

## اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن با روش های حجمی، سطحی، گالوپالس و هدایت الکتریکی

مصطفی خانزادی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

محسن تدین

عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا

محمد سعید ملکی \*

کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

سجاد ذهبی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد حسین تدین

دانشجوی دکتری عمران - سازه دریایی، دانشگاه تهران

### چکیده

فرسودگی سازه های بتن مسلح یکی از مسائل بسیار مهم است که هزینه تعمیر یا جایگزینی آن ها باعث به وجود آمدن خسارات اقتصادی بسیار زیادی می شود. یکی از دلایل عمده این آسیب دیدگی ها، خوردگی آرماتورهای فولادی مدفون در بتن است. اندازه گیری میدانی مقاومت الکتریکی بتن، اساساً به عنوان شاخصی از فعالیت خوردگی آرماتورها استفاده می شود. مقاومت الکتریکی جزء مهمی از سلول خوردگی است. مقاومت بیشتر، باعث عبور جریان خوردگی کمتر بین نواحی آندی و کاتدی فولاد است. در نتیجه، مقاومت الکتریکی نقش مهمی را در کنترل نرخ خوردگی فولاد مسلح کننده بازی می کند. در این تحقیق روش های مختلف اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن از جمله روش حجمی، سطحی (ونر)، گالوپالس و روش استاندارد هدایت الکتریکی ASTM C1760 با یکدیگر مقایسه می گردند. بدین منظور دو مخلوط بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و مقدار مواد سیمانی ۳۷۵ و ۴۲۵ کیلوگرم در متر مکعب و ۳ و ۴ مخلوط بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴ شامل طرح حاوی مواد لزجت زا، طرح حاوی پودر سنگ و طرح فاقد افزودنی ساخته شد و آزمایش های برنامه ریزی شده در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز بر روی آن ها انجام شد. نتایج نشان دهنده وجود ارتباط قوی میان روش های مختلف اندازه گیری است.

واژه های کلیدی: مقاومت ویژه الکتریکی، هدایت الکتریکی، خوردگی.

\* نویسنده مسئول: s\_maleki@civileng.iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

و مکمل‌های سیمانی، فاکتورهای هستند که بر ریزساختار ماتریس سیمانی بتن و منافذ آن اثرگذارند؛ بنابراین بر مقاومت الکتریکی بتن نیز تأثیر گذارند [۵،۶].

مقاومت الکتریکی بتن تابع پارامترهایی به شرح زیر است [۷]:

**ساختار فیزیکی بتن:** با افزایش تخلخل (به ویژه منافذ بزرگ) از مقاومت الکتریکی کاسته می‌شود.

**ساختار شیمیایی بتن:** وجود عناصر شیمیایی در منافذ بتن بر مقاومت الکتریکی اثر دارد. مثلاً وجود کلر در محلول منافذ باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌گردد. همچنین در محلول منافذ بتن. یون‌هایی از قبیل  $Al^{3+}$  و  $Ca^{2+}$  و  $Si^{4+}$  و  $K^{-}$  یافت می‌شوند که نوع و مقدار آن‌ها اثر مهمی مقدار مقاومت الکتریکی بتن دارد. معمولاً برای موادی مانند بتن، اندازه‌گیری جریان مستقیم (D.C) نمی‌تواند انجام شود. استفاده از اختلاف پتانسیل (D.C) در یک نمونه بتنی، جریانی ایجاد می‌کند که عمدتاً توسط یون‌های موجود در آب حفره‌ای انتقال می‌یابد. در الکترودهای اتصال اندرکنش رخ می‌دهد. این واکنش‌ها منجر به قطبی شدن می‌شوند. به دلیل تأثیرات این قطبی شدن‌ها جریان نمی‌تواند به درستی اندازه‌گیری شود [۸].

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در ابتدا دانشمندان از جریان مستقیم (D.C) استفاده می‌کردند؛ اما بعدها با انجام آزمایش‌هایی متوجه شدند که در صورت استفاده از جریان متناوب (A.C)، بتن علاوه بر رفتار مقاومتی از خود رفتار خازنی نیز نشان می‌دهد؛ بنابراین آنچه در برابر جریان مقاومت می‌کند مقاومت ظاهری بتن است که مقدار آن از رابطه (۱) به دست می‌آید [۹]:

$$Z = R[(2fCR)^2 + 1]^{-0.3} \quad (1)$$

R: مقاومت اهمی بتن ( $\Omega$ )

Z: مقاومت ظاهری<sup>۱</sup> بتن ( $\Omega$ )

f: فرکانس جریان اعمالی (KHZ)

متداول‌ترین روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی بتن روش حجمی است همچنین سه روش برای اندازه‌گیری درجا مقاومت الکتریکی استفاده می‌شود: روش دو الکترودی<sup>۲</sup>، روش چهار الکترودی<sup>۳</sup> (ونر<sup>۴</sup>)، روش اندازه‌گیری

از جمله ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌توان به مقاومت ویژه الکتریکی آن اشاره نمود. مقاومت ویژه الکتریکی بتن شاخصی برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی است. این شاخصه از بتن در سازه‌های بتن مسلح واقع در معرض خوردگی کاربرد می‌شود. در روند خوردگی بر سطح میلگرد دو منطقه آندی و کاتدی به وجود می‌آید که دارای اختلاف پتانسیل هستند. انتقال یون‌های هیدروکسیل از کاتد به آند تحت تأثیر مقاومت ویژه الکتریکی بتن صورت می‌گیرد. هر چه مقاومت ویژه الکتریکی بتن بیشتر باشد از شدت خوردگی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر خوردگی نسبت مستقیم با جریان بین آند و کاتد داشته و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد [۱]. رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی بتن و احتمال خوردگی آرماتور به شرح ذیل است:

جدول ۱- رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی بتن و احتمال

خوردگی آرماتور [۲]

مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از 120 اهم - متر	خوردگی احتمال ندارد.
مقاومت ویژه الکتریکی بین 50 اهم - متر تا 120 اهم - متر	خوردگی احتمال دارد.
مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از 50 اهم - متر	خوردگی حتمی است.

مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند به عنوان مقاومت الکتریکی یک هادی با حجم واحد و سطح مقطع ثابت که در آن جریان پیوسته و یکنواخت توزیع شده، تعریف شود [۳]. به صورت ساده‌تر می‌توان آن را به شکل مقاومت الکتریکی بین وجوه مخالف مکعبی به ضلع یک سانتیمتر (یا یک متر) تعریف کرد. این مقاومت حجمی است و اگر مقدار قابل توجهی جریان از سطح رسانا عبور کند، باید فاکتور مقاومت سطحی در نظر گرفته شود [۴].

مقاومت الکتریکی بتن به ریزساختار ماتریس سیمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات وابسته است. مقاومت الکتریکی همچنین تابعی از غلظت و تحرک یون‌ها در منافذ است. شیمی سیمان، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و استفاده مواد افزودنی

<sup>3</sup> Four-Probe

<sup>4</sup> Wenner

<sup>1</sup> -Impedance

<sup>2</sup> Two-Probe

به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شدند سپس از قالب خارج شده و عمل آوری رطوبتی تا سن انجام آزمایش‌ها صورت گرفت. همچنین در جدول (۴) نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم آورده شده است.

### ۲-۳- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

برای تعیین مقاومت الکتریکی بتن سخت شده دستورالعمل استاندارد در BS و ASTM و استانداردهای معتبر، وجود ندارد لذا برای تعیین این مقاومت از وسایل و روش خاصی استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ و سیمان

ردیف	ترکیب	پودر سنگ	سیمان
۱	SiO <sub>2</sub> (%)	۲/۸۰	۲۲/۲
۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰/۳۵	۴/۹
۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰/۵	۳/۸
۴	CaO(%)	۵۱/۲۲	۶۴/۲۵
۵	MgO(%)	۱/۸۰	۱/۵
۶	SO <sub>3</sub> (%)	۱/۲۴	۲/۳
۷	Na <sub>۲</sub> O	-	۰/۲
۸	K <sub>۲</sub> O	-	۰/۷
۹	ریزی بلین (cm <sup>2</sup> /gr)	-	۳۰۰۰
۱۰	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۶۱	۳/۱۴

### ۲-۳-۱- روش حجمی

جهت انجام این آزمایش از یک وسیله تعیین مقاومت الکتریکی با فرکانس متغیر ۱۰Hz تا 10 KHz استفاده گردید. جهت اتصال دو سر آزمون به دستگاه از صفحات مسی استفاده گردید. برای این که صفحات مسی هیچ گونه اتصالی با زمین و میز کار نداشته باشند به صفحات، پلاستیکی چسبانده شد. برای اتصال کامل صفحات مسی با سطح بتن به یک ماده رسانا نیاز است، بدین منظور از خمیر سیمان استفاده شد. خمیر سیمان از یک سو دارای یون‌های آزاد زیادی است که هادی الکتریکی با مقاومت پایین است و از سویی دیگر سبب اتصال کامل بین سطح بتن با صفحات مسی می‌شود. برای آن که از اتصال کامل مطمئن شویم از یک وزنه بر روی صفحه فوقانی استفاده شده است.

مقاومت تک الکترودی یا دیسکی<sup>۱</sup>. روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن دارای دستورالعمل استاندارد نمی‌باشند. در سال ۲۰۱۲ انجمن مواد و آزمون امریکا<sup>۲</sup> استاندارد دی به شماره C1760-12 تحت عنوان اندازه‌گیری هدایت الکتریکی بتن منتشر کرد. در این تحقیق سعی بر آن است که روش‌های مختلف اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن با یکدیگر مقایسه شده و میزان همبستگی آن‌ها باهم بررسی شود. بدین منظور آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی به روش‌های حجمی، چهار نقطه‌ای (ونر) و گالوپالس و همچنین روش استاندارد تعیین هدایت الکتریکی بتن بر روی آزمون‌های بتنی انجام می‌گیرد.

### ۲- برنامہ آزمایشگاهی

#### ۲-۱- مواد و مصالح

در ساخت مخلوط‌های بتن این پژوهش از سیمان نوع ۲ محصول کارخانه سیمان هگمتان، مصالح سنگی ریزدانه طبیعی با وزن مخصوص 2/58 gr/cm<sup>3</sup>، شن ریز (نخودی) شکسته با وزن مخصوص 2/67 gr/cm<sup>3</sup> و شن درشت (بادامی) با وزن مخصوص 2/68 gr/cm<sup>3</sup> و حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. آب مصرفی، آب شرب شهر همدان و فوق روان کننده مصرفی از نوع پلی کربوکسیلاتی است. همچنین پودر سنگ مصرفی از نوع آهکی بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

#### ۲-۲- مخلوط‌های بتن

در این پژوهش مجموعاً ۵ طرح مخلوط شامل دو مخلوط بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و مقدار مواد سیمانی 375 Kg/m<sup>3</sup> و 425 Kg/m<sup>3</sup> و ۳ مخلوط بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴ شامل طرح حاوی مواد لزوجت زا، طرح حاوی پودر سنگ و طرح فاقد افزودنی ساخته شد. مشخصات طرح مخلوط‌های ساخته شده در جدول ۳ آورده شده است. به منظور کنترل روانی طرح‌های بتن معمولی در محدوده ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر از فوق روان کننده استفاده شد. مشخصات مخلوط‌های مطالعه در جدول (۳) آورده شده است. نمونه‌ها پس از ساخت، قالب‌گیری و

<sup>2</sup> ASTM

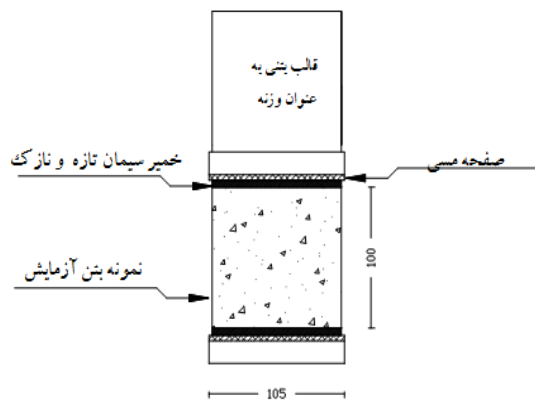
<sup>1</sup> Single-Electrode

جدول ۳- مقادیر اجزای مخلوط مطالعه شده

ردیف	نام طرح	W/C	سیمان ( $\frac{kg}{m^3}$ )	آب ( $\frac{kg}{m^3}$ )	شن بادامی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	شن نخودی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	ماسه ( $\frac{kg}{m^3}$ )	پودر سنگ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	درصد وزنی سیمان) ماده لزجت زا	فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان)
۱	C-0/4-425	۰/۴	425	۱۷۰	361	270	1132	۰	۰	۰/۵
۲	C-0/4-375	۰/۴	375	۱۵۰	381	284	1192	۰	۰	۰/۷
۳	SCC-0/4-475	۰/۴	475	190	342	85	1236	0	0	1/2
۴	SCC V-0/4-450	۰/۴	450	180	352	88	1272	0	۰/۱	1/4
۵	SCC P-0/4-400	۰/۴	400	160	351	87	1270	100	0	1/4

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم

L box	V funnel 5 min (sec)	V Funnel (sec)	J Ring (mm)	Slump flow		کد طرح مخلوط
				Flow (cm)	T <sub>50</sub> (sec)	
۰/۸۶	۹/۶	۷/۴	۹	۷۵	۲/۸	SCC-0/4-475
۰/۸۳	۹	۸/۷	۸	۶۷	۳/۱	SCC V-0/4-450
۰/۸۵	۱۲/۳	۱۱/۷	۸	۷۱	۴	SCC P-0/4-400



شکل ۱- نحوه آماده‌سازی آزمون برای اندازه‌گیری مقاومت

### ۲-۳-۲- روش چهار الکترودی

در حال حاضر این روش به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری‌های میدانی انجام می‌شود. این روش در ابتدا توسط ونر برای اندازه‌گیری مقاومت خاکت توسعه داده شده بود. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، چهار الکتروده به‌صورت یکسان قرار داده شده‌اند و جریان متناوب کوچکی بین الکترودهای بیرونی برقرار است و پتانسیل بین الکترودهای میانی اندازه‌گیری می‌شود.

نحوه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به این صورت است که ابتدا بر روی یکی از صفحات مسی مقداری خمیر سیمان گذاشته و توسط کاردک پخش می‌شود. آزمون که در شرایط رطوبتی اشباع با سطح خشک است، بر روی خمیر سیمان قرار داده می‌شود. سپس روی سطح فوقانی آزمون نیز با خمیر سیمان پوشانده و صفحه مسی فوقانی، همراه با وزنه بر روی آزمون قرار داده می‌شود. هر یک از سیم‌های دستگاه را به یکی از صفحات مسی متصل کرده و فرکانس دستگاه را روی ۱۰ Hz قرار داده و عدد مقاومت الکتریکی را یادداشت می‌شود. در شکل (۱) آزمون و صفحات مسی و نحوه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن سخت شده مشاهده می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه (۲) مقاومت ویژه الکتریکی بتن محاسبه می‌گردد.

$$\rho = \frac{R.A}{L} \quad (2)$$

در این رابطه R مقاومت الکتریکی (ohm)،  $\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی (ohm • m)، L طول آزمون (m) و A سطح مقطع آزمون ( $m^2$ ) است.

سپس مقاومت با استفاده از رابطه (۳) اندازه گیری می شود [۱۲، ۱۱]:

$$\rho = \frac{2\pi \cdot A \cdot V}{I} \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی (ohm·cm)،  $A$  فاصله بین الکترودهای داخلی (cm)،  $V$  ولتاژ (ولت) و  $I$  جریان (آمپر) است.

باشد، معرفی کردند [۱۳، ۱۴]. همچنین السنر<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از دیسکی به قطر ۲۰۰ میلی متر و کالیبره کردن نتایج با نتایج به دست آمده از روش ونر، مقدار ثابت سلول را 1/5 m معرفی کردند [۱۵]. ریلیم<sup>۳</sup> مقدار ثابت سلول را برای قطعاتی با کاور، قطر میلگرد و قطر دیسک بین ۱۰ تا ۵۰ میلی متر، ۰/۱ متر معرفی کرد [۱۶].

## ۲-۴- آزمایش هدایت الکتریکی

این آزمایش بر اساس روش استاندارد ASTM C1760 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای شکل با ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی متر انجام می‌گیرد. روش آزمایش بدین صورت است که آزمون‌ها در حالت اشباع با سطح خشک درون سلول آزمایش قرار گرفته و ولتاژ ۶۰ ولت DC توسط محلول سدیم کلرید با غلظت ۳٪ به دو سر آزمون اعمال می‌شود. پس از گذشت ۶۰ ثانیه جریان عبوری از آزمون قرائت می‌شود و با استفاده از رابطه (۵) هدایت الکتریکی آزمون بتنی محاسبه می‌گردند. در این پژوهش میانگین سه آزمون برای هر طرح مخلوط و در هر سن گزارش شد.

$$\square = \square = 1273/2 \frac{I_1 L}{V D^2} \quad (5)$$

$\square$  = هدایت الکتریکی بتن (ms/m)<sup>۴</sup>

$K$  = ضریب ثابت = ۱۲۷۳,۲

$I_1$  = جریان عبوری در ثانیه ۶۰ (mA)

$V$  = ولتاژ اعمالی (V)

$L$  = طول آزمون (mm)

$D$  = قطر آزمون (mm)

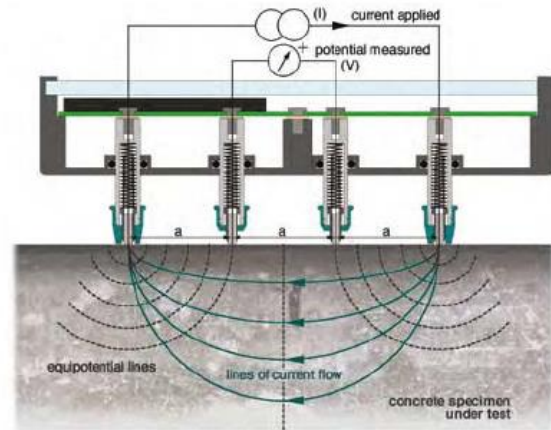
واحد اندازه گیری هدایت الکتریکی در SI، زیمنس<sup>۵</sup> بر متر

(siemens/m) است که زیمنس همان  $\frac{1}{\Omega}$  است [۱۷].

## ۳- نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها

### ۳-۱- مقاومت ویژه الکتریکی

در شکل‌های ۳ تا ۵ نتایج مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌های ساخته شده به تفکیک روش اندازه گیری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز ارائه شده است. هر سه روش روند مشابهی را نشان دادند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش سن آزمون‌ها مقاومت ویژه الکتریکی



شکل ۲- روش ونر برای اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی [۱۲].

### ۲-۳-۳- روش تک الکترودی (دیسک)

این روش بر پایه استفاده از صفحه فلزی کوچک که به عنوان الکتروود در سطح بتن قرار داده شده و یک میلگرد فولادی به عنوان الکتروود شمارنده، می‌باشد. در این روش مقاومت ویژه الکتریکی بتن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Resistivity (ohm.m)} = K \cdot R \quad (4)$$

در این رابطه  $K$  ثابت سلول اندازه گیری (m) و  $R$  مقاومت الکتریکی (ohm) است.

مزیت این روش در این است که محل آزمایش مهم نیست زیرا تأثیر میلگرد فولادی از بین رفته است. با استفاده از این روش، مقاومت بتنی که پوشش میلگرد را تشکیل داده اندازه گیری می‌شود. عیب بزرگ این روش این است که به مقاومت سطح تماس بتن مورد آزمایش حساس است. ثابت سلول به ضخامت کاور، قطر دیسک، فاصله میلگردها از هم و قطر میلگردها وابسته است. فلیو<sup>۱</sup> و همکاران مقدار دو برابر قطر دیسک را برای ثابت سلول در شرایطی که قطر دیسک از ضخامت کاور کوچک تر

<sup>4</sup> mili siemens/m

<sup>5</sup> siemens

<sup>1</sup> Feliu

<sup>2</sup> Elsener

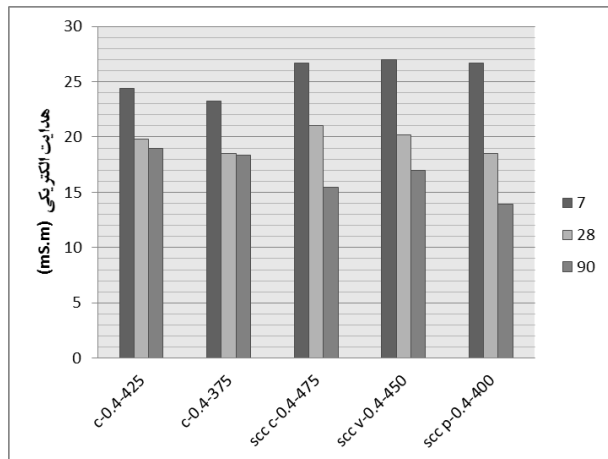
<sup>3</sup> Rilem

در طرح‌های بتن خودتراکم عملکرد طرح حاوی پودر سنگ از دو طرح دیگر بهتر بوده است، که این امر در اندازه‌گیری با هر سه روش مشاهده گردید. در طرح‌های بتن خودتراکم طرح حاوی ماده لزجت زان نتایج کمتری را نسبت به دو طرح دیگر نشان داد. البته در روش اندازه‌گیری دیسک (دستگاه گالوپالس) طرح حاوی ماده لزجت زان نتایج بهتری را نسبت به طرح خودتراکم بدون افزودنی نشان داد.

در مقایسه بتن معمولی و بتن خودتراکم مشاهده می‌شود که نتایج بتن خودتراکم در سن ۹۰ روز نسبت به بتن معمولی دارای برتری نسبی است. این امر در حالی رخ داده است که به‌طور متوسط مقدار مواد سیمانی مصرفی در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی بیشتر شده است؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت در شرایط یکسان از نظر مقدار نسبت آب به سیمان و مواد سیمانی، مقاومت ویژه الکتریکی بتن خودتراکم از بتن معمولی بیشتر باشد. بهبود ریزساختار ماتریس سیمان، کاهش خلل فرج بتن از طریق تراکم بهتر و بهبود ناحیه انتقالی در خمیر سیمان باعث برتری بتن خودتراکم می‌گردد.

### ۲-۳- هدایت الکتریکی

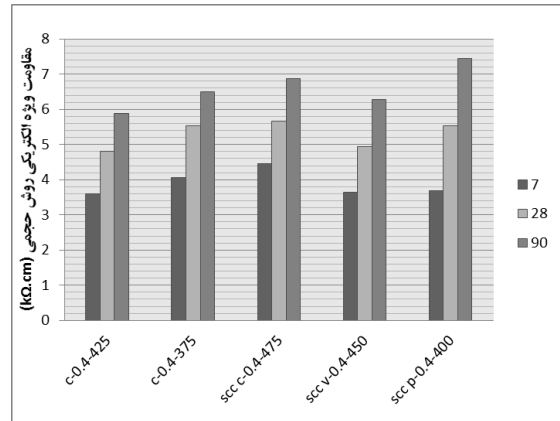
در شکل (۶) نتایج هدایت الکتریکی طرح‌های مطالعه ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مشاهده شد که با افزایش سن نمونه‌ها، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد.



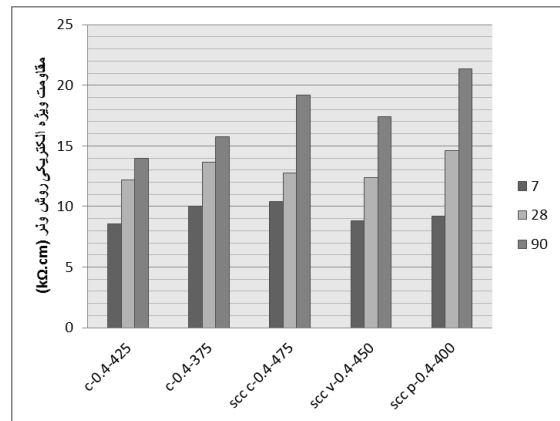
شکل ۶- هدایت الکتریکی ASTM C1760

در بتن معمولی روند کاهش هدایت الکتریکی در سن ۲۸ روز تقریباً متوقف گردید اما در طرح‌های بتن خودتراکم این روند تا سن ۹۰ روز ادامه داشت.

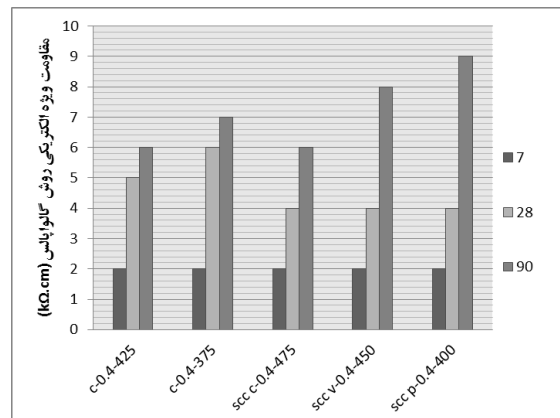
افزایش می‌یابد که این امر ناشی از کاهش خلل فرج خمیر سیمان، در نتیجه انجام واکنش هیدراسیون سیمان است. همچنین در طرح‌های معمولی مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار مواد سیمانی افزایش مقاومت ویژه الکتریکی رخ می‌دهد. با توجه به آن که مقاومت خمیر سیمان در مقابل سنگدانه تقریباً ناچیز است، هرگونه کاهش در حجم خمیر سیمان باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی خواهد شد.



شکل ۳- مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی

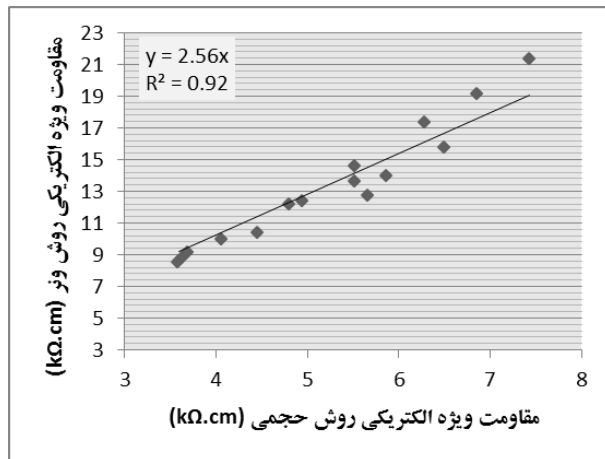


شکل ۴- مقاومت ویژه الکتریکی روش وئر



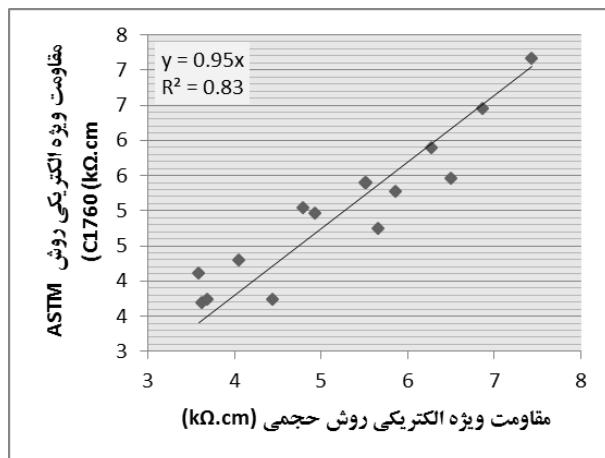
شکل ۵- مقاومت ویژه الکتریکی روش تک الکترودی

(گالوپالس)



شکل ۸- ارتباط روش وئر و روش حجمی با برازش خطی

در شکل (۹) نتایج مقاومت ویژه الکتریکی دو روش حجمی و ASTM C1760 در مقابل هم آورده شده‌اند. با برازش خط میان نتایج دو روش، یک رابطه خطی با عرض از مبدأ صفر و شیب ۰/۹۵ به دست آمده است. ضریب همبستگی  $R = 0/91$  نشان‌دهنده وجود ارتباط خوب میان نتایج دو روش است.



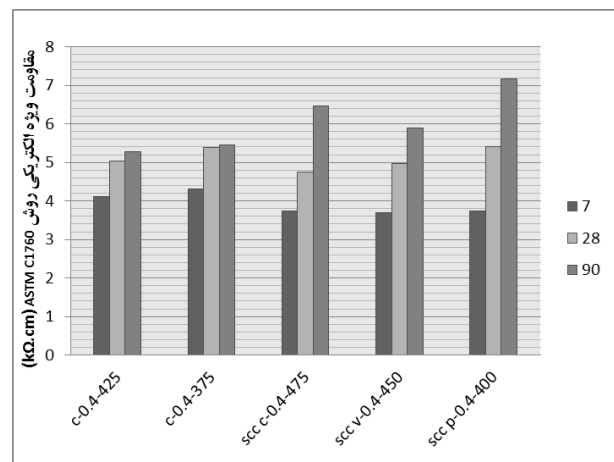
شکل ۹- ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی و روش

ASTM با برازش خطی

در شکل (۱۰) نتایج مقاومت ویژه الکتریکی دو روش حجمی و تک الکترودی (دستگاه گالوپالس) در مقابل هم قرار گرفته‌اند. با برازش خط میان نتایج دو روش، رابطه خطی میان نتایج دو روش شکل می‌گیرد. ضریب همبستگی  $R = 0/83$  وجود ارتباط تقریباً خوب میان نتایج دو روش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دقت اندازه گیری دستگاه گالوپالس برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی در حد ۱۰۰ اهم است، می‌توان با کمی چشم‌پوشی ضریب همبستگی به دست آمده برای این دو روش را در نظر گرفت.

در مقایسه بتن خودتراکم و معمولی مشاهده می‌شود که هدایت الکتریکی بتن خودتراکم در سنین ۷ و ۲۸ روزه از بتن معمولی بیشتر است اما در سن ۹۰ روزه بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این امر به دلیل استفاده از فوق روان کننده در بتن های خودتراکم با دوز مصرفی بیشتر نسبت به بتن معمولی و ایجاد خاصیت کندگیر کنندگی در بتن باشد.

در شکل (۷) نتایج مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از روش ASTM C1760 نمایش داده شده است. هدایت الکتریکی معکوس مقاومت ویژه الکتریکی است؛ بنابراین با معکوس کردن نتایج هدایت الکتریکی، مقاومت ویژه الکتریکی به دست می‌آید. نتایج روش ASTM C1760 روند مشابهی با سه روش قبل دارد.



شکل ۷- مقاومت ویژه الکتریکی روش ASTM C1760

### ۳-۳- مقایسه روش‌های اندازه‌گیری

در شکل (۸) نتایج مقاومت ویژه الکتریکی دو روش حجمی و وئر در مقابل هم آورده شده است. با برازش خط میان نتایج دو روش یک رابطه خطی میان دو پارامتر شکل می‌گیرد. ضریب همبستگی  $R = 0/96$  نشان‌دهنده ارتباط قوی میان دو روش است. ضریب ۲/۵ در معادله به دست آمده نشان‌دهنده آن است که نتایج روش وئر به‌طور میانگین ۲/۵ برابر روش حجمی است. این امر ناشی از کوچک بودن نسبت کوچک‌ترین بعد آزمون به فاصله میان الکترودهای اندازه‌گیری دستگاه است. میلارد نسبت ۴ را برای به حداقل رساندن این خطا معرفی کرده است [۱۸]. در این پژوهش نسبت کوچک‌ترین بعد آزمون به فاصله بین الکترودها ۲ است.

در شرایط یکسان از نظر مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان مقاومت ویژه الکتریکی بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است. این افزایش ناشی از بهبود ریزساختار ماتریس سیمان، کاهش خلل فرج بتن از طریق تراکم بهتر و بهبود ناحیه انتقالی در خمیر سیمان است.

نتایج مقاومت ویژه الکتریکی، اندازه گیری شده با روش های مختلف دارای رابطه خطی باهم هستند. همچنین نتایج مقاومت ویژه الکتریکی با نتایج روش استاندارد هدایت الکتریکی ASTM C1760 ارتباط قوی دارد. در جدول ۵ این روابط نمایش داده شده است.

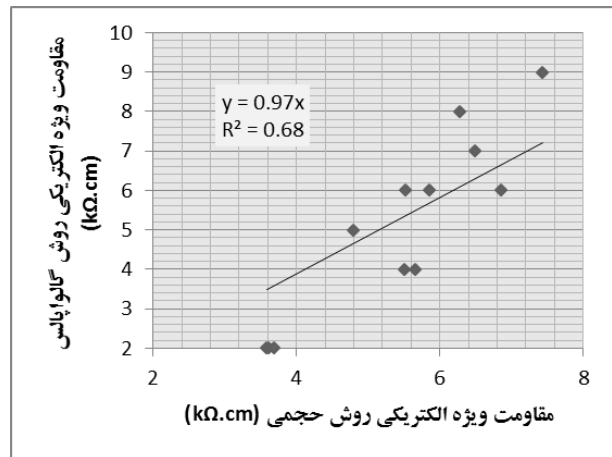
جدول ۵- روابط به دست آمده میان نتایج آزمایش ها

ضریب همبستگی (R)	فرمول	نوع رابطه	پارامتر Y	پارامتر X
۰/۹۶	$Y = 2/56 X$	خطی	روش و نر	روش حجمی
۰/۸۳	$Y = 0/97 X$	خطی	روش تک الکترودی	روش حجمی
۰/۹۱	$Y = 0/95 X$	خطی	مقاومت ویژه الکتریکی روش ASTM C1760	مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی
۰/۹۳	$Y = 73x^{-0/78}$	توانی	هدایت الکتریکی ASTM C1760	مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی

## ۵- مراجع

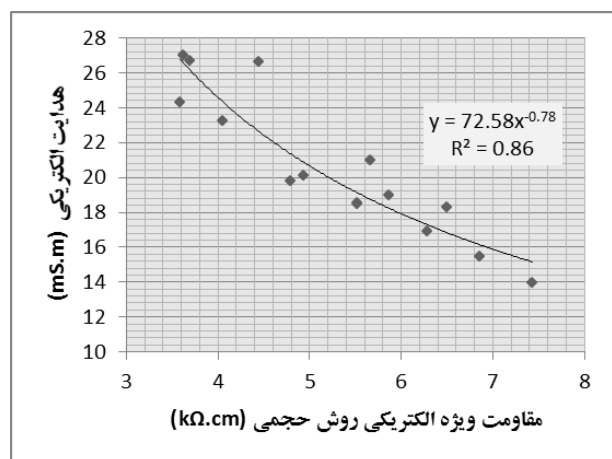
[1]. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس - آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن ، تهران، ۱۳۷۸.

[2]. Malhotra, V.M., and Carino, N.J. (eds), " CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC press, 1991.



شکل ۱۰- ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی و روش تک الکترودی با برازش خطی

در شکل (۱۱) نتایج هدایت الکتریکی و مقاومت ویژه الکتریکی روش حجمی در مقابل هم آورده شده است. با برازش خطی، رابطه توانی میان دو پارامتر شکل می گیرد. ضریب همبستگی  $R=0/93$  نشان دهنده ارتباط قوی میان نتایج دو روش است. با توجه به روابط خطی به دست آمده در قسمت های قبل میان روش های مختلف اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی، انتظار می رود که رابطه نتایج روش های و نر و گالوپالس با هدایت الکتریکی نیز مانند رابطه روش حجمی باشد.



شکل ۱۱- ارتباط هدایت الکتریکی و مقاومت ویژه الکتریکی با برازش توانی

## ۴- نتیجه گیری

کاهش مقدار سیمان در محدوده  $375 \text{ Kg/m}^3$  تا  $425 \text{ Kg/m}^3$  در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش هدایت الکتریکی خواهد شد بنابراین دوام بتن بهبود می یابد.



- Concrete,” *Materials and Structures*, Vol. 29, pages 362 to 365, July 1996
- [15]. Elsener, B., Fluckiger, D., Wojtas, H. and Bohni, H., ‘Methods for the evaluation of corrosion of steel in concrete’, Swiss Federal Department of Traffic and Energy (EVED), ASB Research for the Maintenance of Bridges, VSS Report 521 (1996).
- [16]. Rob B Polder, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 2–3, March–April 2001, Pages 125-131.
- [17]. 1 ASTM C1760-12, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [18]. Gowers, K.R. and Millard, S.G., “Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique,” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 5, pages 536 to 542, September-October 1999.
- [3]. Esbach, O.E. and Souders, M., *Handbook of Engineering Fundamentals*, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [4]. Harper, C.A., “Fundamentals of Electrical Insulating Materials,” *Industrial Research/Development*, Vol. 20, No. 12, pages 81 to 84, December 1978.
- [5]. Büchler, D., Elsner, B., and Böhni, H., *Electrical Resistivity and Dielectric Properties of Hardened Cement and Mortar*, Institute of Materials Chemistry and Corrosion, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Hönggerber, CH-8093 Zurich, Switzerland, 1996.
- [6]. Hunkeler, F., “The Resistivity of Pore Water Solution - A Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods,” *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, pages 381 to 389, 1996.
- [7]. زارع امامی، علی، “تأثیر ضخامت پوشش بتن بر روی مقاومت بتن‌های معمولی و توانمند در برابر نفوذ یون کلر”، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
- [8]. Hansson, I.L.H. and Hansson, C.M., “Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 5, pages 675 to 683, 1983.
- [9] T. C. POWERS, Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests, *proc. ASTM*, 55, PP.1132-54, 1955.
- [10]. شیبانی، ا. (۱۳۸۵) “تأثیر عیار سیمان (نسبت سنگدانه به سیمان) بر برخی پارامترهای دوام بتن تراورس پیش‌تنیده در برابر خوردگی؛ جلد اول”، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۱۴۰.
- [11]. Rosenberg, A., Hansson, C. M., and Andrade, C., “Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete,” *Materials Science of Concrete I*, Edited by J. P. Skalny, The American Ceramic Society, pages 285 to 315, 1989.
- [12]. Wenner, F., “A Method of Measuring Earth Resistivity,” *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 12, No. 4, pages 469 to 478, 1916.
- [13]. Broomfield, J.B., *Corrosion of Steel in Concrete*, FN Spon, an Imprint of Chapman & Hall, London, UK, 1997, 238 pages.
- [14] Feliu, S., Andrade, C., González, J.A., and Alonso, C., “A New Method for In-Situ Measurement of Electrical Resistivity of Reinforced

## Measuring the Electrical Resistivity of Concrete by Bulk, Surface, Galvapulse and the Electrical Conductivity Methods

Mostafa Khanzadi

Associate professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology  
Mohsen Tadayon

Lecturer of Civil Eng, Department of Engineering, Bu Ali Sina University

Mohamad Saeid Maleki\*

MSc in Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Sajad Zahabi

MSc in Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Mohamad Hossein Tadayon

PhD in Civil Engineering, Tehran University

### Abstract:

The deterioration of reinforced concrete structures is one of the most important issues that the cost of repair or replacement will cause great economic losses. One of the main reasons for these detriments is corrosion of embedded steel reinforcement in concrete. Field measurement of electrical resistivity of concrete is mainly used as an indicator of corrosion activity. Electrical resistivity is an important component of the Corrosion cell. Most resistance causes less corrosion current to flow between the anode and cathode regions. As a result, the electrical resistivity plays an important role in controlling the corrosion rate of steel reinforcement.

In this article various methods of measuring the electrical resistivity of concrete such as Bulk, surface (wenner), Galva pulse and electrical conductivity (ASTM C1760) methods are compared with each other. Two normal concrete mix with water to cement ratio of 4.0 and the 375 and 425 kg of cement per cubic meter and 3 scc mixes with water cement ratio of 4.0 include VMA materials, stone powder and simple scc mix was built and planned tests at ages 7, 28 and 90 days on which they were made. The results indicate a strong correlation between different methods of measurement.

**Keywords:** Electrical Resistivity, Electrical Conductivity, Corrosion

---

\* Corresponding Author: s\_maleki@civileng.iust.ac.ir