

بررسی تأثیر اضافه کردن نانو سیلیس بر روی مقاومت ویژه الکتریکی خمیر سیمان

مجتبی مغربی^۱، مصطفی خانزادی^{۲*}، محمود حبیبیان^۳، محسن تدین^۴

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت ساخت - دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

۴- استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

khanzadi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۷

چکیده- مقاومت ویژه الکتریکی را می‌توان یک سنسور پتانسیل برای مقاومت و دوام نام برد. غیرمخرب بودن و در عین حال ارزان بودن از مزیت‌های ویژه این روش به شمار می‌رود. در این پژوهش تأثیر نانو سیلیس و میکروسیلیس بر روی مقاومت ویژه الکتریکی خمیر سیمان مورد مطالعه قرار گرفته، برای این منظور نمونه‌هایی با مقادیر متفاوت از نانو سیلیس و میکروسیلیس ساخته شده و در سنین ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایش شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تا سن ۳ روزه، افزایش هر مقدار نانو سیلیس و میکروسیلیس موجب کاهش مقاومت ویژه الکتریکی شده اما در سن ۲۸ روزه بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس مشاهده شده است. اما رشد مقاومت ویژه الکتریکی بعد از این زمان تنها در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مشاهده شد. نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب هم‌زمان نانو سیلیس و میکروسیلیس، در محدوده نتایج بین نتایج حاصل از نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و نمونه‌های حاوی میکروسیلیس است.

در حالت کلی اضافه کردن نانو و میکروسیلیس به خمیر سیمان باعث افزایش چشمگیر مقاومت الکتریکی در این نمونه‌ها شده، به گونه‌ای که تنها با اضافه کردن میکروسیلیس به میزان ۲.۵ درصد وزن سیمان، مقاومت الکتریکی در سن ۹۰ روز رشدی ۲۰ درصدی داشته و در نمونه‌ای که به آن ۱۰ درصد وزن سیمان، نانو سیلیس اضافه شده است در سن ۹۰ روزه شاهد افزایش بیش از ۵۰ درصدی مقاومت الکتریکی بوده ایم.

واژگان کلیدی: نانو سیلیس، مقاومت ویژه الکتریکی، میکروسیلیس، پوزولان، ملات سیمان

۱- مقدمه

مناطق که یون کلر در مجاورت بتن وجود داشته باشد، یک مشکل اصلی صنعت ساختمان است. زیرا یون کلر می‌تواند باعث خوردگی^۲ میل‌گرد و در آخر سبب پایین

حفظ کیفیت دراز مدت بتن یا دوام^۱ آن جزو یکی از مهم‌ترین مباحث تکنولوژی بتن است و این موضوع در

2- Corrosion

1- Durability

آمدن قابلیت‌های بتنی شود.

مقاومت الکتریکی با نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر ارتباط مستقیم دارد. به همین دلیل مدتی است که آزمایش سنجش مقاومت ویژه الکتریکی بتن به دلیل سرعت بالا و غیر مخرب بودن مورد توجه قرار گرفته است.

خوردگی میل‌گرد فرایندی شیمیایی است و برای آنکه خوردگی بین آند و کاتد جریان داشته باشد، باید یون‌ها از میان بتن مجاور میل‌گرد عبور کنند. حرکت یون‌ها از میان محلول موجود در منافذ بتن صورت می‌گیرد. بتن هادی الکتریکی است و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آن شدت جریان خوردگی را مشروط می‌کند و هر چه مقاومت الکتریکی بیشتر باشد شدت جریان کمتر پس خوردگی هم کمتر است.

در فرآیند خوردگی، آب موجود در منافذ بتن در نقش الکترولیت عمل می‌کند که انتقال یون‌ها را بر عهده دارد. بنابراین با افزایش مقاومت الکتریکی بتن از تحرک و انتقال یون‌ها کم می‌کند در نتیجه شدت خوردگی نیز کم می‌شود و از آنجا که بتن نقش الکترولیت را دارد و جریان یون‌ها در این الکترولیت انجام می‌شود، بنابراین ساختار بتن نقش اساسی در مقاومت الکتریکی دارد. به عبارت دیگر مقدار مقاومت الکتریکی به نفوذپذیری (توزیع و اندازه منافذ) و رطوبت بتن بستگی دارد. با افزایش میزان منافذ و رطوبت بتن از مقدار مقاومت الکتریکی آن کاسته می‌شود.

به طور کلی، بتن‌هایی که مقاومت الکتریکی آنها زیاد است، امکان نفوذ یون کلر و شروع خوردگی در آنها کمتر است [۱۲].

به همین دلیل از آزمایش مقاومت الکتریکی به عنوان پتانسیل سنجی بتن در برابر خوردگی استفاده می‌شود.

به نظر می‌رسد محققین روس ابداع کننده روش مقاومت الکتریکی برای تعیین خواص سیمان و زمان

گیرش آن بوده اند و این امر به قبل از جنگ جهانی دوم و ابتدای دهه ۳۰ میلادی برمی‌گردد [۱].

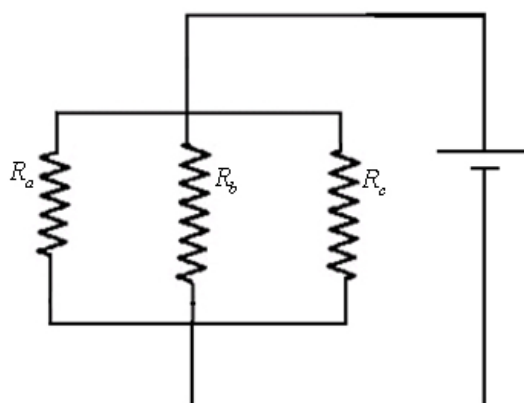
خمیر سیمان سخت شده مرطوب با نسبت آب به سیمان بیشتر، مقاومت الکتریکی کمتری را در مقایسه با نسبت آب به سیمان کمتر نشان می‌دهد. و کاهش سیمان در بتن با وجود ثابت بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقاومت الکتریکی به دلیل کاهش میزان الکترولیت می‌شود [۲]. برای خمیر سیمان خالص و ملات نیز آزمایش‌هایی انجام شده است که افزایش مقاومت الکتریکی را در هنگام گیرش و پس از آن نشان می‌دهد [۱].

مواد افزودنی شیمیایی مقاومت الکتریکی بتن را کاهش نمی‌دهند [۳]؛ اما تأثیر افزودنی‌های پوزولانی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی در افزایش مقاومت الکتریکی چشمگیر است [۴ و ۵ و ۶]. از موارد دیگری که مقاومت الکتریکی بتن را افزایش می‌دهد ولتاژ و دمای بتن، می‌باشد [۷ و ۸].

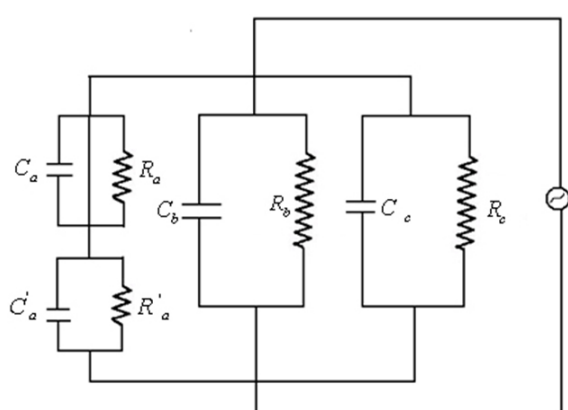
مقاومت الکتریکی بتن‌های حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس بیش از ۳ برابر بتن معمولی بدون میکروسیلیس گزارش شده است [۹]. به دلیل نفوذ پذیری پائین این نوع بتن‌ها و در نتیجه امکان نفوذ حداقلی آب به داخل آن، میلگردها از خطر حملات کلرایدی مصون و در مقابل خوردگی مقاوم می‌باشند.

به دلیل تحرک کم یون‌ها در بتن با مقاومت الکتریکی زیاد، این بتن‌ها دارای عمر طولانی‌تری از نظر خوردگی به حساب می‌آیند و آزمایش مقاومت الکتریکی در رابطه با بحث دوام اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از مهمترین عواملی که شروع و شدت خوردگی را کنترل می‌کند، مقاومت الکتریکی بتن است [۱۰]. Vassie [۱۱] خوردگی در بتن با مقاومت الکتریکی بیش از $120 \Omega.m$ را محتمل نمی‌داند و در بتن‌هایی با مقاومت الکتریکی کمتر از $50 \Omega.m$ خوردگی

بر اساس مسیرهای گفته شده پژوهشگران، بتن را در جریان D.C به صورت سه مقاومت که با یکدیگر موازی هستند مدل کردند (شکل ۲). اما بعدها با انجام آزمایش تکمیلی و بررسی مقاومت الکتریکی بتن با جریان A.C مدل جدیدی پیشنهاد شد که در آن خازن نیز با مقاومت به صورت موازی مدل شده است.



شکل (۲) مدل الکتریکی بتن در جریان مستقیم [۱۲]



شکل (۳) مدل الکتریکی بتن در جریان متناوب [۱۲]

در مدل جریان D.C، R_a و R_b ، R_c مقاومت‌های الکتریکی به ترتیب در مسیرهای a و b و c است. در مدل جریان A.C علاوه بر مقاومت‌های R_a و R_b ، R_c خازن‌های C_a و C_b ، C_c نیز گذاشته شده که ظرفیت خازن سیستم از مسیرهای به ترتیب a و b و c است (شکل ۳). مسیر a متشکل از خمیر سیمان و سنگ‌دانه است و مدل آن متشکل از دو مقاومت

میلگردها را حتمی می‌داند. به همین خاطر مقاومت الکتریکی می‌تواند به عنوان عاملی که پتانسیل خوردگی را نمایان می‌کند قابل توجه باشد.

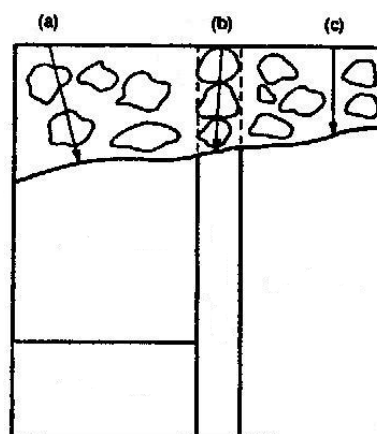
۱-۱- عوامل مؤثر و مکانیزم و شدت خوردگی

۱-۱-۱- عوامل مؤثر بر شدت خوردگی

از عواملی که مقاومت الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به مقدار، اندازه، توزیع منافذ، نوع و مقدار یون‌های موجود در منافذ و در ژل سیمان و قدرت تحرک یون‌ها اشاره کرد. مقاومت الکتریکی تنها خاصیت بتن است که با تمام عوامل کنترل شدت خوردگی، ارتباط دارد. در بتن معمولی مقدار و توزیع اندازه منافذ عامل مهم کنترل شدت خوردگی است ولی نوع و مقدار یون‌ها و قدرت تحرک آنها در بتن حاوی میکروسیلیس کنترل کننده اصلی در شدت خوردگی می‌باشد [۱۱و۱۰].

بتن متشکل از سنگدانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت، و خمیر سیمان است. مسیرهایی که جریان الکتریکی از داخل بتن عبور می‌کنند (شکل ۱) عبارتند از [۱۲]:

- (a) سنگدانه و خمیر سیمان
- (b) سنگدانه‌ها که همگی با یکدیگر در تماس هستند
- (c) داخل خمیر سیمان



شکل (۱) هدایت جریان الکتریکی توسط بتن [۱۲]

که هر کدام با یک خازن موازی و مجموعه با هم به صورت سری عمل می‌کند تشکیل شده است. علت رفتار خازنی بتن اینگونه توجیه می‌شود که با اعمال جریان الکتریکی به بتن، ذرات داخل بتن پلاریزه می‌شوند. پلاریزاسیون ذرات سبب می‌شوند قطعه بتنی مانند یک خازن رفتار کرده و مقاومت خازنی معلوم شود. به عبارت دیگر ذرات داخل بتن مانند یک ماده دی الکتریک رفتار می‌کنند. بتن علاوه بر رفتار مقاومت الکتریکی، از خود رفتار خازنی نیز نشان می‌دهد. بنابراین برابر جریان مقاومت می‌کند امپدانس بتن است که مقدار آن از (رابطه ۱) به دست می‌آید [۱۲]:

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

بتن مانند هر ماده دیگر دارای هدایت الکتریکی و به عبارتی بر عکس آن دارای مقاومت الکتریکی است. هدایت و مقاومت معانی عکس یکدیگر دارند. وجود رطوبت و تخلخل در بتن باعث کاهش مقاومت و افزایش هدایت الکتریکی آن می‌شود. کاهش کنترلیت موجود در بتن که با کاهش رطوبت به دست می‌آید، مقاومت الکتریکی بتن را بالا میبرد. برای این که مقاومت الکتریکی بتن صرف نظر از ابعاد مشخص شود، مقاومت ویژه الکتریکی طبق (رابطه ۲) تعریف شده است [۱۲].

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

۱-۲- مکانیزم آزاد شدن کلر در بتن میکروسیلیسی

نظریه Page و Vennesland [۱۳] افزودن میکروسیلیس در بتن سبب کاهش PH بتن می‌شود و مقدار PH از ۱۳.۵ به ۱۲.۵ می‌رسد در نتیجه قابلیت بتن حاوی میکروسیلیس در پیوند با یون کلر کم می‌شود. زیرا کاهش قلیایی، باعث

افزایش حلالیت کلرید آلومینات کلسیم (نمک فریدل) می‌شود. ولی پژوهشهایی که به وسیله دیگران انجام شده [۱۵ و ۱۴] نشان می‌دهد که با کاهش PH، قابلیت پیوند C_3A با کلر افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر هنوز دلیل زیاد شدن یونهای آزاد در بتن میکروسیلیسی به درستی روشن نیست. اما مهم این است که مقدار نفوذ یونهای کلر به داخل بتن در بتن حاوی میکروسیلیس کمتر از بتن معمولی است. وجود یونهای آزاد در بتن اهمیت دوم است. به عبارت دیگر وقتی مقدار یونهای کلری که در بتن نفوذ کرده کم باشد، آزاد بودن قسمتی از یونها چندان اهمیتی ندارد. این نظریه با مشاهده Page و همکارانش [۱۶] منطبق است که از نقطه نظر خوردگی میل‌گرد در بتن، انتشار کلر مهم است و تشکیل نمک فریدل اثر دوم دارد.

۱-۳- شدت خوردگی بتن میکروسیلیس

شروع خوردگی بتن حاوی میکروسیلیس در زمان طولانی‌تر از بتن معمولی اتفاق می‌افتد و شدت خوردگی آن کمتر از بتن معمولی است [۱۷]. Bamforth و همکارانش [۱۸] نمونه‌های بتن را در داخل محلول سولفات-کلر قرار دادند و مشاهده کردند که شروع خوردگی برای بتن‌های حاوی میکروسیلیس و بتن معمولی به ترتیب ۶۴۵ روز و ۱۰۸ روز است. روند کاهش شدت خوردگی بتن حاوی میکروسیلیس (خوردگی از نوع گالوانیکی که در آن میلگرد آند از میلگرد کاتد جدا است) به وسیله Lorentz و French دیده شده است [۱۹].

به صورت کلی می‌توان بیان داشت که میکروسیلیس، پایایی بتن را در برابر خوردگی افزایش داده و احتمال خوردگی میلگرد در داخل بتن را کاهش می‌دهد. این عمل در نتیجه باعث کاهش نفوذپذیری بتن در برابر انتشار یون کلر و افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

میکروسیلیس به عنوان یک پوزولان فعال مطرح است، قصد بر آن است تا تأثیر ریزتر کردن ابعاد میکروسیلیس تا مقیاس نانومتری یک را بر روی مقاومت الکتریکی ملات سیمان بسنجیم و به همین خاطر ۱۰ آزمون ملات سیمان مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ تهیه شد، که حاوی مقادیر متفاوتی نانوسیلیس، میکروسیلیس و نانوسیلیس و میکروسیلیس با هم است. در طرح اختلاط ساخت ملات‌های سیمان، وزن سنگدانه و آب و مواد سیمانی در تمامی طرح‌ها ثابت فرض شد با این تفاوت که در هر طرح و به هر میزان که نانو و یا میکروسیلیس به مخلوط اضافه شد به همان میزان از وزن سیمان کم شد. تا همواره وزن مواد سیمانی ثابت باشد و حد روانی ملات به عنوان معیار تعیین میزان فوق روان کننده در اختلاط انتخاب شد. بدین ترتیب که میزان روانی به دست آمده از سیمان بدون نانو و میکروسیلیس به عنوان مرجع انتخاب شد و متناسب با مواد پوزولانی، آنقدر فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد تا ملات به روانی مورد نظر برسد.

در این پژوهش از سیمان نوع ۴۲۵-۱، ماسه استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰، نانوسیلیس آمورف معلق در آب با خلوص ذرات ۹۹٪ که درشتی ذرات آن در حدود ۵ نانومتر بود استفاده شد. میکروسیلیس از کارخانه فروآلیاژ ایران (ازنا) تهیه شد. در حالت بسیار خوب، باید تنها میزان نانوسیلیس و میکروسیلیس و سیمان تغییر نماید. اما این امر به علت ریزی بسیار بالا نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس امکان پذیر نبود به دلیل اینکه افزایش میزان نانو و میکروسیلیس و افزایش سطح ویژه مواد در مخلوط، ملات دچار افت روانی می‌شود، پس برای یکسان و همگن بخش کردن ذرات در خمیر، متناسب با میزان میکرو و نانو سیلیس، از مقادیری فوق روان کننده استفاده شد. پس در

طرح اختلاط ۲ پارامتر تغییر خواهد کرد: میزان مواد جایگزین سیمان و فوق روان کننده. در مورد میزان نانوسیلیس و میکروسیلیس و این دو ماده با هم، درصد ۱۰ - ۷/۵ - ۵ - ۲/۵ نسبت به وزن سیمان اولیه ملاک عمل قرار گرفت. انتخاب این درصدها پس از مطالعات جامعی که انجام شد، قطعی شد گام‌های افزایش مواد یکسان و برابر ۲/۵٪ وزن سیمان بود، زیرا اگر تمامی گام‌ها یکسان انتخاب شوند، نتیجه‌گیری و تغییر و درک رفتار مواد بهتر صورت خواهد گرفت، از سوی دیگر استفاده بیش از حد از مواد پوزولانی در دراز مدت مشکلات دوامی ایجاد خواهد کرد و توصیه می‌شود که بیشینه محدوده استفاده از میکروسیلیس در بتن ۱۰ - ۷٪ انتخاب شود به همین دلیل بیشینه میزان نانو و میکروسیلیس ۱۰٪ وزن سیمان فرض شده است که البته استفاده و مطالعات مقادیر بیشتری از این مواد ترجیح اقتصادی نیز نخواهد داشت (جدول ۱). برای ساخت ملات سیمان معمولی (OPC) یا شاهد، مطابق استاندارد ملی ۳۹۳ درصدهای اختلاط انتخاب شد [۲۰] و در طرح‌های اختلاط بعدی به همان میزان که نانو و یا میکروسیلیس به مخلوط اضافه شد از وزن سیمان کسر شد. ملاک تعیین میزان فوق‌روان کننده در هر طرح روانی ملات آن در نظر گرفته شد. روانی ملات سیمان معمولی مطابق دستورالعمل ASTM C-230 [۲۱] مبنای روانی آزمون‌ها قرار گرفت و بدین ترتیب که به هر طرح آنقدر فوق روان کننده اضافه شد تا به میزان روانی ملات OPC برسد. پس از آن، ملات ساخته شده قالب‌گیری شد و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در اتاق مرطوب، از قالب خارج و در حوضچه آب نگهداری شد و در سنین مختلف مورد سنجش قرار گرفت. ملات‌های سیمان که به صورت منشورهای با ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متر در آمده است در سنین ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول (۱) نسبت‌های هر یک از مواد در طرح اختلاط

ردیف	نام نمونه	میزان آب			درصد وزنی میکروسیلیس به سیمان	درصد وزنی نانو سیلیس به سیمان	میکروسیلیس gr	نانوسیلیس gr	میزان روانی بر روی میز لرزان				
		cc	gr	gr					میانگین	1	2	3	4
1	OPC	225	1350	450.0	0.00%				13.65	14	13.3	13.6	13.7
2	MS1	225	1350	438.8	2.5%	11.3			15.35	15.2	15.5	15.2	15.2
3	MS2	225	1350	427.5	5.0%	22.5			14.43	14.5	14.2	14.5	14.5
4	MS3	225	1350	416.3	7.5%	33.8			14.3	14.5	14.2	14.3	14.2
5	MS4	225	1350	405.0	10.0%	45.0			14.75	14.5	14.5	15	15
6	L-NS1	225	1350	438.8	2.5%	11.3			13.78	13.7	13.7	13.7	14
7	L-NS2	225	1350	427.5	5.0%	22.5			15	15	15.1	14.6	15.3
8	L-NS3	225	1350	416.3	7.5%	33.8			13.5	13.7	13.3	13.4	13.6
9	L-NS4	225	1350	405.0	10.0%	45.0			13.65	13.5	13.5	13.6	14
10	LNS+MC 1	225	1350	438.8	1.25%	5.6	5.6		14.3	14.2	14.4	14	14.6
11	LNS+MC 2	225	1350	427.5	2.50%	11.3	11.3		15.05	15.2	15	15	15
12	LNS+MC 3	225	1350	418.5	3.50%	15.8	15.8		15	15	15	15	15
13	LNS+MC 4	225	1350	405.0	5.00%	22.5	22.5		14.18	14.2	14.5	14	14

بالای صفحه فوقانی نمونه استفاده شد. سپس الکترودهای دستگاه را به صفحه برنجی وصل کرده و با استفاده از یک وسیله تعیین مقاومت الکتریکی (مقاومت امیدانس یا ظاهری)، مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شد (شکل ۴). در تمامی نمونه‌ها فرکانس دستگاه ثابت 1.00KHZ تعیین شد. مقاومت الکتریکی اهمی اندازه‌گیری شده در سطح تماس ضرب و بر طول یا فاصله بین دو صفحه برنجی تقسیم شد. طبق رابطه (۲)، این آزمایش در سنین ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی آزمون‌های ساخته شده انجام شد.

در این صورت دقت شود که حتماً این خمیر اضافی برداشته شود در غیر این صورت خمیر سیمان اضافی مانند یک اتصال کوتاه عمل کرده و باعث می‌شود جواب‌های مقاومت الکتریکی صحیح نباشد. این وضعیت بطور شماتیک در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴) چگونگی آماده سازی نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ملات سخت شده

چگونگی نام‌گذاری نمونه‌ها در (جدول ۲) نشان داده شده است. آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ملی ۳۹۳ انجام گرفت و نحوه انجام آزمایش مقاومت الکتریکی در ادامه توضیح داده خواهد شد.

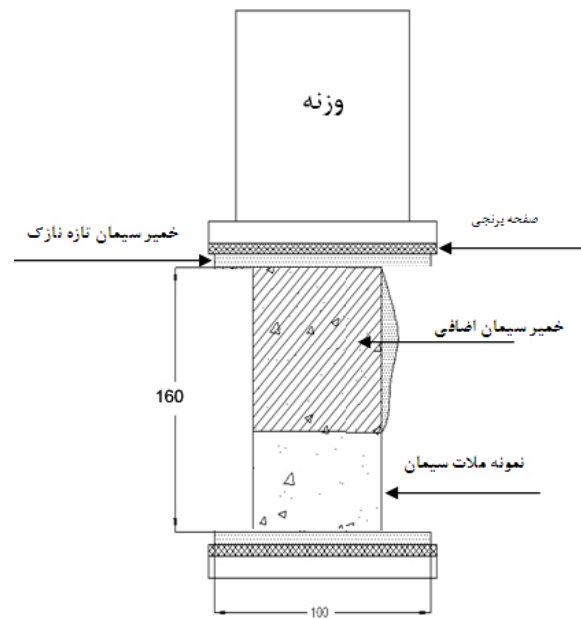
جدول (۲) نحوه نامگذاری نمونه‌ها

نام نمونه	نوع مواد سیمانی به کار رفته در نمونه
OPC	سیمان پرتلند معمولی (نمونه شاهد و مینا مقایسه)
MS (1-4)	میکرو سیلیس با درصدهای (۰.۵٪ - ۲.۵٪ - ۵٪ - ۷.۵٪ - ۱۰٪)
L-NS (1-4)	نانوسیلیس با درصدهای (۰.۵٪ - ۲.۵٪ - ۵٪ - ۷.۵٪ - ۱۰٪)
LNS+MS (1-4)	ترکیب نانو سیلیس + میکروسیلیس با درصدهای (۰.۵٪ - ۲.۵٪ - ۵٪ - ۷.۵٪ - ۱۰٪) که سهم هر یک از مواد در هر ترکیب ۵۰٪ و به طور مساوی است

۲-۱- نحوه آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی ملات سیمان

آزمون مقاومت الکتریکی بتن یا ملات، استاندارد و یا دستورالعمل خاصی به وسیله‌ی مراجع معتبر ملی و بین‌المللی ارائه نشده است. برای این منظور ابتدا سطح آزمون‌ها با دستمالی خشک شد، سپس ۲ ورقه برنجی که به عنوان هادی استفاده می‌شوند را به صورت عمودی در ۲ طرف آزمون قرار دادند و برای ایجاد اتصال بین آزمون و صفحه‌ها از یک لایه نازک خمیر سیمان استفاده کردند. برای اینکه تماس در سرتاسر سطح برقرار باشد از یک وزنه در

خود نسبت به نمونه‌های حاوی نانو ذرات، با همان سرعت قبلی از این نمونه‌ها پیشی می‌گیرد. اما در مورد نمونه‌های حاوی نانوذرات شاهد این موضوع هستیم که بیشترین رشد مقاومت الکتریکی خود را تا سن ۲۸ روزه داشته و پس از آن شاهد رشد ناچیز نسبت به قبل هستیم. که این پدیده می‌تواند این نکته را تأکید کند که تا سن ۲۸ روزه بیشتر واکنش‌های پوزولانی این مواد انجام شده است و تأثیر خود را در پر کردن خلل فرج و در نتیجه افزایش تراکم ژل سیمان داشته و پس از این زمان ما شاهد تغییر ناچیزی در تراکم ملات و در نتیجه مقاومت الکتریکی آن هستیم. ولی میکروسیلیس با یک سرعت اولیه کمتری نسبت به نانوسیلیس وارد واکنش‌های پوزولانی شده اما در آخر ژل متراکم‌تری را ایجاد می‌کند. که این پدیده مؤید این نکته است که سرعت بالای واکنش‌های پوزولانی می‌تواند اثرات نامطلوبی داشته باشد. البته با توجه به توضیح بالا، همانگونه که انتظار می‌رود نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب همزمان میکروسیلیس و نانو سیلیس بین محدوده جواب نتایج نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و نمونه‌های حاوی نانوسیلیس است. و انتظار می‌رود تا یکی از عوامل افزایش مقاومت الکتریکی، تراکم خمیر سیمان باشد. برای پژوهش در این موضوع، به طور نمونه فرایند تغییر مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۹۰ روز بررسی شد. همانگونه که در شکل (۷) مشخص شده است، تقریباً رفتار مقاومت الکتریکی و فشاری نمونه‌ها یکسان است و می‌توان انتظار داشت تا در خمیر سیمان‌های حاوی نانو سیلیس و میکروسیلیس مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری با هم افزایش پیدا کند. نتایج به دست آمده در این پژوهش با یافته‌های منتشر شده به وسیله دیگر پژوهشگران در این گرایش هم‌خوانی دارد. Li و همکارانش [۲۲]. تاثیر نانو ذرات روی مقاومت الکتریکی



شکل (۵) تصویر شماتیک اتصال کوتاه در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۳- نتایج

نتایج مقاومت ویژه الکتریکی ملات‌های ساخته شده در شکل (۶) و در عمرهای ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه آمده است.

۳-۱- تحلیل نتایج

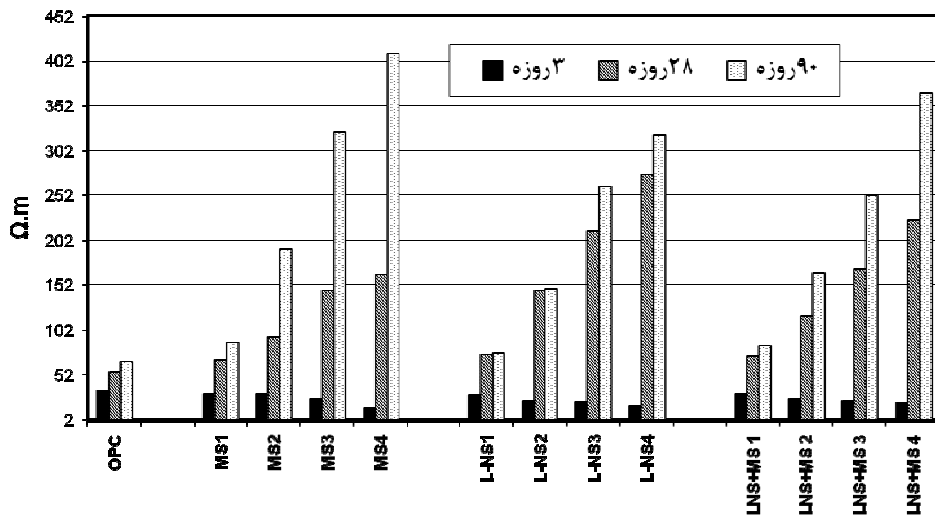
در سن ۳ روزه افزایش میزان میکروسیلیس و نانو سیلیس با کاهش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها همراه بود که علت آن می‌تواند غیر اشباع بودن نمونه‌ها باشد.

در سن ۲۸ روزه می‌بینیم که نمونه‌های حاوی نانو ذرات نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مقاومت الکتریکی بیشتری از خود نشان می‌دهد. که این می‌تواند ناشی از تراکم بالاتر این نمونه‌ها به علت پیشرفت بیشتر واکنش‌های پوزولانی باشد

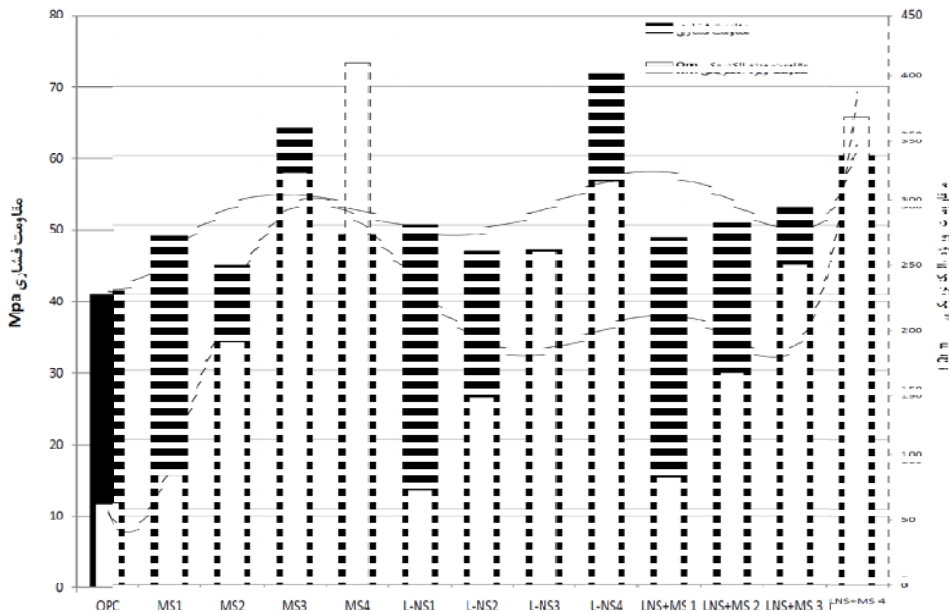
اما در سن ۹۰ روزه مشابه که مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با همان سرعت قبلی افزایش یافته است تا آنجا که ضمن جبران عقب افتادگی

بین این پژوهش و پژوهش انجام شده به وسیله نگارندگان این مقاله این است که آنها از نانوسیلیس با قطر 5 ± 5 نانومتر استفاده کرده ولی در این پژوهش از نانوسیلیس های آمورفی با قطر در حدود ۵ نانومتر استفاده شده است. اما در هر دو تحقیق صورت گرفته تأثیر افزایش مقاومت الکتریکی بر اثر اضافه کردن نانوسیلیس بررسی و تأیید شده است.

خمیر سیمان را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن نانو ذرات به ویژه نانو لوله های کربنی باعث افزایش مقاومت الکتریکی می شود. و یا Ga و همکارانش [۲۳] همین کار را روی نانوفیبرهای کربنی انجام دادند. در یکی از کامل ترین پژوهش های انجام شده در این زمینه Li و همکارانش [۲۴] تأثیر اضافه کردن نانو سیلیس و نانواهن را روی مقاومت الکتریکی همین سیمان بررسی کردند. فرق



شکل (۶) نتایج مقاومت ویژه الکتریکی در سنین ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل (۷) مقایسه نتایج مقاومت الکتریکی و فشاری نمونه ها در سن ۹۰ روز

۴- نتیجه گیری

آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی یکی از راه‌های مناسب سنجش پتانسیل مقاومت و دوام ملات سیمان است. غیر مخرب بودن و ارزان بودن از مزیت‌های ویژه این روش است. با پیشرفت علم مواد امکان ساخت ذرات با ابعاد نانو از مواد پوزولانی نیز پیدا شده است.

در این پژوهش تأثیر نانو سیلیس روی مقاومت ویژه الکتریکی خمیر سیمان مطالعه شده است، که برای این منظور از نانو سیلیس و میکروسیلیس استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تا سن ۳ روزه، افزایش هر مقدار نانو سیلیس و میکروسیلیس موجب کاهش مقاومت ویژه الکتریکی شده لیکن در سن ۲۸ روزه بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس مشاهده شد. اما رشد مقاومت ویژه الکتریکی بعد از این زمان تنها در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مشاهده شد. نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب هم‌زمان نانو سیلیس و میکروسیلیس، در محدوده نتایج بین نتایج حاصل از نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و نمونه‌های حاوی میکروسیلیس قرار گرفت.

۵- فهرست علائم

$R =$ مقاومت اهمی بتن (Ω)

$Z =$ مقاومت ظاهری بتن (Ω)

$F =$ فرکانس جریان اعمالی (KHz)

$R_s =$ مقاومت ویژه الکتریکی [$\Omega.m$]

$R =$ مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده جسم [Ω]

$A =$ سطح تماس بتن با صفحات اتصال الکتریکی (سطح مقطع نمونه) [m^2]

$L =$ فاصله بین سطوح تماس بتن و صفحات اتصال الکتریکی (ارتفاع نمونه) [m]

۶- منابع

[1] Hughes, B.P., Soleit, A.K.O., Brierley, R.W., "New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete ", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No.133, pp.243-248, 1985.

[۲] آدام نوبل "خواص بتن" ترجمه: فامیلی، بازننگری چهارم، انتشارات ابوریحان بیرونی، ۱۳۷۶

[3] European Union-Brite Euram III, "LAW Material Properties State-of-the-Art", *Eurolight Con*, Document BE96-3942/R2, 1998.

[۴] قدوسی، پرویز، "ارزیابی آسیب دیدگی بتن سبک در مقابل خوردگی آرماتور"، گزارش نهایی طرح پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۹.

[5] Carbera, J.G., Ghodousi, P., "The Influence of Fly Ash on Resistivity and Rate of Corrosion of Reinforced Concrete", *ACI Special Publication*, Vol 154, pp. 229-244, 1994.

[۶] قدوسی، پرویز، پرهیزگار، طیبه، رئیس قاسمی، امیر مازیار، "ارزیابی دوام بتن‌های حفاظت شده با پوشش‌های سطحی بر اساس آزمایش شدت خوردگی به روش پتانسیو استاتیک"، اولین کنفرانس انجمن مهندسان راه و ساختمان ایران، تهران، ۱۳۷۸

[7] Page, C.L and Vennesland, O, "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes "Material and Structure, *RILEM* Vol 16, No 91, pp19-25, 1983.

[۸] قدوسی و همکاران، "فن‌آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ک-۲۸۳

[9] Ghodousi, P. Ramazanianpour, A. Taheri, A. Parhizkar, T and Ganjian, E. "The Use of Surface Treatment Compounds to Enhance Durability of Reinforced Concrete", *International Congress, Concrete in the service of Mankind*, London, 1996.

- [18] Maslehuddin, M, Rasheeduzzafar, Al-Moudi, O.S.B. Almana, "Concrete Durability in Very Aggressive Enviroment" *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol 3, pp 144-150, 1991.
- [19] Bamforth . P.B. and Pocock , D.C " Minimising the risk of chloride induced Corrosion by Selection of Concreting Material " Proceeding of Corrosion of Reinforcement in concrete , Society of Chemical industry Wishaw ,pp165-177, 1990.
- [۲۰] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ "سیمان تعیین مقاومت فشاری و خمشی، روش آزمون" تجدید نظر دوم ، کرج ۱۳۸۳
- [21] American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", *ASTM C230 / C230M - 08*, Philadelphia, USA 2008.
- [22] Li. Geng Ying, Wang. Pei Ming, Zhao. Xiaohua, "Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites " *Cement and Concrete Composites* , Volume 29, Issue 5, May 2007, pp. 377-382
- [23] Gao .Di, Sturm. Mariel, Mo. Y L, "Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete" *Smart Materials and Structures*, Volume 18, No.9
- [24] Li. H. Xiao, Hui-gang. Ou, Jin-ping , "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials", *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 3, March 2004, 435-438.
- [10] Andrade, C. Alonso, C. and Goni ,S. " Possibilities for Electrical Resistivity to university characterize mass transport processes in concrete " Proceedings of Concrete 2000 Conference, vol 2, *Spon*, London , pp. 1639-1652, 1993.
- [11] Whittington, J., Mc Carter, J., Forde, M.C., "The Conduction of Electricity through Concrete ", *Magazine of Concrete Research*, Vol.33, No.114, pp.48-60, 1981.
- [12] Vassie, P.R," A Survey of site Test for Assessment of Corrosion in reinforced Concrete "TRRL Report 953, Department of Environment Publication, London, 1980.
- [13] Mc Carter, W.J., Curran, P.N., "The Electrical Response Characteristics of Setting Cement Paste ", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No.126, pp.42- 49, 1984.
- [14] Petterson, K, "Corrosion Threshold Value and Corrosion Rate in Reinforced Concrete " *CBI Report Swedish Cement and Concrete Research Institute*, 2:92, 1992.
- [15] Byfores,K,"Influence of Silica Fume and Fly Ash on Chloride Diffusion and PH Values in Cement Past" *Cement and Concrete Research*, Vol 17, pp.115-130, 1987.
- [16] Page, C.L, Short, N.R, and Tairas, A.E," Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste " *Cement and Concrete Research*, Vol 11, pp 395-406, 1981.
- [17] Lorentz ,T and French ,C " Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete , Effects of Materials , Mix Proportion and Cracking " *ACI Materials Journal* , pp 181-90, 1995.

Study the Influences of Nano-Silica on Electrical Resistivity of Cement Paste

M. Maghrebi¹, M. Khazadi^{2*}, M. Habibian², M. Tadayon³

1- M.Sc in Construction Management, Iran University of Science and Technology

2- Assistance professor, Iran University of Science and Technology

3- Assistance professor, Buali Sina University of Hamadan

khazadi@iust.ac.ir

Abstract:

This paper presents the influences of adding nano-silica on electrical resistivity of cement paste, because the electrical resistivity test is one of the non-destructive test in durability issues that can help us to assess the resistance of cement is facing by ion attacks. Furthermore, because the transition area in concrete is one the weak parts of concrete. It is tried to improve the durability properties of transition area that is mainly filled by cement and water. So, this research focuses on assessing the electrical resistivity of cement paste when it is integrated with pozzolan material in nano and micro scale. In to end, the cement paste without any additive is compared with cement paste integrated with nano-silica and micro silica. The amounts of additive materials are limited to 2.5%, 5%, 7.5% and 10% of cement weight. The two types of nano-silica have been used in this research that are liquid suspended nano-silica and solid nano-silica particle. So, the 3 different pozzolan materials were used that include two different nano silica (liquid and solid) and micros silica. Then all the results have been compared with results of ordinary cement paste as reference point. Then the samples were tested at age of 3, 28 and 90 days. The results show that before age of 3 days, adding nano silica or micro silica led to decline the electrical resistivity because the pozzolanic reaction is not started, but at age of 28 days the top achieved electrical resistivity belong to the samples which has nano-silica in its mixture. However, after age of 28 days, just the samples with micro-silica have electrical resistivity growth. The results of the samples that contain the both of nano-silica and micro-silica are between the results of samples that contain micro-silica and the samples which integrated by nano-silica.

Keywords: Nano-Silica, Electrical Resistivity, Micro-Silica- pozzolan, Cement Paste