمخرب کیفیت بتن در مراحل ساخت و بهره‌برداری، آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در کانون عطف توجه قرار گرفته است. در مواد سیمانی، اندازه‌گیری‌های الکتریکی به بیان تفاوت رفتار و توانایی ماده در عبور جریان الکترون‌ها می‌پردازد. مقاومت الکتریکی (و یا معکوس آن هدایت الکتریکی) یکی از مشخصات فیزیکی مهم بتن‌های با سیمان پرتلند است که روی

مقایسه با حالت عادی، بیشتر است که دلیل آن به کاهش مقدار یون‌های موجود برای انتقال جریان مربوط می‌شود. تغییر دما نیز تأثیر مهمی بر مقاومت الکتریکی دارد. دمای بالاتر موجب مقاومت الکتریکی پایین‌تر می‌شود و بالعکس. این به علت تغییر در تحرک یون‌ها در محلول حفزه‌ها و واکنش متقابل یون-جامد در خمیر سیمان است [۵۱].

۲- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

بتن

همه‌ی روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی کمینه شامل دو الکترود می‌شوند، حتی اگر یکی از آن‌ها آرماتور مسلح کننده‌ی بتن باشد. به این ترتیب که ولتاژی بین الکترودها اعمال و جریان عبوری اندازه‌گیری می‌شود (یا برعکس). نسبت ولتاژ به جریان، مقاومت الکتریکی (اهم) را می‌دهد و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی (اهم-متر) با اعمال پارامتر تبدیل هندسی یا ثابت سلول (متر) به دست می‌آید. برای یک آزمون با هندسه‌ی مشخص، ثابت سلول از راه‌های مختلفی به دست می‌آید؛ از جمله ملاحظات تئوری یا مقایسه با نتایج آزمون‌های استاندارد بتنی و یا الکترودیتی با مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مشخص. برای اهداف مقایسه‌ای مانند بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی در طول زمان، نیازی به محاسبه‌ی ثابت سلول و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیست [۵].

اندازه‌گیری مقاومت (یا هدایت) الکتریکی بتن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش‌های آزمایشگاهی شامل روش طیف نگاری مقاومت ظاهری، روش ASTM C1760-12 [۱۲] و روش بدون تماس؛ و روش‌های کارگاهی شامل روش چهار الکترودی (ونر)، روش دو الکترودی و روش یک الکترودی است. روش ASTM C1760 تنها روش دارای دستور استاندارد است و به جز آن که در سال ۲۰۱۲ ارائه شد، مابقی به سال‌های قبل از ۲۰۰۳ میلادی مربوط می‌شوند [۱۳]. در ادامه توضیحات مختصری از روش‌ها آمده است.

۲-۱ روش طیف نگاری مقاومت ظاهری

در گذشته هر یک از پژوهشگران با تجهیزات و شرایط خاصی مقاومت الکتریکی بتن را اندازه‌گیری می‌کردند. به این ترتیب نوع و مقدار ولتاژ اعمالی، مقدار فرکانس، جنس الکترودها،

مقاومت الکتریکی سطحی به حساب می‌آید [۳]. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به شکل گسترده‌ای در برآورد پتانسیل خوردگی در بتن‌های مسلح کاربرد دارد [۴ و ۵]. از جمله مهم‌ترین عوامل خرابی در سازه‌های دریایی، خوردگی آرماتورها است که ارتباط تنگاتنگی با مقاومت الکتریکی بتن در برگیرنده‌ی آن‌ها دارد. در پیل الکتروشیمیایی تشکیل شده به هنگام خوردگی، بتن نقش الکترولیت را داشته و هر چه دارای مقاومت الکتریکی بالاتری باشد، تحرکات یونی ضعیف‌تری را موجب می‌شود که نتیجه‌ی مستقیم آن، کاهش جریان و نرخ خوردگی است [۱]. هم‌چنین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی میزان تخلخل، ارتباط میان حفزه‌ها و نفوذ پذیری و انتشار پذیری مایعات و گازها، میزان آب موجود در منافذ بتن سخت شده و فرآیند گیرش و هیدراسیون فراهم می‌کند [۶ و ۷]. در همین راستا، صداها پژوهرشگر به کمک اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، روی پدیده‌های مختلفی در مواد بتنی مطالعه کرده‌اند [۸ و ۹]. بنابراین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، اهمیت شایانی در بحث دوام سازه‌های بتنی داشته و می‌تواند به نوعی بیان‌گر کیفیت بتن هم باشد.

جریان الکتریکی در بتن به وسیله یون‌های محلول در مایع موجود در حفزه‌های خمیر سیمان انتقال پیدا می‌کند و در قیاس با خمیر سیمان، سنگ دانه‌ها نقشی در عبور جریان الکتریکی ندارند و عایق فرض می‌شوند. به همین دلیل بتن یک هادی همگن نیست [۵]. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن در محدوده‌ی وسیعی، از 10^1 تا 10^6 اهم-متر تغییر می‌کند و به طور عمده از میزان رطوبت و ترکیبات بتن تأثیر می‌پذیرد [۱۰ و ۱۱]. میزان آب بیشتر در حفزه‌ها تعداد یا اندازه‌ی بزرگ‌تر حفزه‌ها یا اتصال بهتر آن‌ها و یا پیچ و خم کم‌تر (نسبت آب به سیمان بالاتر)، موجب مقاومت الکتریکی پایین‌تر می‌شود. برای رطوبت نسبی ثابت و در یک شرایط پایدار، با کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش زمان عمل‌آوری (پیشرفت هیدراسیون) یا افزودن مواد معدنی واکنش‌پذیر مانند سرباره‌ی کوره‌ی آهن گدازی، خاکستر بادی و یا میکروسیلیس، مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد. مقاومت الکتریکی بتن کربناته شده نیز در

۲-۳ روش یک الکترودی

این روش بر مبنای استفاده از یک دیسک کوچک فلزی قرار داده شده بر سطح بتن به عنوان الکترود اصلی و آرماتور فولادی مسلح کننده به عنوان الکترود دیگر است (شکل ۱) [۱۶ و ۱۷]. با استفاده از این روش، مقاومت الکتریکی بتن روی آرماتور اندازه‌گیری می‌شود و مزیت بزرگ آن نسبت به روش چهار الکترودی، حذف تأثیر فولاد مسلح کننده در نتایج است [۱].

شکل ۱ روش یک الکترودی در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن [۵]

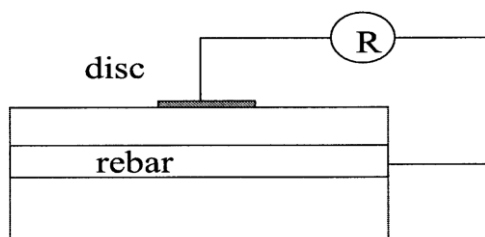


Fig. 1. One electrode method in electrical resistivity measurement of concrete

محاسبه‌ی ثابت سلول در این روش نسبت به روش چهار الکترودی، دارای پیچیدگی‌های بیشتری است؛ چرا که مقدار این ثابت به قطر دیسک، ضخامت پوشش و فاصله و قطر آرماتورها بستگی دارد [۵]. برای دیسک‌های با قطر کم‌تر از ضخامت پوشش آرماتورها، ثابت سلول دو برابر قطر سلول (متر) است [۱۷]. برای دیسک‌های بزرگ‌تر، مقدار ثابت سلول متفاوت است. تخمین تجربی ثابت سلول یک دیسک ۲۰۰ میلی‌متری در مقایسه با روش چهار الکترودی انجام شده است [۱۸].

۲-۴ روش چهار الکترودی

روش‌های کارگاهی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بسیار ساده هستند؛ ولی در عین حال به علت وجود منابع متعدد خطا، کسب نتایج صحیح دشوار است. روش چهار الکترودی رایج‌ترین روش اندازه‌گیری کارگاهی است که در ابتدا به وسیله‌ی ونر در سال ۱۹۱۶ برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی زمین ابداع شد [۱۹]. بعدها این روش به وسیله‌ی استراتفول در سال ۱۹۶۸ و نایش و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای استفاده در

روش تماس الکترود با آزمون و شکل و ابعاد آزمون در پژوهش‌های مختلف، متفاوت بوده است [۱۴]. تفاوت برخی از این موارد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی می‌گذارد. هومند و رابسون در سال ۱۹۹۵ تغییر در مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده به هنگام معکوس کردن جهت اعمال جریان مشاهده کردند [۱۵]. همچنین دیگر پژوهشگران نیز تأیید کردند که به علت اثر پلاریزاسیون در محل الکترودها، اندازه‌گیری با ولتاژ مستقیم دقیق نیست [۵] و به همین دلیل، استفاده از ولتاژ متناوب کاربردی‌تر شد. اما توجه به این نکته ضروری است که اندازه‌گیری با ولتاژ متناوب به جای مستقیم، مقاومت الکتریکی ظاهری (Z) را به جای مقاومت الکتریکی اهمی (R) نتیجه می‌دهد که باید با قرائت اختلاف فاز ولتاژ اعمالی و جریان عبوری (φ) در هر اندازه‌گیری، مقاومت الکتریکی را بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه نمود؛

$$R = Z \times \cos \varphi \quad (۱)$$

جنس الکترودها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که رسانایی بالایی داشته باشد؛ فلز مس و برنج از جمله موارد مناسب است. همچنین اتصال الکترود و آزمون باید کاملاً برقرار باشد که این مهم به وسیله‌ی خمیر سیمان (با نسبت آب به سیمان بالا)، اسفنج مرطوب و موارد مشابه تأمین می‌شود. ثابت سلول نیز از تقسیم مساحت سطح مقطع آزمون به ارتفاع آن به دست می‌آید.

۲-۲ روش ASTM C 1760

در این روش، آزمون استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و الکترودها محلول آب نمک (۳ درصد وزنی) هستند که در طرفین آزمون به کمک مخزنی نگهداری می‌شوند. ولتاژ اعمالی، ۶۰ ولت مستقیم است که به مدت ۶۰ ثانیه به آزمون اعمال شده و سپس جریان عبوری به وسیله‌ی آمپرسنجی با دقت دهم میلی‌آمپر قرائت می‌شود. در پایان با استفاده از قانون اهم، مقاومت یا هدایت الکتریکی محاسبه می‌شود. محاسبه‌ی ثابت سلول از ملاحظات تئوری و مطابق روش طیف نگاری مقاومت ظاهری انجام می‌شود [۱۲].

اسفنج مرطوب تأمین می‌شود. ناهمگنی بتن نیز در ۳ حالت، باعث بروز خطا می‌شود؛ حضور سنگ‌دانه‌ها، حضور آرماتورهای مسلح کننده و وجود لایه‌های سطحی با مقاومت الکتریکی متفاوت از توده بتن [۱]. خطای به وجود آمده در اثر حضور سنگ‌دانه‌ها با افزایش فاصله‌ی بین الکترودها، کاهش می‌یابد. اگر فاصله‌ی داخلی بین الکترودها از ۱/۵ برابر بیشینه اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بیشتر باشد، خطای اندازه‌گیری از ۵ درصد کم‌تر خواهد بود [۲۲]. خطای به وجود آمده در اثر وجود آرماتورهای مسلح کننده در صورتی قابل ملاحظه است که اندازه‌گیری دقیقاً در بالای آرماتور انجام شود. اگر اندازه‌گیری بین یا عمود بر آرماتورها صورت گیرد، خطا کمتر می‌شود [۲۳]. همچنین در شرایط اختلاف مقاومت سطحی و توده‌ی بتن (مانند کربناته شدن سطح یا رطوبت بیشتر آن)، خطا در صورتی قابل توجه است که مقاومت الکتریکی لایه‌های سطحی کمتر از توده بتن باشد [۱].

مک‌کارتز و بارکلی در سال ۱۹۹۳ به بررسی نظری روش‌های چهار الکترودی و طیف نگاری مقاومت ظاهری و کاربرد آن‌ها در سیستم‌های حفاظت کاتدیک پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در صورت استفاده از آرایش صحیح برای الکترودها در روش چهار الکترودی، نتایج به دست آمده از دو روش به طور قابل قبولی هماهنگی دارند [۲۴]. فلیو و همکاران در سال ۱۹۹۶ ضمن معرفی روش یک الکترودی به عنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری کارگاهی مقاومت الکتریکی بتن و بررسی تأثیر قطر دیسک در نتایج اندازه‌گیری‌ها، به مقایسه‌ی نتایج روش‌های یک الکترودی و چهار الکترودی پرداختند [۱۷].

در این پژوهش به مقایسه‌ی نتایج روش‌های طیف‌نگاری مقاومت ظاهری، یک الکترودی و چهار الکترودی با روش ASTM C1760 پرداخته شده است. در پژوهش‌های آزمایشگاهی بیشتر از روش طیف‌نگاری مقاومت ظاهری استفاده می‌شود در حالی که به تازگی دستور استاندارد ASTM C1760 در سال ۲۰۱۲ منتشر شده است. روش‌های دو و چهار الکترودی نیز دارای کارکرد مشابهی در اندازه‌گیری‌های کارگاهی است؛ در حالی که روش دو الکترودی به علت وابستگی شدید به جزئیات و مشخصات سازه منسوخ شده

سازه‌های بتنی گسترش داده شد [۲۰ و ۲۱]. در این روش جریان متناوب کوچکی (معمولاً دارای فرکانس ۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز) بین الکترودهای خارجی اعمال می‌شود و اختلاف پتانسیل بین الکترودهای داخلی اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲). فاصله‌ی الکترودها در روش ونر برابر است و ثابت سلول نیز با در نظر گرفتن فرضیاتی-که در ادامه اشاره می‌شود- و به کمک روابط تئوری $2\pi a$ به دست می‌آید [۵۱].

شکل ۲ روش چهار الکترودی در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن [۲۲]

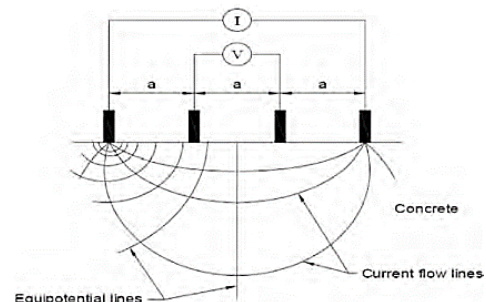


Fig. 2. Four electrode method in electrical resistivity measurement of concrete

ثابت سلول به دست آمده، در صورتی دارای دقت کافی است که ناحیه‌ی خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل در یک حجم نیمه بی‌نهایت از یک ماده‌ی همگن قرار داشته باشند. همچنین نقطه‌ی تماس الکترودها با ماده، بی‌نهایت کوچک باشد [۱]. عدم تأمین این موارد در آزمونه‌ی بتنی مورد اندازه‌گیری می‌تواند منبع بروز خطاهایی باشد. این موارد خطا شامل: ۱- محدودیت‌های هندسی، ۲- سطح تماس، ۳- ناهمگنی بتن، ۴- حضور آرماتورهای مسلح کننده‌ی فولادی، و ۵- لایه‌های سطحی که مقاومت الکتریکی متفاوتی نسبت به توده‌ی بتن دارند، است.

ابعاد سازه‌ی بتنی در مقایسه با فاصله‌ی الکترودها، بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تأثیر دارد و در سازه‌های با ابعاد نسبی بزرگ‌تر، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. توصیه شده است که فاصله‌ی بین الکترودها، کم‌تر از $\frac{1}{4}$ کمینه ابعاد مقطع بتنی باشد [۲۲]. معمولاً فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متری بین الکترودها برای قرائتی دقیق در بیشتر سازه‌های بتنی کافی است [۲۳]. تماس بین الکترودها و بتن باید به خوبی برقرار باشد که این مثلاً با استفاده از ژل‌های هادی که به هنگام فشار تخلیه می‌شوند، یا استفاده از عمل‌کرد فنی در الکترودها به همراه

است. همچنین روش یک الکترودی نیز از تکنیک‌های جدید اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن پوشش آرماتورها در بتن مسلح به شمار می‌رود. هر یک از این روش‌ها دارای مشخصات و کارکردهای منحصر به فردی هستند و این دلیل انتخاب و اهمیت موضوع است. با توجه به این‌که پژوهش‌های گذشته، نتیجه‌ی جامعی برای ثابت سلول در روش یک الکترودی به همراه نداشته است، در این پژوهش ابتدا مقدار ثابت سلول در مقایسه با روش استاندارد محاسبه شده و سپس با اعمال مقدار میانگین آن به مقادیر مقاومت الکتریکی، مقاومت ویژه الکتریکی به دست می‌آید.

۳- برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱-۳ مواد و مصالح مصرفی

برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع دو شرکت سیمان هگمتان همدان استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و پوزولان‌های مصرف شده از نوع میکروسیلیس و زئولیت در جدول (۱) آمده است. فوق روان‌کننده‌ی مصرفی بر پایه پلی کربوکسیلات و جنس سنگ‌دانه‌های استفاده شده بیشتر از کانی کوآرتزیت است. شن‌های درشت مصرفی دارای بیشینه‌ی اندازه

۱۹/۵ میلی متر با چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۶۸۶ و جذب آب ۰/۵۶٪، و شن‌های متوسط مصرفی دارای چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۶۸۸ و جذب آب ۰/۴۶٪ می‌باشند. همچنین ماسه‌ی مورد استفاده دارای چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۵۵۵ و جذب آب ۳/۲٪ است. دانه‌بندی مصالح سنگی در جدول (۲) آمده است.

۲-۳ طرح اختلاط‌ها

در این پژوهش، به منظور افزایش دقت در برقراری هم‌بستگی، بتن‌هایی با مقاومت الکتریکی کم تا بسیار زیاد ساخته شده است. ۴۹ طرح اختلاط مختلف بتن با هفت نسبت آب به سیمان ۰/۳۲، ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۲، ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵، دو عیار مواد سیمانی ۳۷۵ و ۴۲۵ کیلوگرم، پنج دانه‌بندی مختلف و پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت با درصد جای‌گزینی (به ترتیب) ۷/۵ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. مدول نرمی ماسه‌ی مصرفی ۳/۷۴ است. نسبت‌های حجمی سنگ‌دانه‌ی مصرفی در دانه‌بندی‌های مختلف در جدول (۳) و جزئیات طرح مخلوط‌ها در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۱) ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و پوزولان‌های مورد استفاده

Type	Chemical compounds (Weight percent)									Physical characteristics	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	Specific weight kg/m ³	Specific surface area m ² /kg
Cement	21.42	5.01	3.88	63.18	1.55	0.65	0.45	2.31	1.85	3120	293
Silica fume	85-95	1.1	0.4-2	-	-	0.76	0.17	-	1	2246	1400
Zeolite	67.79	13.66	1.44	1.68	1.20	1.42	2.04	0.52	10.23	2268	320

Table (1) chemical compositions and physical specifications of cement and pozzolans

جدول (۲) دانه بندی سنگ دانه‌های مصرفی بر حسب مقادیر رد شده از الک‌های استاندارد

Sieve opening (mm)	0.15	0.3	0.6	1.18	2.38	4.75	9.5	19
Coarse gravel (%)	0	0	0	0	0	0.20	1.00	98.30
Fine gravel (%)	0	0	0	0	0	0.20	15.43	100
Sand (%)	0.79	6.76	20.77	40.66	66.27	91.03	100	100

Table (2) Standard Sieve analysis of aggregate

جدول (۳) نسبت‌های حجمی سنگ‌دانه مصرفی در بتن

Grading No.	Volumetric portions of aggregates		
	Coarse gravel	Fine gravel	Sand
1	0.1	0.05	0.85
2	0.15	0.1	0.75
3	0.2	0.15	0.65
4	0.3	0.15	0.55
5	0.3	0.25	0.45

Table (3) Volume fraction of aggregate

۳-۳ ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای کلیه‌ی طرح مخلوط‌ها، ۴ آزمونه‌ی استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و یک آزمونه‌ی دال مستطیلی به ضلع ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع حدوداً ۱۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در هر آزمونه‌ی دال، سه میلگرد با طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر به طوری که فاصله‌ی مرکز آن تا یک سطح دال، ۲۰ میلی‌متر باشد، به طور کامل در بتن مدفون شده است. میلگردها به شکل موازی و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۰۰ میلی‌متر در کنار هم و وسط ضلع ۳۰۰ میلی‌متری قرار گرفته‌اند. از هر دو انتهای سه میلگرد، سیمی با پوشش پلاستیکی از دال خارج شده که امکان برقراری اتصال به میلگردها برای اندازه‌گیری فراهم باشد (شکل ۳). هم‌چنین لازم به گفتن است که کلیه‌ی اندازه‌گیری‌ها از سمت با پوشش کم‌تر دال‌ها (پوشش ۲۰ میلی‌متری) صورت گرفته و برای هر آزمونه‌ی دال، به منظور اطمینان از برقراری اتصال سیم‌ها با میلگردها، شش قرائت به کمک شش سیم موجود در نقاط

مختلف دال انجام شده و میانگین این نتایج گزارش شده است. اختلاط بتن بر مبنای دستور ASTM C192 [۲۵] انجام گرفته و سپس بلافاصله جای دهی در قالب و تراکم به وسیله یمپله طبق همان دستور انجام شده و آزمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به مدت ۲۷ روز در آب مستغرق می‌شدند. پس از پایان زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها از آب خارج و برای آزمایش مقاومت الکتریکی مهیا می‌شوند. بدین ترتیب که هر آزمونه پس از خروج از آب، مدتی را در محیط آزمایشگاه مانده تا به حالت اشباع با سطح خشک برسد. این زمان با توجه به دما و رطوبت محیط متغیر است. آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به میزان رطوبت آزمونه‌ها شدیداً حساس است [۱]؛ بنابراین باید دقت زیادی در زمان شروع آزمایش به عمل آید تا شرایط یکسانی بر همه‌ی آزمونه‌ها حاکم شود. هم‌چنین از آن‌جا که مقادیر طول و قطر آزمونه‌ها در محاسبات ثابت سلول موثر است، این ابعاد به وسیله‌ی کولیس و با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند.

آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به روش طیف‌نگاری مقاومت ظاهری، به کمک دو صفحه‌ی مسی که در طرفین آزمونه قرار می‌گیرند، انجام می‌شود (شکل ۴-الف). بدین ترتیب که لایه‌ی نازکی از خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان بالا را به طرفین آزمونه مالیده تا پس از قرارگیری صفحات مسی و استقرار وزنه‌ای روی آن، ارتباط بین آزمونه با صفحات به خوبی برقرار شود. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش، توانایی اعمال جریان متناوب تا فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز را دارد و قرائت‌ها در فرکانسی انجام می‌شود که پایین‌ترین اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان وجود داشته باشد.

شکل ۳ شمای کلی و محل استقرار میلگردها در آزمونه‌ی دال

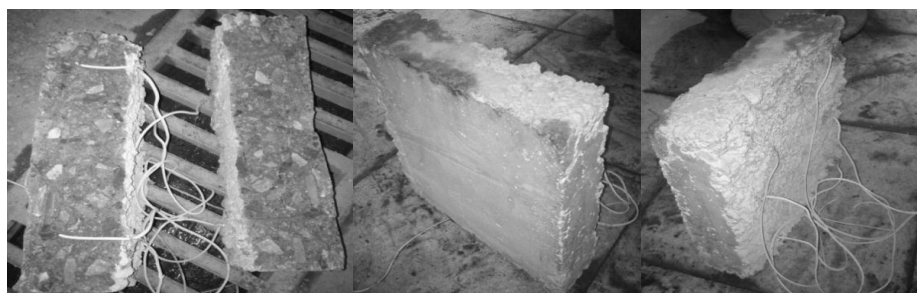


Fig. 3. Slabs and reinforcement places

به منظور حذف تأثیر ابعاد آزمون در مقاومت الکتریکی، که در آن R_s مقاومت ویژه الکتریکی بتن بر حسب اهم-متر، مقاومت الکتریکی مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود؛

$$R_s = \frac{R \times A}{L} \quad (۲)$$

متر و A مساحت سطح مقطع آزمون بر حسب متر مربع است.

جدول (۴) جزئیات مقادیر طرح اختلاط بتن

No.	Name	W/C (by weight)	Water	Cement	Pozzolan	Grading No.	Coarse gravel (SSD)	Fine gravel (SSD)	Sand (SSD)	Superplasticizer (by weight)
			kg/m ³				kg/m ³			
1	214-SP	0.35	131.3	375	-	4	587.1	293.8	1023.8	0.61%
2	224-SP	0.35	148.8	425	-	4	560.1	280.2	976.7	0.48%
3	213-SP	0.35	131.3	375	-	3	391.4	293.8	1210.0	0.98%
4	223-SP	0.35	148.8	425	-	3	373.4	280.2	1154.3	0.58%
5	514-SP	0.45	168.8	375	-	4	556.9	278.6	971.1	0.45%
6	524-SP	0.45	191.3	425	-	4	525.8	263.1	917.0	0.43%
7	513-SP	0.45	168.8	375	-	3	371.2	278.6	1147.7	0.26%
8	523-SP	0.45	191.3	425	-	3	350.5	263.1	1083.7	0.21%
9	S-SP-114	0.32	121.4	346.9	28.1(s)	4	592.2	296.3	1032.7	0.60%
10	S-SP-124	0.32	137.6	393.1	31.9(s)	4	565.8	283.1	986.8	0.75%
11	S-SP-113	0.32	121.4	346.9	28.1(s)	3	394.8	296.3	1220.5	0.68%
12	S-SP-123	0.32	137.6	393.1	31.9(s)	3	377.2	283.1	1166.2	0.61%
13	S-SP-414	0.42	156.1	346.9	28.1(s)	4	564.2	282.3	984.0	0.50%
14	S-SP-424	0.42	176.9	393.1	31.9(s)	4	534.2	267.3	931.5	0.32%
15	S-SP-413	0.42	156.1	346.9	28.1(s)	3	376.2	282.3	1162.9	0.51%
16	S-SP-423	0.42	176.9	393.1	31.9(s)	3	356.1	267.3	1100.9	0.46%
17	Z-SP-114	0.32	118.1	337.5	37.5(z)	4	594.0	297.2	1035.9	1.03%
18	Z-SP-124	0.32	133.9	382.5	42.5(z)	4	567.9	284.2	990.4	0.88%
19	Z-SP-113	0.32	118.1	337.5	37.5(z)	3	396.0	297.2	1224.3	0.58%
20	Z-SP-123	0.32	133.9	382.5	42.5(z)	3	378.6	284.2	1170.5	1.26%
21	Z-SP-414	0.42	151.9	337.5	37.5(z)	4	566.8	283.6	988.5	1.05%
22	Z-SP-424	0.42	172.1	382.5	42.5(z)	4	537.1	268.7	936.7	0.63%
23	Z-SP-413	0.42	151.9	337.5	37.5(z)	3	377.9	283.6	1168.2	1.04%
24	Z-SP-423	0.42	172.1	382.5	42.5(z)	3	358.1	268.7	1107.0	0.63%
25	No SP-211	0.35	206.3	375	-	1	175.5	87.8	1419.4	-
26	No SP-311	0.40	131.3	375	-	1	195.7	97.9	1582.2	-
27	No SP-511	0.45	150.0	375	-	1	190.7	95.4	1541.5	-
28	No SP-611	0.50	168.8	375	-	1	185.6	92.9	1500.8	-
29	No SP-711	0.55	187.5	375	-	1	180.6	90.4	1460.1	-
30	No SP-212	0.35	206.3	375	-	2	263.3	175.7	1252.4	-
31	No SP-312	0.40	131.3	375	-	2	293.5	195.8	1396.1	-
32	No SP-512	0.45	150.0	375	-	2	286.0	190.8	1360.2	-
33	No SP-612	0.50	168.8	375	-	2	278.4	185.8	1324.2	-
34	No SP-712	0.55	187.5	375	-	2	270.9	180.7	1288.3	-
35	No SP-213	0.35	206.3	375	-	3	351.1	263.5	1085.4	-
36	No SP-313	0.40	131.3	375	-	3	391.4	293.8	1210.0	-
37	No SP-513	0.45	150.0	375	-	3	381.3	286.2	1178.8	-
38	No SP-613	0.50	168.8	375	-	3	371.2	278.6	1147.7	-
39	No SP-713	0.55	187.5	375	-	3	361.2	271.1	1116.5	-
40	No SP-214	0.35	206.3	375	-	4	526.6	263.5	918.4	-
41	No SP-314	0.40	131.3	375	-	4	587.1	293.8	1023.8	-
42	No SP-514	0.45	150.0	375	-	4	572.0	286.2	997.5	-
43	No SP-614	0.50	168.8	375	-	4	556.9	278.6	971.1	-
44	No SP-714	0.55	187.5	375	-	4	541.7	271.1	944.8	-
45	No SP-215	0.35	206.3	375	-	5	526.6	439.2	751.4	-
46	No SP-315	0.40	131.3	375	-	5	587.1	489.6	837.7	-
47	No SP-515	0.45	150.0	375	-	5	572.0	477.0	816.1	-
48	No SP-615	0.50	168.8	375	-	5	556.9	464.4	794.5	-
49	No SP-715	0.55	187.5	375	-	5	541.7	451.8	773.0	-

Table 4. Mix designs

استوانه‌ای، و آزمایش‌های روش یک الکترودی به علت لزوم حضور میلگرد، به کمک آزمونه‌ی دال انجام شده است. لازم به گفتن است که به علت محدودیت‌های موجود در تأمین تجهیزات، اندازه‌گیری برخی از طرح‌ها با روش‌های یک و چهار الکترودی، میسر نشده است؛ به همین دلیل مقایسه‌ی بین نتایج روش‌های مختلف در این بتن‌ها، تنها برای داده‌های موجود انجام گرفته است.

شکل ۵ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به روش‌های کارگاهی



الف) روش یک الکترودی

a) One electrode method



ب) روش چهار الکترودی

b) Four electrode method

Fig. 5. Electrical resistivity measurement with insitu methods

۴- نتایج

۱-۴ مقایسه‌ی نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری با روش استاندارد

نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۴۹ طرح مخلوط ساخته شده با هر دو روش طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 در شکل (۶) برای آزمونه‌ها، و در شکل (۷) برای طرح مخلوط‌ها (میانگین آزمونه‌ها در هر طرح مخلوط) نشان داده شده است. در شکل‌های (۸) و (۹) نیز به ترتیب میزان اختلاف نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری از روش ASTM C1760 برای آزمونه‌ها و طرح مخلوط‌ها (میانگین آزمونه‌ها در هر طرح مخلوط) نمایش داده شده است.

اندازه‌گیری با روش ASTM C1760 مطابق همان دستور انجام می‌شود (شکل ۴-ب). لازم به گفتن است که روش ASTM C1760 به اندازه‌گیری هدایت ویژه و نه مقاومت ویژه الکتریکی اختصاص دارد؛ اما به منظور قابل مقایسه نمودن روش‌ها و با توجه به رابطه‌ی عکس بین هدایت و مقاومت الکتریکی، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه شده‌اند.

در این پژوهش، آزمایش‌های روش یک الکترودی به کمک دستگاه GalvaPulse GP-5000 از محصولات شرکت Germann Instruments انجام شده که دارای دیسکی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر است (شکل ۵-الف). این دستگاه میزان مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده را مستقیماً در خروجی نمایش داده و محاسبه و اعمال ثابت سلول بر عهده‌ی کاربر است.

شکل ۴ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به روش‌های آزمایشگاهی



الف) روش طیف نگاری مقاومت ظاهری

a) Impedance spectroscopy method method



ب) روش ASTM C1760

b) ASTM C1760

Fig. 4. Electrical resistivity measurement with laboratory methods

دستگاه چهار الکترودی استفاده شده در این پژوهش نیز محصولی با نام Resipod از شرکت Proceq بوده و فاصله‌ی بین الکترودهای آن ۵۰ میلی‌متر است (شکل ۵-ب). این دستگاه با اعمال ثابت سلول ارائه شده در بخش (۳/۲)، مستقیماً مقاومت ویژه الکتریکی را در خروجی محاسبه می‌کند. در این پژوهش، آزمایش‌های روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری، ASTM C1760 و چهار الکترودی به کمک آزمونه‌های

شکل ۶ مقایسه‌ی روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 در بتن‌های مختلف (آزمونه‌ها)

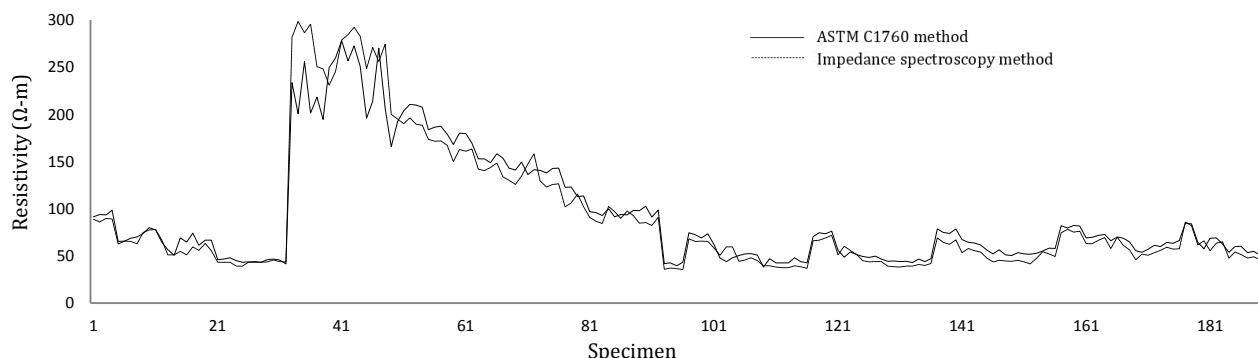


Fig. 6. Comparison between impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods in different concrete (specimens)

شکل ۷ مقایسه‌ی روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 در بتن‌های مختلف (طرح مخلوط‌ها)

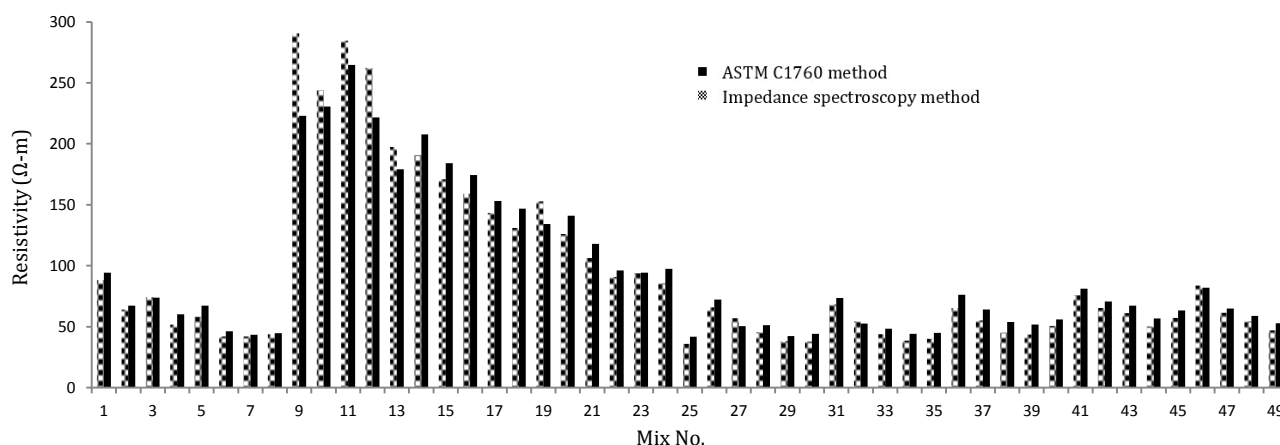


Fig. 7. Comparison between impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods in different concrete (mix designs)

شکل ۸ اختلاف نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری از روش ASTM C1760، به ۱۵٪ محدود می‌شود. در شکل (۱۰)، همبستگی بین دو روش و رابطه‌ی آن برای اندازه‌گیری‌های انجام شده در تمامی آزمونه‌ها ارائه شده است.

شکل ۹ اختلاف نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری از روش ASTM C1760 برای بتن‌های مختلف (طرح مخلوط‌ها)

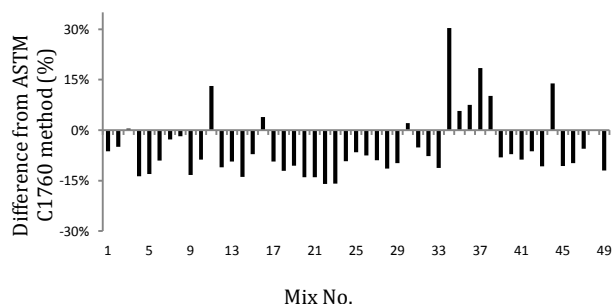


Fig. 9. Difference between results of impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods in different concrete (mix designs)

شکل ۸ اختلاف نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری از روش ASTM C1760 برای بتن‌های مختلف (آزمونه‌ها)

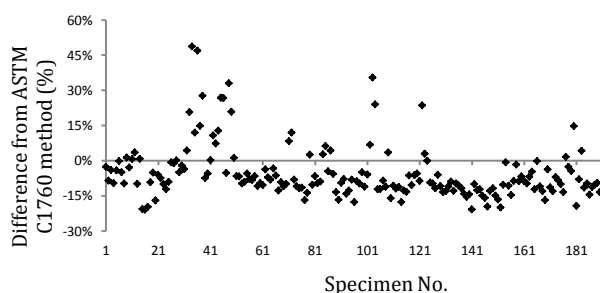


Fig. 8. Difference between results of impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods in different concrete (specimens)

به طور میانگین در میان تمامی آزمونه‌ها، نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری در حدود ۵/۵٪ از نتایج روش ASTM C1760 کوچک‌تر است. با توجه به شکل (۹)، به جز چهار طرح مخلوط، اختلاف بین روش طیف نگاری مقاومت ظاهری با

شکل ۱۲ اختلاف نتایج روش یک الکترودی از روش ASTM C1760 در بتن‌های مختلف

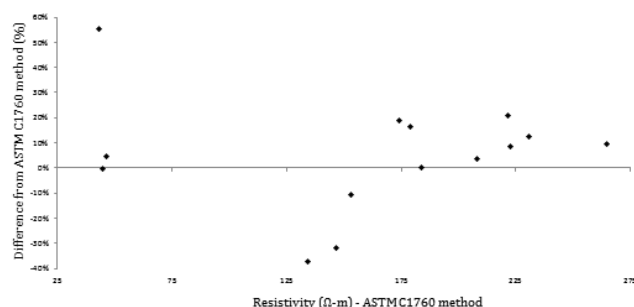


Fig. 12. Difference between results of one electrode and ASTM C1760 methods in different concrete

مطابق شکل (۱۲)، بیشتر نتایج در محدوده‌ی اختلاف ۲۰٪ با روش استاندارد است. به طور میانگین، نتایج روش یک الکترودی ۵٪ از روش ASTM C1760 بالاتر است. در شکل (۱۳)، همبستگی بین دو روش یک الکترودی و ASTM C1760 و رابطه‌ی آن برای اندازه‌گیری‌های انجام شده در همه‌ی بتن‌ها ارائه شده است.

شکل ۱۳ بررسی همبستگی بین نتایج روش‌های یک الکترودی و ASTM C1760 در اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن

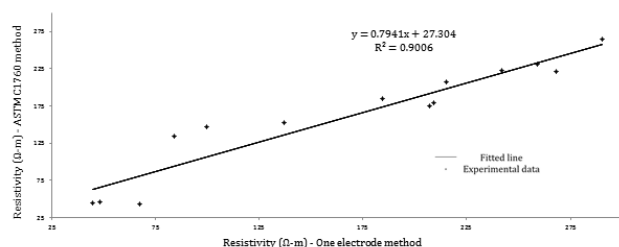


Fig. 13. Correlation between results of one electrode and ASTM C1760 methods in measuring electrical resistivity of concrete

شکل ۱۴ مقایسه‌ی روش‌های ASTM C1760 و چهار الکترودی در بتن‌های مختلف (آزمونه‌ها)

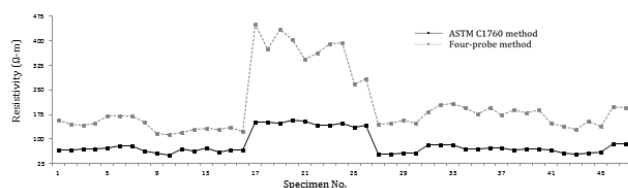


Figure 14. Comparison between four electrode and ASTM C1760 methods in different concrete (specimens)

شکل ۱۰ بررسی همبستگی بین نتایج روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 در اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن

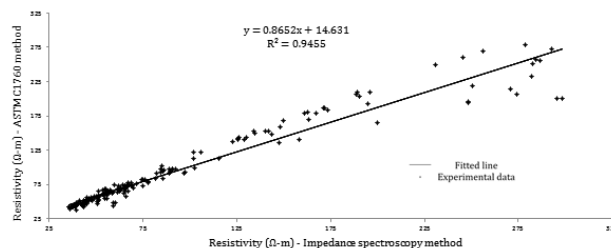


Fig. 10. Correlation between results of impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods in measuring electrical resistivity of concrete

۲-۴ مقایسه‌ی نتایج روش یک الکترودی با روش استاندارد از آنجا که قطر دیسک از پوشش بتن بزرگتر است، رابطه‌ی جامعی برای محاسبه‌ی ثابت سلول در روش یک الکترودی وجود ندارد و این کار باید از طریق مقایسه با نمونه‌ی استاندارد انجام گیرد. بنابراین به کمک مقایسه‌ی نتایج روش یک الکترودی با روش استاندارد، ثابت سلول برای هر طرح مخلوط محاسبه شده است (شکل ۱۱).

شکل ۱۱ ثابت سلول در روش یک الکترودی

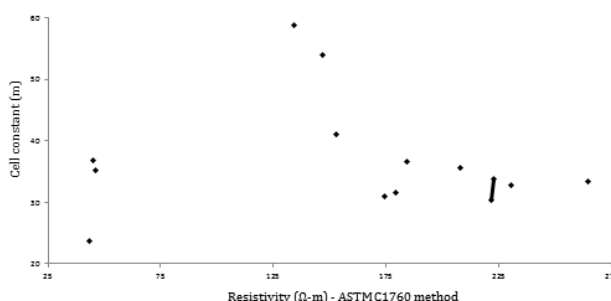


Fig. 11. Cell constant in one electrode method

با توجه به شکل (۱۱)، ثابت سلول بیشتر در محدوده‌ی ۳۰ تا ۴۰ متر تغییر می‌کند و ارتباط مشخصی بین آن و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی وجود ندارد. به طور میانگین در بین همه‌ی طرح مخلوط‌ها، ثابت سلول ۳۷/۵۸ متر است. به این ترتیب با اعمال این مقدار در مقاومت الکتریکی به دست آمده از روش یک الکترودی، مقادیر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی به دست می‌آید. در شکل (۱۲) نیز میزان اختلاف نتایج روش یک الکترودی از روش استاندارد نمایش داده شده است.

به طور میانگین در بین تمامی آزمون‌ها، نتایج روش چهار الکترودی $138/8\%$ بزرگ‌تر از روش استاندارد است. در شکل (۱۷)، هم‌بستگی بین دو روش چهار الکترودی و ASTM C1760 بررسی شده و رابطه‌ی آن برای اندازه‌گیری‌های انجام شده در تمامی آزمون‌ها ارائه شده است.

۵- بحث روی نتایج

بررسی‌ها بیانگر وجود اختلاف ناچیزی بین نتایج روش‌های طیف نگاری مقاومت ظاهری و ASTM C1760 در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن‌های مختلف است. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در مقاومت الکتریکی، به علت ساز و کار متفاوت در نظر گرفته شده در روش استاندارد، معمولاً اعداد بزرگ‌تری را (به طور میانگین $5/5\%$) نسبت به روش طیف نگاری مقاومت ظاهری نتیجه می‌دهد و این اختلاف بیشتر به 15% محدود می‌شود، اما از آنجا که اختلاف بین نتایج آزمون‌های مختلف از یک طرح مخلوط ساخته شده در این پژوهش، معمولاً در همین محدوده است، نمی‌توان اختلاف 15% را معنادار دانست. همچنین نتایج به دست آمده در بتن‌های با مقاومت الکتریکی بالا، برخلاف سایر موارد بوده که به نظر می‌رسد به علت ضعف روش طیف نگاری مقاومت ظاهری در اندازه‌گیری دقیق این محدوده از مقاومت الکتریکی باشد. در روش یک الکترودی، با توجه به ویژگی‌های تجهیزات استفاده شده و ابعاد آزمون ساخته شده، رابطه‌ی جامعی برای محاسبه‌ی ثابت سلول موجود نیست و به همین دلیل، این مقدار با مقایسه با نتایج روش استاندارد بدست آمده است. رابطه‌ی مشخصی بین ثابت سلول و مقاومت ویژه الکتریکی بتن مشاهده نشد و به طور میانگین، مقدار ثابت سلول برای تمامی بتن‌ها در حدود 37 متر محاسبه شد که با اعمال آن، مقاومت ویژه الکتریکی در روش یک الکترودی به دست آمد. اختلاف بین نتایج این روش با روش استاندارد نیز در محدوده‌ی 20% بوده و به طور میانگین، مقاومت‌های الکتریکی اندازه‌گیری شده با روش یک الکترودی 5% بزرگ‌تر از روش استاندارد است که این اختلاف نیز معنادار نیست. در روش چهار الکترودی، با توجه به ویژگی‌های تجهیزات استفاده شده و ابعاد و شرایط

۳-۴ مقایسه‌ی نتایج روش چهار الکترودی با روش استاندارد
نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با روش‌های ASTM C1760 و چهار الکترودی برای آزمون‌های مختلف در شکل (۱۴) نشان داده شده است؛

شکل ۱۵ اختلاف نتایج روش‌های ASTM C1760 و چهار الکترودی در بتن‌های مختلف (آزمون‌ها)

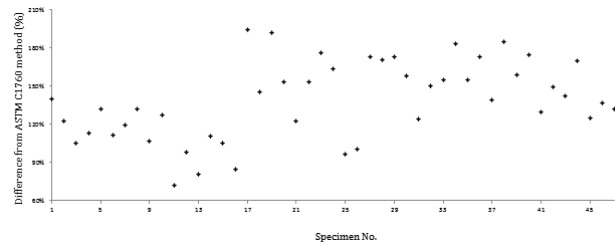


Fig. 15. Difference between four electrode and ASTM C1760 in different concrete (specimens)

شکل (۱۶) اختلاف نتایج روش‌های ASTM C1760 و چهار الکترودی در بتن‌های مختلف (طرح مخلوط‌ها)

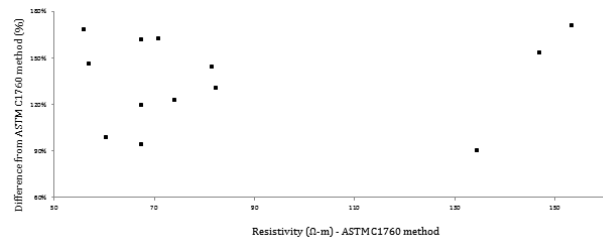


Fig. 16. Difference between results of four electrode and ASTM C1760 methods in different concrete (mix designs)

شکل ۱۷ بررسی هم‌بستگی بین نتایج روش‌های چهار الکترودی و ASTM C1760 در اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن

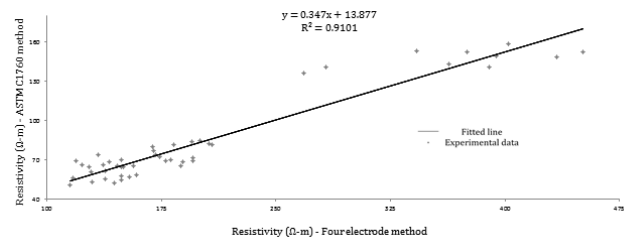


Fig. 17. Correlation between results of four electrode and ASTM C1760 in measuring electrical resistivity of concrete

در شکل (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب میزان اختلاف نتایج روش چهار الکترودی از روش ASTM C1760 برای آزمون‌ها و طرح مخلوط‌ها (میانگین آزمون‌ها در هر طرح مخلوط) نمایش داده شده است.

Structures, 33(10), pp. 603-611.

[۶] شکرچی زاده، محمد (۱۳۸۰). "استفاده از روش‌های الکتریکی برای تعیین مقدار آب در بتن سخت شده"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه، ایران، تهران.

[7] Andrade, C., d'Andrea, R., Rebolledo, N. (2014). "Chloride Ion Penetration in Concrete: the Reaction Factor in the Electrical Resistivity Model." *Cement & Concrete Composite*, 47, pp. 41-46.
[8] Li, Z., Xiao, L., Wei, X., Zhang, J. (2008). "Interpretation of MicroStructure Development of Cementitious Materials In Early Ages With Electrical Resistivity Measurment." 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China.

[9] Mei, ZH., Chung, D.D.L. (2000). "Effects of Temperature and Stress on the Interface Between Concrete and its Carbon Fiber Epoxy-Matrix Composite Retrofit, Studied by Electrical Resistance Measurement." *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 799-802.

[10] Gjorv, O. E., Vennesland, O., El-Busaidy, A. H. S. (1977). "Electrical Resistivity of Concrete in the Oceans." 9th Annual Offshore Technology Conference, paper 2803, Houston.

[11] Tuutti, K. (1982). "Corrosion of Steel in Concrete." CBI Stockholm.

[12] ASTM C1760-12.(2012). "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.", ASTM International, West Conshohocken, PA, 5p.

[13] Li, Z., Li, W. (2003). "Contactless Transformer-Based Measurment of the Resistivity of Materials.", United States Patent, patent No. Us 6, 639, 401 B2.

[14] Elkey, W. and Sellevold, E.J. (1995). "Electrical Resistivity of Concrete." Norwegian Road Research Laboratory, Publication No. 80.

[15] Hammond, E. and Robson, T.D. (1955). "Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes." *The Engineer*, 199(5156), pp. 78-80, 199(5166), pp. 114-115.

[16] Broomfield, J.B. (1997). "Corrosion of Steel in Concrete." FN Spon, an Imprint of Chapman & Hall, London, 238p.

[17] Feliu, S., Andrade, C., González, J.A., Alonso, C. (1996). "A New Method for In-Situ Measurement of Electrical Resistivity of Reinforced Concrete." *Materials and Structures*, 29, pp. 362-365.

[18] Elsener, B., Fluckiger, D., Wojtas, H., Bohni, H. (1996). "Methods for the Evaluation of Corrosion of Steel in Concrete." Swiss Federal Department of Traffic and Energy, ASB Research for the Maintenance of Bridges, VSS Report 521, 140p.

[19] Wenner, F. (1916). "A Method of Measuring Earth Resistivity." *Bulletin of the Bureau of Standards*, 12(4), pp. 469-478.

[20] Stratfull, R. F. (1968). "Materials Protection." 29.

[21] Naish, C.C., Harker, A., Carney, R.F.A. (1990). "Concrete Inspection: Interpretation of Potential and Resistivity Measurements." *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, pp. 314-332.

[22] Gowers, K.R. and Millard, S.G. (1999). "Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique." *ACI Materials Journal*, 96(5), pp. 536-542.

[23] Gowers, K.R. and Millard, S.G. (1991). "The Effect of Steel Reinforcement Bars on the Measurement of Concrete Resistivity." *British Journal of Non-Destructive Testing*, 33(11), pp. 551-554.

[24] McCarter, W.J., Barclay, S. (1993). "A Comparison of Two Methods For Resistivity Measurements On Repair Mortar For Cathodic Protection Systems." *Cement and Concrete Research*, 23 (5), pp. 1178-1184.

[25] ASTM C192-02.(2002). "Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory." ASTM International, West Conshohocken, PA, 8p.

آزمونه ساخته شده، دو عامل بیشینه اندازه‌ی سنگ‌دانه و محدودیت‌های هندسی، ممکن است منشأ بروز خطا باشد. از آن‌جا که فاصله‌ی بین الکترودها از ۱/۵ برابر بیشینه اندازه‌ی سنگ‌دانه بیشتر است، پس این عامل نمی‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج به وجود آورد. اما فاصله‌ی بین الکترودها از $\frac{1}{4}$ کمینه ابعاد مقطع بیش‌تر است که این موجبات عدم دستیابی شرط حجم نیمه بی‌نهایت را فراهم می‌کند و منشأ بروز خطا در نتایج روش چهار الکترودی می‌شود. به این ترتیب، نتایج حاکی از آن است که در شرایط ذکر شده برای آزمونه و تجهیزات روش چهار الکترودی، نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در حدود ۱۴۰ درصد از نتایج روش استاندارد بزرگ‌تر است.

۶- نتیجه گیری

نتایج اصلی این پژوهش با توجه به جزئیات تجهیزات و آزمونه‌های ساخته شده و شرایط آزمایش به شرح زیر بیان می‌شود:

۱. اختلاف نتایج روش طیف نگاری مقاومت ظاهری با روش ASTM C1760 قابل چشم‌پوشی است.

۲. در صورت عدم وجود تجهیزات روش استاندارد، استفاده از روش طیف نگاری مقاومت ظاهری و بهره‌گیری از نتایج آن به جای روش استاندارد بلامانع است.

۳. الگوی خاصی در رابطه‌ی بین ثابت سلول و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن مشاهده نشد. ثابت سلول در روش یک الکترودی بیشتر به ۳۰ تا ۴۰ متر محدود می‌شود و به طور میانگین در حدود ۳۷ متر است.

۴. به علت عدم تأمین ابعاد لازم در آزمونه‌ی ساخته شده، نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با روش چهار الکترودی در حدود ۱۴۰٪ بزرگ‌تر از روش استاندارد است.

References

۷- مراجع

- [1] Whiting, D.A., Nagi, M.A. (2003). "Electrical Resistivity of Concrete Literature Review." Portland Cement Association, Serial No. 2457.
- [2] Esbach, O.E. and Souders, M. (1975). "Handbook of Engineering Fundamentals." Joun Wiley & Sons, New York.
- [3] Harper, C.A. (1978). "Fundamentals of Electrical Insulating Materials." *Industrial Research/Development*, 20(12), pp. 81-84.
- [4] ASTM C876-91. (1999). "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete." ASTM International, West Conshohocken, PA, 6p.
- [5] Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). "Test Methods for On Site Measurment of Resistivity of Concrete." *Materials and*

Experimental study on correlation between the results of different methods of measuring the electrical resistivity of concrete

Parsian, H.1, Tadayon, M.2, Mostofinejad, D.3

- 1- M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Isfahan
- 2- Lecturer, Technical Faculty, Boo Ali Sina University
- 3- Prof., Faculty of Civil Engineering, Technical University of Isfahan

dmostofi@cc.iut.ac.ir

Abstract

The purpose of this research is to develop relationships to predict the results of measuring the electrical resistivity of the standard test method ASTM C1760 with assistance of other methods' results. Comparative Methods in this paper are Impedance spectroscopy method, one electrode method and four electrode method. Impedance spectroscopy method is the most common in laboratory studies, ASTM C1760 method (Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete) only has a standard rule and use in laboratory, one electrode method is a new technique in field and it's application is in the reinforcement structures, and four electrode measurements are more common in field. In laboratory methods, bulk electrical resistivity measured but in field, usually surface electrical resistivity evaluated, that is why several source of errors affecting on the results of this test methods. To reach the aim of this research, 49 mix designs with a vast domination of electrical resistivity from about 40 ($\Omega\cdot m$) to 290 ($\Omega\cdot m$) was intended and for each of mix designs, 4 cylindrical and one reinforced slab specimen were made. reinforced slab specimen for one electrode measurement and cylindrical specimens for the other test method measurements were considered. Moreover, the electrical resistance of the aforementioned methods was measured at 28 days age. The results showed that there is a negligible difference between the results of impedance spectroscopy and ASTM C1760 methods; however, the electrical resistivity measured by ASTM C1760 method was slightly higher than the results of impedance spectroscopy method in the concrete. As a result, we can use the results of the impedance spectroscopy method instead of standard test method results in the lack of facilities with accepting about 5% of error. In the four electrode method, a number of factors including the imbalance among the distances between electrodes and structure dimensions can result systematic errors. That is why the measurements' results with the method is approximately 140% larger than the standard test method results. Due to the lack of a comprehensive relationship for calculating the cell constant in the one electrode method, the value of this constant was obtained by comparing the results of the standard test method. After that, the electrical resistivity values were calculated. Electrical resistivity measurement results which was obtained by this method had also little difference with the standard test method results. Finally 3 relationships separately developed for predicting the result of standard test method from results of the each other test methods. Since the features and conditions of measuring by the standard test method are not available in the entire projects, the current results are capable to predict the standard method's results with assistance of other methods' results.

Keywords. Electrical resistivity of concrete, Impedance spectroscopy, ASTM C1760, One-electrode, Four-electrode.