



## بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی بتن حاوی بال کلی و میکروسیلیس

امیر طریقت<sup>۱</sup>، ابوالفضل سلطانی<sup>۲</sup>، وحید بختیاری<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، [Tarighat@srttu.edu](mailto:Tarighat@srttu.edu)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۳- کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

### چکیده

تولید سیمان پرتلند به عنوان گران‌ترین عنصر تشکیل دهنده بتن همراه با اثرات مخرب زیست محیطی و مصرف قابل توجه انرژی است. از این رو استفاده از مواد مکمل جایگزین بخشی از سیمان، نظیر پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی به دلیل مزایای اقتصادی و فنی، کاهش یا حذف مشکلات زیست محیطی و ... یک راه حل اساسی می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر جایگزینی مقادیر مختلف پوزولان مصنوعی میکروسیلیس و ماده معدنی بال کلی بر برخی از خواص مکانیکی و دوام بتن، ۸ طرح مخلوط با دو نسبت آب به مواد سیمانی مختلف ساخته شد. در هر دو نسبت آب به سیمان علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی ماده معدنی بال کلی به مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد و جایگزینی میکروسیلیس به میزان ۰ و ۷ درصد وزنی سیمان انجام شد. به منظور تعیین برخی از خواص مکانیکی و دوام بتن (مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی) آزمایش‌های مربوطه در سنین مختلف بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. یافته‌های اصلی این تحقیق نشان داد که استفاده از ماده معدنی بال کلی در کنار میکروسیلیس می‌تواند سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی بتن شود به گونه‌ای که بهترین عملکرد بال کلی در درصد جایگزینی ۱۰ درصد مشاهده شد.

**کلمات کلیدی:** بتن، بال کلی، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی

### ۱- مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی و دومین ماده پرمصرف در دنیا پس از آب است. سیمان پرتلند گران‌ترین ماده موجود در بتن به حساب می‌آید و با توجه به گستردگی ساخت‌وسازها و فعالیت‌های عمرانی و نیاز روزافزون به مصرف سیمان، دسترسی به سیمان باکیفیت و قیمت مناسب همواره مورد توجه بوده است. در فرآیند تولید هر تن سیمان موارد زیر قابل توجه است: مصرف متوسط ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی، مصرف متوسط ۱۱۸ کیلووات ساعت برق، ضمن اینکه تقریباً یک تن گاز کربنیک تولید می‌کند و گازهای آلاینده در اثر سوختن نفت کوره در کارخانه‌های سیمان وارد محیط زیست می‌شوند [۱ و ۲]. بعلاوه اینکه، ماده‌ی اصلی که برای تولید سیمان استفاده می‌شود سنگ آهک است که با این روند تولید سیمان، ظرف چند سال آینده با کاهش شدید ماده معدنی سنگ آهک مواجه خواهیم شد [۳]. تولید کنندگان سیمان درصدد هستند تا هم مقدار

انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان و هم مقدار گاز انتشار یافته در روند تولید سیمان را کاهش دهند و به فکر موادی برای جایگزینی سیمان هستند [۴]. ماده‌ای که برای جایگزینی سیمان (یا جایگزینی بخشی از سیمان) در نظر گرفته می‌شود، از یک طرف باید عوامل منفی مانند: نیاز به سنگ آهک، تولید  $CO_2$ ، صرف انرژی و هزینه زیاد را کاهش دهد و از طرفی، باید منجر به افزایش خصوصیات مثبت بتن مانند مقاومت و دوام شود. در این بین، پوزولان‌های طبیعی و مواد معدنی به علت کاهش گازهای گلخانه‌ای و اثرات مثبت آن‌ها بر روی خواص بتن، می‌توانند به عنوان جایگزین مناسب سیمان در نظر گرفته شوند.

بالکلی این‌گونه تعریف می‌شود: رس رسوبی دانه ریز با پلاستیسیته بسیار بالا و عمدتاً کائولینیتی است که در درجات بالای حرارت در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و در فضای اکسیداسیون به رنگ سفید تا نزدیک به سفید درمی‌آید [۵]. رنگ طبیعی آن می‌تواند از زرد کم رنگ تا مشکی متغیر باشد که این تغییر رنگ به حضور سایر کانی‌های موجود در آن و سایر موادی که با آن رسوب کرده‌اند، بستگی دارد [۶]. بالکلی ماده ضروری و حیاتی در سرامیک‌ها می‌باشد به نحوی که بیشتر قطعات سرامیکی و کاشی‌ها شامل بالکلی هستند. استفاده گسترده از بالکلی در صنعت سرامیک عمدتاً به دلیل نقش آن در کارایی و مقاومت بخشیدن به قطعات خشک شده است [۷]. با وجود خواص مثبت پوزولانی این ماده معدنی و وجود منابع فراوان آن در ایران تاکنون تحقیقاتی پیرامون استفاده از این ماده در بتن و تاثیر آن بر خواص بتن صورت نگرفته است. میکروسیلیس پوزولانی مصنوعی است که به صورت دود از کارخانه‌های تولید فروآلیاژهای سیلیکونی متصاعد شده و تاثیرات مثبت آن در افزایش دوام و مقابله با حملات شیمیایی بتن اثبات شده است.

میکروسیلیس یک نمونه از پوزولان‌های مصنوعی بسیار فعال است که خاصیت پرکنندگی موثری از خود نشان داده است. میکروسیلیس علاوه بر افزایش مقاومت خمیر، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه، باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود در بتن‌های با مقاومت زیاد معمولاً میکروسیلیس جزء جدایی ناپذیر است و به عنوان جایگزین درصدی از سیمان استفاده می‌شود [۸ و ۹].

آزمایش مقاومت فشاری یکی از رایج‌ترین و مهم‌ترین آزمایش‌های ارزیابی نمونه‌های بتنی می‌باشد که می‌تواند نشان دهنده کیفیت بتن از نظر خواص مکانیکی و دوام باشد. جایگزینی سیمان با درصد‌های مناسب از میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌شود. این افزایش بدلیل واکنش پوزولانی و اثر پرکنندگی (فیلری) میکروسیلیس است.

مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بتن بستگی مستقیم به نفوذ پذیری بتن و شرایط محیطی آن دارد و مسلماً هرچه نفوذپذیری بتن و میزان رطوبت بیشتر باشد، یون‌ها به راحتی و با سرعت بیشتری می‌توانند در داخل محیط بتن حرکت یابند. مقاومت ویژه الکتریکی بتن، پارامتری برای ارزیابی میزان نرخ خوردگی احتمالی نمونه‌های بتن مسلح در حمله‌ی کلرایدی می‌باشد [۱۰]. آنچه در آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی مهم می‌باشد، امکان سنجی و بررسی خوردگی احتمالی آرماتورها در صورت قرار گرفتن بتن در محیط‌های خورنده کلرایدی است. براساس مطالعات صورت گرفته توسط واسیه در صورتیکه مقاومت الکتریکی بیش از ۱۲ کیلو اهم - سانتی‌متر باشد، احتمال خوردگی وجود ندارد و در صورتیکه کمتر از ۵ باشد خوردگی قطعی است و بین این دو مقدار نیز خوردگی محتمل می‌باشد [۱۱].

استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس مقاومت ویژه الکتریکی را بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. تاثیر مثبت میکروسیلیس در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن، از زمان آغاز استفاده از میکروسیلیس در بتن شناخته شده است. به دلیل اندازه ذرات بسیار ریز و ویژگی پوزولانی،

میکروسیلیس یک ساختار با حفرات ریز و یک تمرکز یونی پایین در محلول حفرات ایجاد می کند. تشکیل چنین ریزساختاری در ماتریس سیمان به افزایش معناداری در مقاومت ویژه الکتریکی بتن منجر می شود [۱۲ و ۱۳].  
با توجه به اینکه استفاده از بال کلی در ساخت بتن مورد توجه نبوده، اطلاعات زیادی در خصوص تاثیر این ماده بر خواص مکانیکی و دوام بتن در دسترس نیست. در این تحقیق سعی شده است تا ضمن بررسی تاثیر میکروسیلیس و بال کلی بر مقاومت فشاری بتن، اثر این مواد بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن که خود از آزمایش های دوام بتن می باشد، نیز بررسی شود.

## ۲- معرفی مصالح مورد استفاده در تحقیق

سیمان بکارگرفته شده در ساخت کلیه نمونه های بتنی از نوع پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولید کارخانه سیمان تهران می باشد. سنگدانه های مصرفی در این تحقیق شامل شن و ماسه ی طبیعی دو بار شسته شده است که از معادن موجود در اطراف تهران تهیه شده اند. میکروسیلیس مصرفی، محصول شرکت صنایع شیمیایی ژیکواوا ایران و بال کلی از معادن شهرستان گناباد استان خراسان رضوی است. میکروسیلیس و بال کلی به صورت دوغاب و همراه با آب در ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفته اند. نتایج حاصل از آزمایش XRF این مصالح در جدول ۱ آورده شده است. آب مورد استفاده در ساخت نمونه ها آب شرب شهری است. ماده افزودنی فوق روان کننده نوعی افزودنی شیمیایی است که مقدار آب لازم برای مخلوط بتنی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. ماده افزودنی مصرف شده در این تحقیق محصول شرکت دماوند سفید با نام WRM-TPP بوده که برپایه پلیمرهای پلی کربکسیلیک اتر اصلاح شده، قرار دارد.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده در این تحقیق

ماده شیمیایی (%)	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	L.O.I
سیمان	۲۱/۳۲	۶۲/۰۲	۳/۸۳	۲/۷۶	۳/۴۴	۲/۰۹	۰/۷۳	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۴۴	۲/۹۸
میکروسیلیس	۹۱/۷	۰/۸	۱/۲	۱/۱	۰/۹	۰/۲	۱	۰/۷	۰/۱	<۰/۱	۲/۰۲
بال کلی	۵۱/۹۴	۱۲/۴۲	۱۹/۴۵	۵/۴۳	۲/۲۷	۰/۳۱	۴/۳۸	۰/۹۳	۰/۱۷	۰/۷۱	۱/۷۷

## ۳- مشخصات طرح های اختلاط

در این پروژه تحقیقاتی از ۸ طرح اختلاط مختلف استفاده شد. این طرح ها شامل دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵ می باشد. هر نسبت آب به مواد سیمانی شامل ۴ طرح می باشد. در هر نسبت آب به مواد سیمانی یک طرح به عنوان طرح شاهد، بدون جایگزینی سیمان با میکروسیلیس و بال کلی ساخته شد. در بقیه ی طرح ها به ترتیب ۰ و ۱۰ و ۲۰ درصد وزن سیمان، میکروسیلیس و ۰ و ۷ درصد وزن سیمان، میکروسیلیس و ۰ و ۱۰ و ۲۰ درصد وزن سیمان، بال کلی جایگزین شده است. در کلیه ی طرح ها عیار سیمان  $kg/m^3$  ۴۰۰ می باشد. برای دست یافتن به کارایی یکسان در هر یک از طرح های اختلاط و به منظور دستیابی به سلامتی در حدود ۸۰-۱۲۰ میلی متر، به میزان لازم به هر یک از طرح ها فوق روان کننده اضافه شد. مشخصات طرح های اختلاط ساخته شده در جدول ۲ آمده است. در این جدول مقدار تعیین شده برای شن، ماسه، آب، سیمان، بال کلی و میکروسیلیس بر حسب  $kg/m^3$  می باشد.

جدول ۲: جزئیات کامل طرح های اختلاط (SF = Silica Fume; BA = Ball Clay)

شماره طرح	نحوه نمایش طرح در نمودارها	W/C	مواد و مصالح استفاده شده در مخلوط های بتنی (kg/m <sup>3</sup> )						
			آب	سیمان	میکروسیلیس	بال کلی	ریزدانه	درشت دانه	فوق روان کننده
Mix 1	SF0BA0	۰/۴	160	400	0	0	1288	552	1/62
Mix 2	SF7BA0	۰/۴	160	372	28	0	1288	552	1/8
Mix 3	SF7BA10	۰/۴	160	332	28	40	1288	552	2/21
Mix 4	SF7BA20	۰/۴	160	292	28	80	1288	552	2/65
Mix 5	SF0BA0	۰/۴۵	180	400	0	0	1274	546	1/21
Mix 6	SF7BA0	۰/۴۵	180	372	28	0	1274	546	1/21
Mix 7	SF7BA10	۰/۴۵	180	332	28	40	1274	546	1/62
Mix 8	SF7BA20	۰/۴۵	180	292	28	80	1274	546	2/21

#### ۴- ساخت و نگهداری نمونه ها و آزمایش ها

در این تحقیق از قالب های مکعبی با ابعاد 10cm برای ساخت نمونه های آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. پس از ساخت هر طرح مخلوط بتن بلافاصله برای تعیین روانی بتن تازه، آزمایش اسلامپ انجام شد. در این تحقیق میزان فوق روان کننده به نحوی انتخاب شد تا میزان اسلامپ  $10 \pm 2$  سانتیمتر برای همه نمونه ها بدست آید. در صورت مناسب بودن اسلامپ (اسلامپ بین 80 تا 120 میلی متر است) بتن درون قالب ریخته می شد. پس از طی ۲۴ ساعت قالب ها باز شده و نمونه ها درون حوضچه آب به منظور عمل آوری تا سن ۷ و ۲۸ روزه قرار داده شده اند. در خصوص نمونه های ۹۰ روزه، این نمونه ها بعد از ۲۸ روز از آب خارج شده و تا رسیدن به سن ۹۰ روز در دمای محیط نگهداری شده اند. جهت کسب اطمینان از صحت نتایج تست های صورت گرفته و کاهش خطا، برای هر طرح اختلاط و برای هر سنی سه نمونه مکعبی ساخته شد.

#### ۵- نتایج آزمایش ها و تفسیر آنها

##### ۵-۱- مقاومت فشاری

در این تحقیق آزمایشگاهی، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر و پس از ۱۴ و ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. نتایج مربوط به این آزمایش برای سنین مختلف در نمودارهای ۱ و ۲ و ۳ آورده شده است. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود در تمام نسبت های آب به مواد سیمانی، جایگزینی سیمان با ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد بال کلی سبب بهبود مقاومت فشاری شده است. نقش پوزولان های بال کلی و میکروسیلیس از دو جهت مهم است، یکی واکنش های پوزولانی و تشکیل ژل سیلیکاتی که منجر به بهبود ساختار حفرات، کاهش تخلخل و افزایش استحکام ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان می شود و دیگری نقش پرکنندگی این پوزولان ها که به دلیل ریزی بالا می توانند به عنوان پرکننده عمل کرده و حفرات ریز موجود در ساختار بتن را پر نمایند. در مورد پوزولان طبیعی بال کلی تاثیر عامل اول به کندی و با افزایش سن آشکار می شود. با حضور پوزولان فعال میکروسیلیس در کنار بال کلی، دانه های هیدراته نشده بال کلی نیز می تواند وارد عمل شده و در تحمل بار نقش داشته باشند.

با مقایسه طرح‌های SF7BA0 با طرح‌های SF7BA10 در تمام نسبت‌های آب به مواد سیمانی مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و 10 درصد بال‌کلی از مقاومت فشاری طرح‌های حاوی فقط ۷ درصد میکروسیلیس بیشتر شده است. بهبود مقاومت فشاری بتن با مشارکت بال‌کلی می‌تواند ناشی از بهبود در ریزساختار ناحیه انتقال در مجاورت بال‌کلی و همچنین نقش میکروفیبرهای بال‌کلی باشد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، به طور کلی مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتنی با افزایش سن افزایش پیدا می‌کند که این نشان از پیشرفت و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی نمونه‌ها با افزایش سن دارد، در نتیجه با تشکیل ژل سیلیکاتی بیشتر ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری شده است.

مقایسه طرح‌های حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد بال‌کلی با طرح‌های حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد بال‌کلی نشان می‌دهد افزایش سطح جایگزینی بال‌کلی از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد وزن مواد سیمانی سبب افت مقاومت فشاری شده است. این کاهش مقاومت به خاطر بالا بودن میزان جایگزینی سیمان در طرح حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد بال‌کلی است که سبب افزایش میزان دانه‌های هیدراته نشده بال‌کلی در این طرح می‌شود. این کاهش در سنین ۱۴ و ۲۸ روز به خوبی مشهود است ولی در سن ۹۰ روز با فعال شدن نقش پوزولانی بال‌کلی اندکی از این کاهش کاسته شده است.

با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقاومت فشاری در تمام سنین کاهش پیدا کرده است که این موضوع به دلیل افزایش میزان تخلخل در نسبت‌های آب به مواد سیمانی بالاتر است.



نمودار ۱: مقاومت فشاری کسب شده در سن ۱۴ روزه برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی



نمودار ۲: مقاومت فشاری کسب شده در سن ۲۸ روزه برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی



نمودار ۳: مقاومت فشاری کسب شده در سن ۹۰ روزه برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی

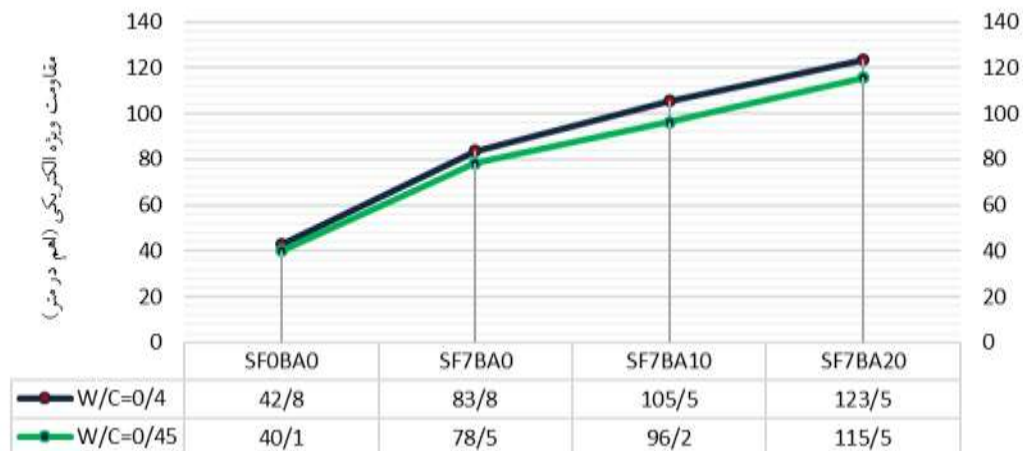
## ۵-۲- مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت ویژه الکتریکی بتن از مهم‌ترین پارامترهای مربوط به پیل خوردگی به شمار می‌رود. با بالا رفتن مقاومت ویژه الکتریکی از جریان خوردگی عبوری از مناطق آندی و کاتدی روی میلگرد کاسته می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند به عنوان یک وسیله سنجش غیر مستقیم برای بیان میزان توانایی بتن در مقابله با خوردگی بکار رود. در این تحقیق، آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ cm و در سن ۲۸ روز انجام گرفت.

همان‌طور که در نمودار شماره ۴ مشاهده می‌شود مقاومت ویژه الکتریکی تمام طرح‌های حاوی پوزولان از مقاومت ویژه الکتریکی نمونه شاهد بیشتر شده است. دلیل این موضوع این است که پوزولان‌ها به دلیل اثر پوزولانی و خواص فیزیکی که دارند بر ریز ساختار خمیر سیمان و تمرکز یون‌های محلول حفرات و بالاخره بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن اثرگذار هستند. در مورد طرح‌های فقط میکروسیلیس، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش داشته است. مهم‌ترین ویژگی میکروسیلیس اندازه فوق العاده ریز ذرات آن می‌باشد. ریزی بیش از حد آن باعث می‌شود فعالیت پوزولانی آن به شدت تسریع گردد. فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در جریان هیدراتاسیون سیمان موجب می‌شود کریستال‌های هیدروکسید کلسیم آزاد به

سیلیکات کلسیم هیدراته شده تبدیل شود، همچنین خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس باعث توزیع یکنواخت و همگن محصولات بدست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط می شود و نهایتاً ترکیب هر دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی میکروسیلیس سبب ب وجود آمدن جسمی متراکم و کم تخلخل می گردد.

همچنین نتایج نشان می دهد که استفاده از میکروسیلیس و بال کلی در کنار هم به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی را افزایش می دهد. دلیل این موضوع این است که ذرات میکروسیلیس و بال کلی ما بین ذرات درشت سیمان معمولی قرار گرفته و بر اثر هیدراتاسیون، فضای بین ذرات سیمان پر می گردد. که بیشترین مقاومت مربوط به طرح اختلاط شامل ۷ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد بال کلی است. این فرآیند باعث می شود که یک سری حفرات بسته در بتن بوجود آمده و مانع تبادل یون شود و در نتیجه هدایت الکتریکی بتن کاهش یافته و مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می یابد.



نمودار شماره ۴: مقاومت ویژه الکتریکی در سن ۲۸ روز برای نسبت های آب به مواد سیمانی مختلف

## ۶- نتیجه گیری

استفاده از ماده معدنی بال کلی به عنوان جایگزین سیمان در بتن موضوعی است که تا به حال مورد توجه نبوده و لذا برای اظهار نظر دقیق در مورد نقش این ماده در بتن به آزمایش های بیشتر، جایگزینی بال کلی با درصد های مختلف و انجام آزمایش در سنین بالاتر نیازمند می باشیم. همچنین در مورد استفاده میکروسیلیس و بال کلی در کنار هم در بتن اطلاعاتی در دست نیست و این موضوع نیز نیازمند تحقیقات گسترده برای کاربرد توام در بتن می باشد. بر اساس آزمایش های انجام شده روی نمونه های بتنی تا سن ۹۰ روز، می توان به نتایج زیر رسید:

استفاده از مواد سیمانی متشکل از سیمان پرتلند، میکروسیلیس و بال کلی سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی در بتن می شود. در تمام نسبت های آب به مواد سیمانی طرح هایی که در آنها ۷ درصدوزنی مواد سیمانی با میکروسیلیس و ۱۰ درصدوزنی مواد سیمانی با بال کلی جایگزین شده است مقاومت فشاری بهبود یافته است. این افزایش مقاومت به دلیل واکنش های پوزولانی میکروسیلیس و بال کلی و نیز نقش پرکنندگی میکروسیلیس و بال کلی می باشد. این در حالی است که افزایش سطح جایگزینی بال کلی از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد وزن مواد سیمانی سبب افت مقاومت فشاری شده است. علت این افت شرکت نکردن ذرات بال کلی در فرآیند هیدراتاسیون است.

در نمونه‌های حاوی فقط میکروسیلیس، با افزایش درصد آن، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش یافته و تاثیر این ماده در نسبت‌های کم آب به سیمان به حداکثر مقدار خود رسیده است. استفاده از میکروسیلیس و بال‌کلی در کنار هم به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد. دلیل این موضوع این است که ذرات میکروسیلیس و بال‌کلی ما بین ذرات درشت سیمان معمولی قرار گرفته و بر اثر هیدراتاسیون، فضای بین ذرات سیمان پر می‌گردد. این فرآیند باعث می‌شود که یک سری حفرات بسته در بتن به وجود آمده و مانع تبادل یون شود و در نتیجه هدایت الکتریکی بتن کاهش یافته و مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد.

## ۷- مراجع

- [1] Gartner, E. 2004. *Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements*. Cement and Concrete Research 34:1489-98.
- [۲] وزین رام، فرشاد، محمد مهدی، خداپرست. ۱۳۸۸. بتن و اصلاح الگوی مصرف با رویکرد به مصالح زیست محیطی. سومین همایش ملی آب و فاضلاب. تهران.
- [3] Abdul, A.L. and Arumairaj P.D. 2012. *Geopolymer concrete*. A Review, Volume 1, Issue 2, pp: 118-122.
- [4] Juenger M.C., Winnefeld G.F., Provis J.L. and Ideker J.H. 2011. *Advances in Alternative Cementitious Binders*, Cement and Concrete Research, 41:1232-124.
- [5] Dondi, M., Guarini, G. Raimondo, M., Salucci, F. 2003. *Influence of Mineralogy and Particle Size on the Technological Properties of Ball Clays for Porcelainized Stoneware Tiles*, Tile and Brick International, 2-11.
- [6] فصلنامه سرامیک و ساختمان، همه چیز در باره بال‌کلی‌ها، <http://www.ceramic-sakhteman.com/forum.php?action=vthread&forum=۲۷&topic=> (دسترسی در ۱۳۹۳/۷/۲۰).
- [7] Rao R.A.K. and Kashifuddin, M. 2012. *Adsorption studies of Cd (II) on ball clay: Comparison with other natural clays*. Arabian Journal of Chemistry, doi:10.1016/j.arabjc.2012.01.010.
- [8] Detwiler R. J., Bhatti J.I. and Bhattacharja S. 1998. *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements*, Portland Cement Association, Research and development bulletin RD112T.
- [9] Kjellsen K.O., Wallevik, O.H. and Hallgren, M. 1999. *On the compressive strength development of high performance concrete and paste - effect of silica fume*, Materials and Structures, 32: 63-69.
- [۱۰] Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability . 2004. Designati on: FM 5-578.
- [11] Vassie, P. R.1980. *A survey of site test for assessment of corrosion in reinforced concrete*. RRL Report. 953. Department of Environment Publication.
- [12] Berke, N.S., Scali, M.J., Regan, J.C., and Shen, D.F. 1991. "Long-Term Corrosion Resistance of Steel in Silica Fume and/or Fly Ash Containing Concretes," Proceedings, Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills. 126, PP 393 -415.
- [13] Wolsiefer, J.T. 1991. "Silica Fume Concrete: a Solution to Steel Reinforcement Corrosion in Concrete," Proceedings, Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, 126, PP 527 - 553.