

پایش مقاومت الکتریکی بتن در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن، روشی جهت کنترل نسبت آب به سیمان

محمود نیلی*

دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

امین مرادی

کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه بوعلی سینا

مجتبی نیلی

کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا از آزمایش‌های غیرمخرب برای تعیین خصوصیات بتن و در نهایت پیش‌بینی رفتار آن استفاده شود. انجام این آزمایش‌ها معمولاً هزینه زیادی دربر داشته و صحت نتایج نیز تا حدود زیادی تحت تأثیر مهارت آزمایش‌گر می‌باشد. در تحقیق حاضر از روش پایش مقاومت الکتریکی بتن سخت شده در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن جهت تشخیص میزان آب به سیمان مصرفی و در نتیجه خصوصیات بتن استفاده شده است. ۵ طرح اختلاط بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقاومت الکتریکی در فواصل زمانی ۱ دقیقه و در یک سیکل آهسته پایش شده است. نتایج حاکی از آن است که روند تغییرات مقاومت الکتریکی در هر نسبت آب به سیمان دارای نقاط معنادار و منحصر به فردی می‌باشد و به عبارتی این نقاط به معنای هویت هر بتن تلقی می‌گردد. نتایج حاصل از بررسی نمودار مقاومت الکتریکی در برابر زمان و دما، نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، حد بالا و دامنه نوسان مقاومت الکتریکی در طول یک سیکل افزایش می‌یابد. همچنین شیب تغییرات مقاومت الکتریکی در قسمت‌های مختلف نمودار مقاومت الکتریکی در برابر دما و زمان، متناسب با نسبت آب به سیمان می‌باشد.

واژگان کلیدی: اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن، نسبت آب به سیمان.

* نویسنده مسئول: nili36@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا از آزمایش‌های غیر مخرب برای تبیین ویژگی‌های بتن در حال تازه و سخت شده استفاده گردد. در این راستا پژوهش‌ها نشان می‌دهند که روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، روش غیر مخرب مناسبی برای به دست آوردن اطلاعاتی درباره واکنش‌های هیدراسیون، خصوصیات ریزساختار و نفوذپذیری در بتن است. نیلی روندهیدراسیون بتن را از لحظه تماس آب با سیمان به کمک پایش مقاومت الکتریکی تبیین و مدلی را برای رفتار گیرشی بتن ارائه نمود [۱].

در ژئوفیزیک، پرتونگاری به وسیله مقاومت الکتریکی برای به‌دست آوردن ساختار درونی مواد به‌کار می‌رود [۲]. در مهندسی مواد از ترکیب مقاومت الکتریکی و تئوری نفوذ جهت به‌دست آوردن خصوصیات کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. همچون مواد کامپوزیت با ساختار پیچیده، می‌توان از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برای تعیین خصوصیات مواد سیمانی استفاده کرد [۳]. مقاومت الکتریکی در مواد بطور عمده به نفوذ عناصر رسانا بستگی دارد. این اصل به این معنی است که روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی می‌تواند برای بررسی روند نفوذ به‌کار رود [۴]. لی و همکاران نشان دادند که به‌وسیله روش مقاومت الکتریکی می‌توان گیرش و سخت‌شدگی مواد سیمانی را بررسی کرد. همچنین از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی می‌توان برای بررسی تغییرات ساختار خمیر سخت شده استفاده کرد [۵].

چانگ و همکاران با استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به بررسی خسارت نمونه‌های سیمانی تحت تنش استاتیکی، تنش دینامیکی، سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن و خزش پرداختند [۶]. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن است که دوام مواد سیمانی، به خصوصیات ساختار حفرات وابسته است، لذا میزان مقاومت الکتریکی به عنوان شاخصی جهت بررسی دوام بتن در برابر یون کلر می‌باشد [۷]. در مقالات زیادی، مکانیسم یخ‌زدن-آب‌شدن به وسیله روش مقاومت الکتریکی بررسی شده است که فشار هیدرولیک و تشکیل کریستال یخ، به‌عنوان عوامل اصلی تخریب هنگام سیکل‌ها شناخته شده‌اند [۸]. همچنین از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برای بررسی خصوصیات

مواد سیمانی حاوی الیاف فولادی و کربن استفاده شده است [۹]. کای و لیو در سال ۱۹۹۸ به بررسی تشکیل یخ هنگام سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن به‌وسیله اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌های بتنی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در حدود ۱۰-درجه سلسیوس نرخ هدایت الکتریکی تغییر می‌کند [۱۰]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی خصوصیات خمیر سیمان تحت سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن با استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که مراحل یخ‌زدن-آب‌شدن در نمودار مقاومت الکتریکی دارای دو قسمت با شیب متفاوت می‌باشد که با توجه به نوع سیمان، خصوصیات آنها تغییر می‌کند [۱۱]. از آنجا که نسبت آب به سیمان یکی از عوامل مؤثر بر مقاومت بتن می‌باشد لذا کنترل و آگاهی از این نسبت در بتن سازه‌ها نقش مهمی در پیش‌بینی عمر سرویس دهی سازه خواهد داشت. در پژوهش در پژوهش حاضر پایش مقاومت الکتریکی در طی یک سیکل یخ‌زدن و آب‌شدن برای چندین طرح اختلاط صورت گرفته است تا با گردآوری این اطلاعات تأثیر نسبت آب به سیمان به عنوان یکی از خصوصیات مؤثر در کیفیت بتن بر شمای تغییرات مقاومت الکتریکی ارزیابی گردد.

۲- طراحی آزمایش و مصالح مصرفی

در مجموع ۵ طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۱ تهیه گردید. آزمونه‌ها پس از ۱۴ روز مراقبت در آب تحت یک سیکل آهسته یخ‌زدن-آب‌شدن قرار گرفتند. مقاومت الکتریکی آزمونه‌ها در طی سیکل مذکور در فواصل زمانی یک دقیقه پایش گردید.

۱-۲- مصالح مصرفی و طرح مخلوط‌ها

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع I-۴۲۵ کارخانه سیمان حکمتان استفاده گردید. سنگ‌دانه درشت با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده گردیده است. چگالی شن بادامی، شن نخودی و ماسه بترتیب ۲/۶۸، ۲/۶۹ و ۲/۶۵ بوده است. برای تعیین نسبت‌های اختلاط از استاندارد ایران، استفاده گردیده است. فوق‌روان‌کننده مورد استفاده جهت تنظیم کارایی و ایجاد همگنی مناسب مخلوط، از نوع پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری

جدول ۱- مقادیر طرح اختلاط (کیلوگرم در متر مکعب)

نسبت روان کننده به سیمان	شن درشت	شن ریز	ماسه	سیمان	آب	نسبت آب به سیمان	کد طرح
۰/۴	۶۰۸/۸	۲۲۳/۸	۹۵۷/۸	۵۰۰	۱۵۰	۰/۳	N-0.3
۰/۱۵	۵۹۶/۵	۲۱۹/۳	۹۳۸/۵	۴۲۰	۱۸۹	۰/۴۵	N-0.45
-----	۵۸۵/۷	۲۱۵/۳	۹۲۱/۵	۳۲۵	۱۹۵	۰/۶	N-0.6
-----	۵۸۹/۳	۲۱۶/۷	۹۲۷/۳	۳۲۵	۲۲۷/۵	۰/۷	N-0.7
-----	۵۰۰/۹	۱۸۴/۱	۷۸۸/۱	۳۲۵	۳۲۵	۱	N-1

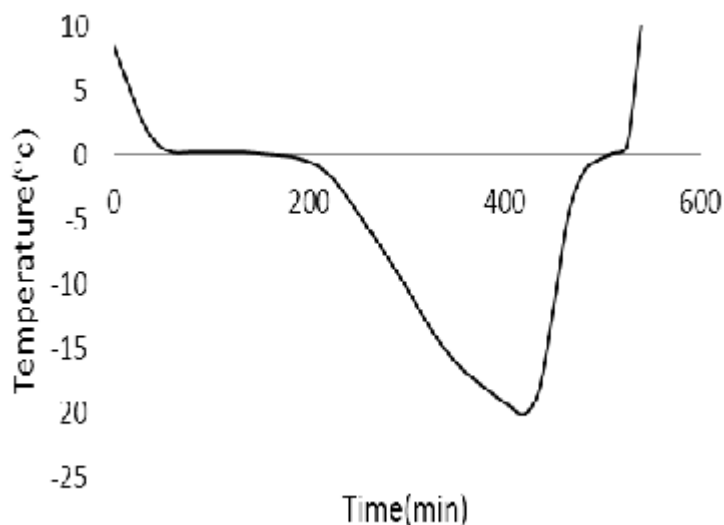
GLENIUM 110 P متعلق به شرکت BASF تهیه گردید. (شکل ۲). برای ایجاد شرایط اشباع بتن، سطح آزمون‌ها همواره با چند میلی‌متر آب پوشانیده شده بود. طرح اختلاط بتن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

زمان یخ‌زدن و آب شدن در هر سیکل حدود ۶/۵ ساعت و زمان آب شدن حدود ۲/۵ ساعت بود. دامنه تغییرات دما که در شکل ۱ نشان داده شده است بین $+5^{\circ}\text{C}$ تا -20°C بوده است. مقاومت الکتریکی در فواصل زمانی یک دقیقه در طی یک سیکل یخ‌زدن و آب شدن به وسیله دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با فرکانس ۲ KHZ و ظرفیت نهایی $1\text{ M}\Omega$ که سنسورهای آن به صفحات مسی متصل شده بود، اندازه‌گیری گردید (شکل ۳).

۲-۲- ساخت نمونه‌ها و روند انجام آزمایش‌ها

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی از قالب مکعبی پلاستیکی ۱۵ سانتی‌متری که دو صفحه مسی 15×15 به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته بودند، استفاده گردید.

بعد از ریختن بتن در قالب، آزمون‌ها در دمای 23°C درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ بمدت ۲۴ ساعت نگهداری و تا زمان انجام آزمایش در آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند. آزمون‌ها سپس در سن ۱۴ روز از داخل مخزن بیرون آورده شده و در داخل محفظه سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن قرار گرفتند



شکل ۱- نمودار تغییرات دما در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن



شکل ۲- محفظه اعمال سیکل های یخ زدن-آب شدن آهسته



شکل ۳- دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمودار مقاومت الکتریکی در برابر زمان

مقاومت الکتریکی بتن یک ویژگی مستقل از هندسه عضو می باشد و نسبت میان ولتاژ اعمال شده و جریان حاصل در سلول واحد است که واحد آن اهم متر می باشد و در محدوده ۱۰ تا ۱۰^۵ اهم متر متغیر بوده و تحت تأثیر میزان رطوبت و ترکیب مواد بتن می باشد. از آنجا که بتن ماده ای مرکب می باشد لذا ترکیبات آن بر روی مقاومت الکتریکی بتن تأثیر می گذارد.

پارامترهایی چون نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، نوع سیمان، مواد پوزولانی، تراکم، دوره عمل آوری، سن بتن و یون های موجود در منافذ مویینه می توانند بر میزان مقاومت الکتریکی بتن تأثیر گذارند. یکی از پارامترهای مؤثر بر مقاومت الکتریکی نفوذپذیری و حرکت یون ها در منافذ بتن به ویژه منافذ مویینه می باشد. این منافذ در بتن به طور تصادفی پخش می شوند و اندازه های متفاوتی دارند و به طور نامنظم با یکدیگر در ارتباط می باشند. مقاومت الکتریکی بتن به حجم تخلخل و ارتباط این منافذ با یکدیگر ارتباط دارد، لذا می توان با اندازه گیری مقاومت

الکتریکی بتن به صورت نسبی کیفیت و میزان تخلخل بتن را مشخص نمود [۱۲-۱۳].

مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های بتنی با استفاده از رابطه (۱) به دست می آید.

$$\rho = \frac{ZA}{L} \quad (1)$$

ρ = مقاومت ویژه الکتریکی [$\Omega \cdot m$]

A = سطح نمونه در تماس با خمیر [m^2]

Z = مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده [Ω]

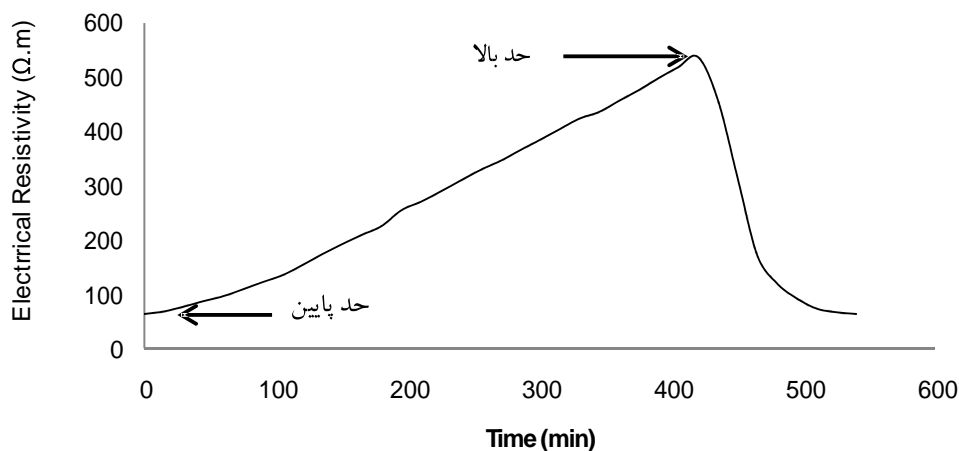
L = ارتفاع نمونه یا فاصله بین دو صفحه مسی [m]

در شکل ۴ نمودار مقاومت الکتریکی در برابر زمان آزمون N - 0.3 آورده شده است. به دلیل انرژی فعال سازی برای هدایت یون ها، مقاومت الکتریکی هنگام سرد شدن افزایش و هنگام گرم شدن کاهش می یابد. با کاهش دما مقاومت الکتریکی به دلیل تشکیل یخ در حفرات و نارسا بودن یخ در مقایسه با محلول حفرات افزایش می یابد. میزان این افزایش تابع حجم، شعاع و توزیع اندازه حفرات، درصد اشباع و میزان یون های محلول

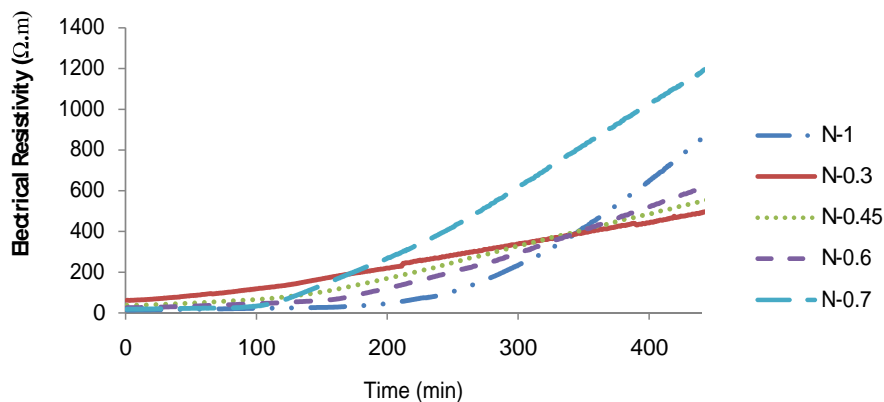
شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان و به عبارتی اعمال یخبندان بر بتن، مقاومت الکتریکی با شیب افزایشی رشد می‌کند. این شیب در زمانی که دما به حدود صفر درجه سلسیوس می‌رسد ناگهان تغییر می‌یابد. میزان تفاوت شیب‌ها تابع میزان آب به سیمان بتن می‌باشد. به طور مثال تفاوت شیب در طول یخبندان در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳ بسیار اندک می‌باشد. در صورتی که با افزایش نسبت آب به سیمان این تفاوت افزایش می‌یابد. مقادیر شیب دو ناحیه و همچنین تفاوت شیب‌ها برای همه طرح‌های بتن محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است.

می‌باشد. از سوی دیگر افزایش مقاومت الکتریکی می‌تواند بدلیل پیشرفت یخ در ساختار حفرات اولیه باشد که در این مورد هم هراندازه که پیوستگی حفرات بیشتر باشد، میزان افزایش مقاومت الکتریکی بیشتر خواهد بود [۱۱]. نمودارهای مقاومت الکتریکی در برابر زمان شامل دو مرحله یخ زدن و آب شدن می‌باشد که با بررسی دقیق این دو مرحله، به تأثیر نسبت آب به سیمان بر روند تغییرات بوجود آمده در پایش مقاومت الکتریکی بر حسب زمان پرداخته خواهد شد.

در شکل ۵ نمودار مقاومت الکتریکی در برابر زمان در طی مرحله یخ زدن نمونه‌های با نسبت آب به سیمان مختلف آورده



شکل ۴- تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه N-0.3 در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن



شکل ۵- نمودار مقاومت الکتریکی در برابر زمان مرحله یخ زدن نمونه‌های مختلف

جدول ۲- سرعت افزایش مقاومت الکتریکی (اهم‌متر بر دقیقه) در برابر زمان در دو ناحیه قبل و بعد از انجماد.

کد طرح	ناحیه قبل از انجماد	ناحیه بعد از انجماد	اختلاف شیب دو ناحیه
N-0.3	۸	۸/۷۷	۰/۷۷
N-0.45	۰/۳۳	۱۴/۸۲	۱۴/۵
N-0.6	۰/۱۷	۱۵/۲۲	۱۵/۰۵
N-0.7	۰/۰۶	۲۶/۲۲	۲۶/۱۶
N-1	۰/۰۶	۷۶/۵	۷۶/۴۴

سلسیوس می‌باشد. اختلاف حدود بالا و پائین مقاومت الکتریکی با دامنه نوسان در جدول ۳ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود اگرچه بیشترین حد پائین مقاومت الکتریکی به میزان ۶۲ متعلق به نمونه با کمترین نسبت آب به سیمان می‌باشد، لیکن دامنه نوسان این نوع بتن به میزان ۴۸۸ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. به نظر می‌رسد کاهش حد پایین مقاومت الکتریکی با افزایش نسبت آب به سیمان به این دلیل می‌باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان محلول حفرات افزایش می‌یابد و در نتیجه یون‌ها راحت‌تر جابجا شده و مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد.

افزایش حد بالای مقاومت الکتریکی (مربوط به سردترین دما در طول سیکل) با افزایش نسبت آب به سیمان، ممکن است بدلیل تشکیل یخ بیشتر و در نتیجه افزایش بیشتر مقاومت الکتریکی باشد. در طول یک سیکل با کاهش دما با توجه به اندازه حفرات، یخ درون حفرات تشکیل می‌گردد و در دمای ۲۰- درجه سلسیوس که پایین‌ترین دما در طول سیکل می‌باشد بیشترین یخ تولید می‌گردد. حال با افزایش نسبت آب به سیمان، آب قابل یخ

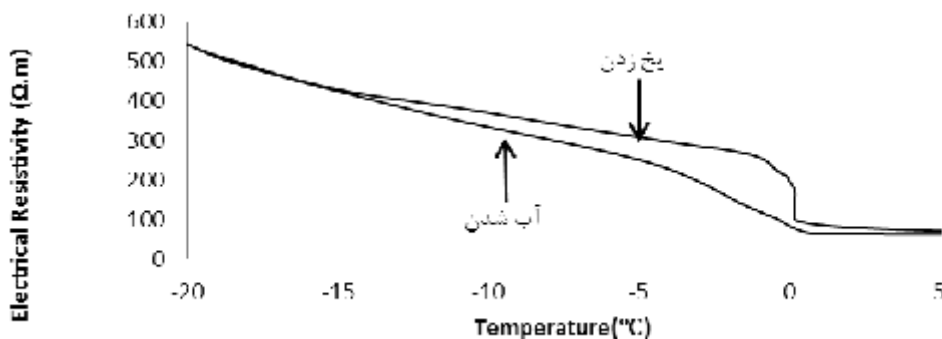
مقادیر شیب مقاومت الکتریکی با افزایش نسبت آب به سیمان در ناحیه اول کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین شیب متعلق به نمونه N-0.3 به میزان ۸ اهم‌متر بر دقیقه می‌باشد در حالی که شیب بتن‌های با نسبت آب به سیمان زیاد در ناحیه اول که هنوز دمای بتن به صفر درجه سلسیوس نرسیده است در حدود ۰/۰۶ اهم‌متر بر دقیقه می‌باشد. با کاهش دما و رسیدن دما به زیر صفر درجه سلسیوس روند افزایشی مقاومت الکتریکی ادامه می‌یابد لیکن میزان شیب در این ناحیه با شیب ناحیه اول بسته به نسبت آب به سیمان بتن‌ها تغییر می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۲ آورده شده است کمترین میزان اختلاف شیب متعلق به نمونه N-0.3 به میزان ۰/۷۷ اهم‌متر بر دقیقه و بیشترین مقدار مربوط به نمونه N-1 به مقدار ۷۶/۴۴ اهم‌متر بر دقیقه می‌باشد.

بنابراین می‌توان از اختلاف شیب دو قسمت برای شناسایی نمونه‌هایی بتنی با نسبت آب به سیمان زیاد استفاده کرد. مقادیر مقاومت الکتریکی حدود پائین و بالا در همه بتن‌ها پایش و در جدول ۳ آورده شده است. حد پایین و بالای مقاومت الکتریکی متناظر با دماهای ۵+ درجه سلسیوس و ۲۰- درجه

جدول ۳- حدود و دامنه نوسان مقاومت الکتریکی در طول یک سیکل (اهم‌متر)

کد طرح	حد پایین	حد بالا	دامنه نوسان
N-0.3	۶۲	۵۵۰	۴۸۸
N-0.45	۴۲	۵۶۲	۵۲۰
N-0.6	۳۷	۶۸۵	۶۴۸
N-0.7	۲۷	۷۰۸	۶۸۱
N-1	۱۳	۱۰۷۱	۱۰۵۸

زدن و پیوستگی حفرات افزایش می‌یابد. در این مرحله امکان متلاشی شدن بتن به دلیل یخ زدن جریان‌های موئنه در جسم بتن وجود دارد، بنابراین در تحقیق حاضر آزمون‌ها تحت یک سیکل قرار گرفته‌اند. این موضوع از آن حیث با اهمیت است که در ارزیابی نسبت آب به سیمان در بتن سخت‌شده هیچ‌گونه خسارتی به سازه وارد نخواهد شد.



شکل ۶- تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه N-0.3 در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن

۳-۲-۱- مرحله یخ زدن

درجه سلسیوس انتخاب شده است همین موضوع باشد. البته بدیهی است تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد نیاز می‌باشد.

در ناحیه ۲ مقاومت الکتریکی با شیب تندی افزایش می‌یابد. در این مرحله به دلیل آغاز تشکیل یخ در حفره‌ها، مقاومت الکتریکی افزایش ناگهانی می‌یابد که میزان افزایش، بستگی به میزان آب قابل یخ زدن حفره‌ها و هم‌چنین میزان پیوستگی حفره‌ها دارد. این قسمت یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مرحله یخ زدن می‌باشد و با استفاده از این قسمت می‌توان اطلاعاتی را درباره میزان یخ تشکیل شده به دست آورد.

نرخ افزایش مقاومت الکتریکی در ناحیه ۴ بیشتر از ناحیه ۳ می‌باشد که دلیل آن می‌تواند تشکیل یخ در حفره‌های ریز باشد که در نتیجه آخرین مسیرهای عبور جریان الکتریکی به میزان بیشتری بسته شده و مقاومت الکتریکی به میزان بیشتری نسبت به مرحله قبل افزایش می‌یابد [۱۴].

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقاومت الکتریکی هنگام کاهش دما به دلیل کم شدن انرژی یون‌ها، افزایش می‌یابد. روند نرخ این افزایش که در شکل ۷ نشان داده شده است در ۴ ناحیه قابل بررسی می‌باشد.

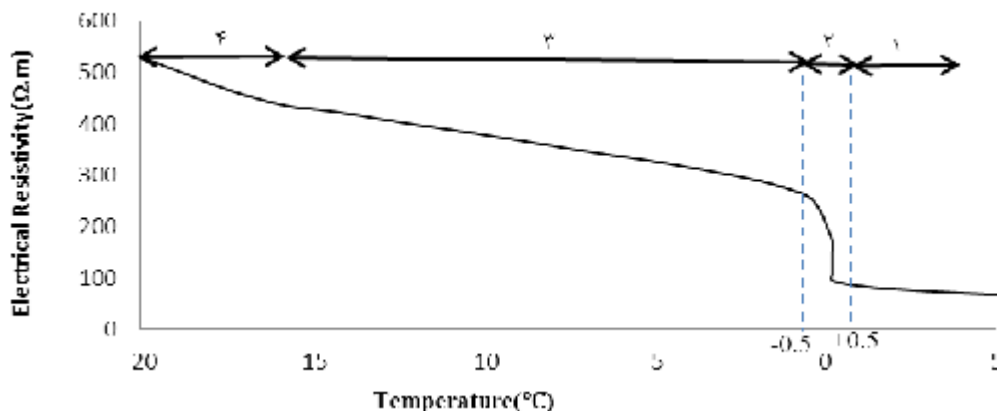
ناحیه ۱: محدوده دمای +۵ تا حدود +۰/۵ درجه سلسیوس

- ناحیه ۲: محدوده دمایی +۰/۵ تا حدود -۰/۵ درجه سلسیوس

- ناحیه ۳: محدوده دمایی -۰/۵ تا -۱۶ درجه سلسیوس

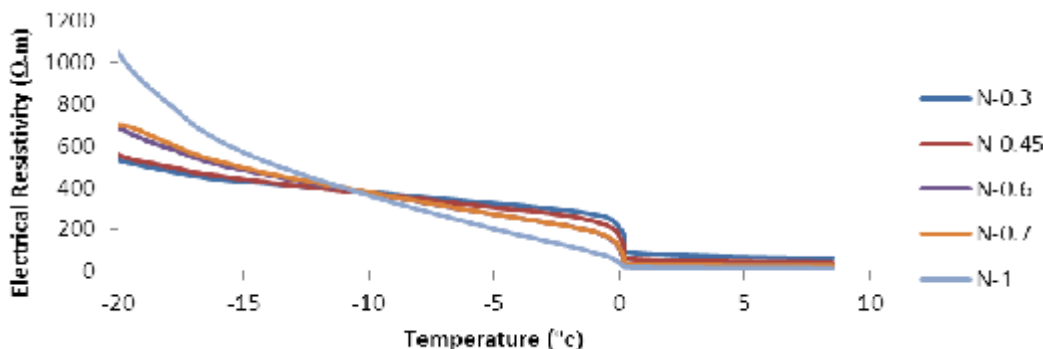
- ناحیه ۴: محدوده دمایی -۱۶ تا -۲۰ درجه سلسیوس

در ناحیه ۱ مقاومت الکتریکی با شیب کمی افزایش می‌یابد که این مورد در تمام نمونه‌ها صادق می‌باشد. در این قسمت به دلیل این که یخی تشکیل نمی‌شود، تغییر محسوسی در مقاومت الکتریکی مشاهده نمی‌گردد. بررسی این ناحیه در انواع آزمون‌ها نشان می‌دهد که احتمالاً حد بالای دما در سیکل‌های یخ‌زدن-آب‌شدن که تأثیر چندانی بر روی نمودار مقاومت الکتریکی نداشته است در نتایج دوام یخبندان هم تأثیر مهمی ندارد و شاید دلیل اینکه محدوده دمایی در آزمایش‌های استاندارد نیز +۵



شکل ۷- نمودار مقاومت الکتریکی مرحله یخ زدن نمونه N-0.3

در شکل ۸ نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی در مرحله یخ زدن نمونه‌های با نسبت آب به سیمان مختلف آورده شده است. در حدود ۱۰- درجه سلسیوس نرخ هدایت الکتریکی تغییر می‌کند و محلول حفره‌ها در دمای پایین‌تر از ۱۰- درجه سلسیوس نسبت به دمای بالاتر از ۱۰- درجه سلسیوس با سرعت بیشتری یخ می‌زند [۱۰]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، در



شکل ۸- نمودار مقاومت الکتریکی در برابر دما در مرحله یخ زدن نمونه‌های با نسبت آب به سیمان مختلف

مشخصات روند افزایش مقاومت الکتریکی در مراحل چهارگانه برای همه طرح‌های مخلوط در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با افزایش نسبت آب به سیمان در ناحیه ۱ سرعت و درصد مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. در ناحیه ۲ بیشترین پرش مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه N-0.3 به ترتیب به میزان ۱۶۸ اهم‌متر بر درجه سلسیوس و ۳۳ درصد و کمترین پرش مربوط به نمونه N-1 به ترتیب به میزان ۵۱ اهم‌متر بر درجه سلسیوس و ۳ درصد است. بدین ترتیب با افزایش نسبت آب به سیمان میزان پرش ناحیه ۲ کاهش می‌یابد.

در مراحل ۳ و ۴ و در محدوده دمایی ۰/۵- تا ۲۰- درجه سلسیوس، که شدیدترین مرحله انجماد سیکل محسوب می‌گردد، کمترین سرعت و درصد مقاومت الکتریکی مربوط به N-0.3 به میزان ۳۲ اهم‌متر بر درجه سلسیوس و ۵۹ درصد است که کمترین نسبت آب به سیمان را دارا است. درحالی‌که بیشترین مقدار مربوط به نمونه N-1 با نسبت آب به سیمان ۱ است. سرعت افزایش مقاومت الکتریکی و درصد آن در این نوع مخلوط به ترتیب ۱۲۲ اهم‌متر بر درجه سلسیوس و ۹۶ درصد بوده است. به عبارتی این نوع بتن بیشترین حجم تخلخل را دارا است که پتانسیل تشکیل یخ نیز در آن بیشتر است. این تغییر

معنادار در روند پایش مقاومت الکتریکی بتن‌های با نسبت آب به سیمان متفاوت، در محدوده شدید انجماد حاکی از آن است که این پایش قادر به تخمین حجم آب قابل یخ زدن است. به عبارتی افزایش آب قابل یخ زدن در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بزرگ‌تر، حجم یخ را زیاد نموده که این حجم زیاد به نوبه خود مسیرهای انتقال جریان را مسدود نموده و در نتیجه مقاومت الکتریکی به میزان بیشتری افزایش یافته است که البته خطر متلاشی شدن جسم بتن وجود دارد.

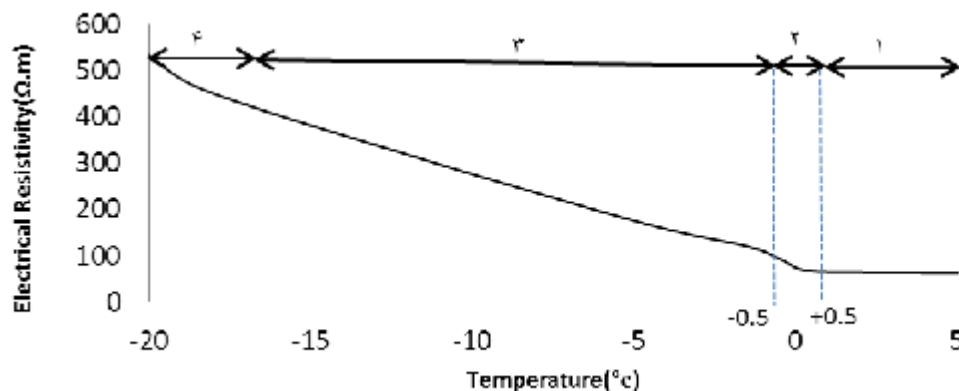
جدول ۴- سرعت افزایش مقاومت الکتریکی در قسمت‌های مختلف نمودار مقاومت الکتریکی برحسب دما

کد طرح	ناحیه ۱		ناحیه ۲		نواحی ۳ و ۴	
	سرعت افزایش مقاومت الکتریکی (اهم‌متر بر درجه سلسیوس)	درصد مقاومت الکتریکی	سرعت افزایش مقاومت الکتریکی (اهم‌متر بر درجه سلسیوس)	درصد مقاومت الکتریکی	سرعت افزایش مقاومت الکتریکی (اهم‌متر بر درجه سلسیوس)	درصد مقاومت الکتریکی
N-0.3	۶/۶	۶/۹۶	۱۶۸	۳۳/۳۳	۳۲/۵	۵۹/۷
N-0.45	۴/۲	۴/۰۵	۱۵۶	۳۳/۰۱	۳۶/۴	۶۲/۹
N-0.6	۲/۴	۱/۸۱	۱۲۷	۲۳	۵۸/۸	۷۴
N-0.7	۱/۸	۱/۳۴	۱۲۳	۲۱	۶۰	۷۶/۴
N-1	۱/۲	۰/۵۹	۵۱	۳/۰۳	۱۲۲/۳	۹۶/۴

۳-۲-۲- مرحله آب شدن

روند کاهش مقاومت الکتریکی در مرحله ذوب تقریباً از روند افزایشی در مرحله انجماد تبعیت می‌نماید لیکن شیب مرحله ۳ بیشتر و در ضمن پرش ناحیه ۲ نیز نامحسوس‌تر می‌گردد. لازم به ذکر است که شمای مرحله ذوب نیز برای هر نسبت آب به سیمان منحصر به فرد می‌باشد.

تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب دما برای نمونه N-0.3 در مرحله ذوب (شکل ۹) نیز حاکی از این واقعیت است که مشابه مرحله انجماد نواحی چهارگانه قابل تفکیک و شناسایی می‌باشند. به عبارتی در این مرحله افزایش حجم یخ صورت نمی‌پذیرد و به تدریج از حجم یخ‌های تشکیل شده در مرحله یخ زدن کاسته می‌شود و این حالت مترادف با کاهش مقاومت الکتریکی است.



شکل ۹- مرحله آب شدن سیکل ۱ مخلوط N-0.3

بدین ترتیب مشاهده می‌گردد که تغییرات مقاومت الکتریکی هر یک مدرک هویتی تلقی می‌گردد و لذا می‌توان در هر شرایط با طرح مخلوط بتن در طی یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن به عنوان این روش به هویت بتن‌های در حال اجرا پی برد. در پروژه‌های

می‌باشند. با افزایش نسبت آب به سیمان از میزان انطباق دو منحنی کاسته می‌گردد.

بدین ترتیب نتایج این مطالعه حاکی از آن است که پایش مقاومت الکتریکی در طی یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن می‌تواند به عنوان شاخصی جهت بررسی کیفیت بتن از لحاظ نسبت آب به سیمان به کار رفته، مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

[۱]. نیلی. م. «امکانسنجی اندازه‌گیری زمان گیرش بتن به‌وسیله مقاومت الکتریکی». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی

سینا، ۱۳۹۰

[2]. Daily W, Ramirez A, LaBrecque D, Nitao J. "Electrical resistivity tomography of vadose water movement," *Water Resour Res*, 28(5), pp1429-42, 1992.

[3]. Perria MT, Cassiana G, Gervasiob I, Deianaa R, Binley A. "A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: comparison of time-lapse results," *J Appl Geophys*; 79, pp 6-16, 2012.

[4]. Gehre M, Kluth T, Lipponen A, Jin B, Seppanen A, Kaipio JP, et al. "Sparsity construction in electrical impedance tomography: an experimental evaluation," *J Comput Appl Math*, 236(8), pp 2126-36, 2012.

[5]. Rimpilainen V, Heikkinen LM, Vauhkonen M. "Moisture distribution and hydrodynamics of wet granules during fluidized-bed drying characterized with volumetric electrical capacitance tomography," *Chem Eng Sci*, 75, pp 220-34, 2012.

[6]. Fabbri A, Fen-Chong T, Coussy O. "Dielectric capacity, liquid water content, and pore structure of thawing-freezing materials," *Cold Reg Sci Technol*; 44:52-66, 2006.

[7]. McLachlan DS, Blaszkiewicz M, Newnham RE. "Electrical resistivity of composites," *J Am Ceram Soc*; 73(8):2187-203, 1990.

[8]. Li Z, Wei X, Li W. "Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurements," *ACI Mater J*; 100(3):253-7, 2003.

[9]. Xiao L, Li Z. "Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement," *Cem Concr Res*; 38:312-9, 2008.

[10]. Cai H, Liu X. "Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores," *Cem Concr Res*; 28(9):1281-1287, 1998.

بزرگ‌بندی که به دلایلی طرح مخلوط بتن در حین اجرا تغییر می‌یابد و باعث بروز ابهاماتی می‌گردد، می‌توان از روش پیشنهادی در این مقاله به صحت و سقم طرح پی برد. به عبارتی می‌توان با پایش مقاومت الکتریکی در یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن برای هر طرح مخلوط بتن پرونده‌ای در آزمایشگاه تهیه نمود و در حین کار جهت کنترل غیرمخرب بتن‌های مصرفی و تشخیص صحت کار و تخمین نسبت آب به سیمان واقعی در عمل از پایش مجدد مقاومت الکتریکی نمونه‌ها جهت تطبیق با طرح مخلوط واقعی استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیرات نسبت آب به سیمان بر روند تغییرات مقاومت الکتریکی در طول یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که در طول زمان و با کاهش دما در مرحله انجماد، شمای منحنی مقاومت الکتریکی دارای نقاط و شیب معناداری می‌گردد. این نقاط و شیب‌ها متأثر از میزان نسبت آب به سیمان بوده و لذا هویت هر بتن با پایش مقاومت الکتریکی در یک سیکل یخ‌زدن-آب‌شدن قابل شناسایی است. در تحقیق حاضر نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد:

- پایش مقاومت الکتریکی برحسب زمان در مرحله انجماد در بتن با نسبت آب به سیمان $0/3$ حاکی از آن است که منحنی مقاومت الکتریکی دارای شیب ثابت بوده و به یک خط شبیه است. با افزایش نسبت آب به سیمان شیب منحنی مقاومت الکتریکی در محدوده دمای انجماد ناگهان افزایش یافته و این افزایش شیب تابع نسبت آب به سیمان می‌باشد.

- دامنه نوسان یا تفاوت حد پایین و بالای مقاومت الکتریکی بر حسب زمان در مرحله انجماد متناسب با نسبت آب به سیمان تغییر می‌کند. کمترین دامنه نوسان متعلق به بتن با نسبت آب به سیمان کمتر و بیشترین متعلق به بالاترین نسبت آب به سیمان می‌باشد.

- پایش مقاومت الکتریکی بر حسب دما در مرحله یخ‌زدن و در مرحله آب‌شدن دارای ۴ مرحله قابل شناسایی می‌باشد، که مشخصات هر مرحله تابع نسبت آب به سیمان می‌باشد.

- در نسبت آب به سیمان کم، منحنی‌های مقاومت الکتریکی بر حسب دما در مراحل یخ‌زدن و آب‌شدن تقریباً بر هم منطبق

- [11]. Wang Z, Zeng Q, Wang L, Yao Y, Li K. "Characterizing blended cement pastes under cyclic freeze-thaw actions by electrical resistivity," *Construction and Building Materials*, 44, pp 477-486, 2013.
- [12]. Lataste J.F, Sirieix C, Breysse D, Frappa M. "Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering," *NDT&E International*, 36, pp 383-394, 2003.
- [13]. Andrade C, Alonso C, Arteaga A, Tanner P. "Methodology based on the electrical resistivity for calculation of reinforcement service life," *Fifth CANMET/ACI International Conference*, pp 899-915, 2000.
- [14]. Cao J, Chung D.D.L. "Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar studied by electrical resistivity measurement," *Cem Concr Res*, 32, pp 1657-1661, 2002.

Monitoring the Electrical Resistance of Concrete During One Slow Freeze Thaw Cycle, A Method for Assessing The Water-Cement Ratio

M. Nili *

Associate professor, Civil Eng., Dept., Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R.Iran

A. Moradi

Msc, Civil Eng., Dept., Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R.Iran

M. Nili

Msc, Civil Eng., Dept., Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R.Iran

(Received: 2014/7/21 - Accepted: 2015/4/29)

Abstract

Many attempts have been done to increase the service life of the concrete structures. In this regard, the concrete properties should be evaluated by non destructive testing methods (NDT) periodically to estimate how the structures may behave in the future. It is so important to select a proper and simple method to examine the concrete properties during the service life. In the present paper, try has been done to evaluate the water cement ratio of the hardened concrete via non destructive measurement of the electrical resistance the concrete during one freeze thaw cycle. Five mix proportions were prepared. The electrical resistance of the cured specimens within one slow freeze thaw cycle was monitored within 24 hours at 1 minute interval. The results declared that as the temperature dropped to zero or minus 15 °C, the electrical resistance variation of concrete is highly affected by water- cement ratio. The characteristics of the curve such as slope, upper and lower limits of electrical resistance curve are dependent on the water-cement ratio of the mixture. The results of the present work can relieve engineers' anxiety about the proper water-cement ratio which was used in the concrete mixture.

Keywords: Electrical resistance measurement, slow freeze thaw cycle, water-cement ratio.

* Corresponding author: nili36@yahoo.co.uk