

بررسی تأثیر سرباره، نانو اکسید منیزیم و نانو اکسید مس بر خصوصیات بتن فوق توانمند تحت شرایط عمل آوری متفاوت با بهره‌گیری از روش پایش مقاومت الکتریکی

سید شایان هاشمی

گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

احمد گنجعلی*

گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

ابوذر میرزاخانی

گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

حمیدرضا ایرانی

گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده

بتن در طول مدت سرویس‌دهی ممکن است در تماس با شرایط محیطی سخت قرار گیرد، بتن‌های فوق‌توانمند (UHPC) با توجه به مقاومت و دوام بی‌نظیر می‌توانند به‌عنوان یک گزینه مناسب مطرح شوند. در این مطالعه برای نخستین بار تأثیر نانو ذرات اکسید منیزیم و اکسید مس با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲٪ به‌صورت مجزا و ترکیب با مقادیر مختلف سرباره کوره آهن‌گدازی (۲/۵، ۵ و ۱۰٪) بر مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی UHPC حاوی مقدار ثابت الیاف PVA در دو حالت عمل آوری استاندارد و تسریع شده (غوطه‌ور در آب با دمای ۹۵ درجه سانتیگراد) برای سنین مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین برای درک بهتر ریز ساختار بتن، آنالیز پراش اشعه ایکس SEM بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد با بهره‌گیری از روش عمل آوری حرارتی و اصلاح ریز ساختار در حضور این نانو مواد جدید می‌توان ظرفیت بیشتری از UHPC در مشخصه‌های مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی ایجاد نمود. در طی این پژوهش بعد از ۹۰ روز برای هر یک از نمونه‌های حاوی ۱٪ نانو مواد اکسید منیزیم و اکسید مس به ترتیب رشد مقاومت فشاری به میزان تقریبی ۳۷/۴٪ و ۳۷/۱٪ نسبت به نمونه ۷ روزه حاصل گردید. در حالی که رشد مقاومت فشاری در حالت تسریع شده برای نمونه‌های مذکور به ترتیب به میزان ۱۶/۸٪ و ۱۸/۸٪ نسبت به حالت عمل آوری استاندارد، بیشتر بوده است. همچنین با دستیابی به روابط تجربی دقیق بین دو پارامتر مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی یک روش غیر مخرب جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن فوق توانمند UHPC، سرباره کوره آهن‌گدازی، الیاف PVA، UHPC و نانو ذرات MgO، UHPC و نانو ذرات Cu₂O، مقاومت فشاری و الکتریکی UHPC.

* نویسنده مسئول: ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir

۱- مقدمه

دارای خصوصیات دوام بالا، تخلخل بسیار کم، چگالی بسته‌بندی بالا و نفوذپذیری کم می‌باشند. مزایای استفاده از بتن فوق توانمند را می‌توان سرعت ساخت، بهبود دوام (مقاوم در معرض حرارت بالا، حملات شیمیایی، نفوذ یون کلر، سیکل‌های یخ-ذوب)، کاهش هزینه مربوط به تعمیرات، کاهش اندازه المان‌های بتنی و افزایش دوام و طول عمر سازه بر شمرده. مفهوم بتن های فوق توانمند برای اولین بار توسط لارارد^۱ پیشنهاد گردید که امروزه به‌عنوان ترکیبات سیمانی شناخته می‌شوند [۱۰]. از طرفی امروزه تمایل به کارگیری از نانو ذرات در ساخت بتن فوق توانمند در حال افزایش است. نتایج یافته‌ها نشان داده است که با افزودن نانو ذرات تخلخل بتن کاهش یافته و عمل هیدراتاسیون سیمان به دلیل اثر کاشت نانو ذرات تسریع می‌شود و بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام به دلیل واکنش‌پذیری بالا و اثر پرکنندگی ذرات نانو میسر می‌گردد. یو و همکاران^۲ اثری از افزودن نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی و توسعه ریز ساختار بتن UHPC را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد به دلیل مقادیر بالای فوق روان‌کننده در تولید UHPC هیدراتاسیون سیمان به تأخیر می‌افتد اما حضور نانو سیلیس می‌تواند این اثر تأخیری را جبران نماید، همچنین یک مقدار بهینه از نانو سیلیس می‌تواند کمترین تخلخل را ایجاد نماید [۱۱]. وو و همکاران^۳ اثری از مواد سیمانی کمکی SCMs^۴ (سرباره و خاکستر بادی و ترکیبی از آن‌ها) و نانو ذرات (نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس) بر روی خصوصیات مکانیکی، دینامیکی و استاتیکی ماتریس UHPC حاوی ۲۰٪ دوده سیلیس و ۲٪ الیاف فولادی را بررسی نمودند. نتایج نشان داده بود که ترکیب ۲۰٪ دوده سیلیس با هر نوع SCMs یا نانو ذرات منجر به بهبود پیوند الیاف-ماتریس و خصوصیات مکانیکی UHPC گردیده است [۱۲]. چانپینگ و همکاران مقاومت مکانیکی و دوام UHPC حاوی محتوای مختلف نانو اکسید تیتانیوم را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که محتوای ۱٪ ذرات نانو تیتانیوم بهترین خصوصیات مکانیکی را به همراه دارد، درحالی‌که مقادیر بیش از حد اثر منفی داشته است. همچنین انقباض خشک، مقاومت در برابر نفوذ کلر، مقاومت یخ-ذوب و ریز ساختار منفذ در حضور نانو ذرات تیتانیوم

بتن به صورت گسترده در انواع مختلفی از سازه‌های مهندسی استفاده می‌گردد. بتن معمولی با توجه به مقاومت فشاری محدود، محدودیت قابل توجهی برای برآورده نمودن نیازهای مقاومتی و دوام به همراه داشته است. نبود مصالح مناسب برای کاربردهای خاص و شرایط محیطی سخت مهندسان را به تلاش برای دستیابی به مصالح ساخت با مقاومت، دوام و سختی بالا ترغیب نموده است. بتن فوق توانمند UHPC^۱ یک نوع جدید از بتن با خصوصیات مکانیکی و دوام منحصر به فرد محسوب می‌شود. اختلاف بین بتن فوق توانمند و بتن معمولی را می‌توان در چگالی بیشتر بتن های فوق توانمند معرفی نمود که می‌توان به حذف درشت دانه و توزیع ذرات ریز در ساختار بتن برای پر کردن فضاهای خالی بین ذرات درشت تر منسوب دانست [۱ و ۲]. بتن فوق توانمند همگن تر از بتن معمولی بوده و تحت عوامل خارجی اختلاف مقاومت اندکی بین ماتریس بتن و ریزدانه وجود دارد. بتن‌های معمولی دارای مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال، در حالی‌که مقاومت فشاری بتن فوق توانمند بین ۱۲۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشد [۳ و ۴]. تعاریف مختلفی از بتن توانمند در یافته‌های محققین ارائه شده است که در بیشتر موارد نسبت آب به مواد چسباننده کم، محتوای بالای سیمان پرتلند، مواد سیمانی کمکی معدنی، افزودنی‌های شیمیایی و ذرات ریز ماسه (ماسه سیلیسی و کوارتز) از ترکیبات اصلی این نوع بتن محسوب می‌گردد [۵ و ۶]. این ویژگی منحصر به فرد استفاده از بتن‌های فوق توانمند را در ساخت ساختمان‌های بلند مرتبه و پل‌ها با دهانه‌های طویل امکان‌پذیر ساخته است. عموماً دوده سیلیس به‌عنوان یک جز جداناپذیر در ترکیب مواد سیمانی بتن‌های فوق توانمند محسوب می‌شود و استفاده از آن در محدوده ۱۰ تا ۳۰ درصد جرم سیمان محدود شده است [۷]. دوده سیلیس یک محصول فرعی در تولید فلز سیلیسیم و آلیاژهای فروسیلیس به دست می‌آید [۸]. استفاده از دوده سیلیس به عنوان جایگزینی سیمان به دلیل کاهش گاز دی‌اکسید کربن (فاکتور اصلی پدیده گرمایش جهانی) به تولید UHPC دوستدار محیط زیست منجر می‌گردد [۹]. علاوه بر مقاومت فشاری بالا، بتن‌های فوق توانمند

⁴ Wu et al

⁵Supplementary Cementitious Materials

¹ Ultra High Performance Concrete

² Larrard

³ Yu et al

PVA² با وزن مخصوص ۱/۳۰، طول ۶ میلی متر، قطر ۱۳ میکرومتر و مدول ارتجاعی ۲۹/۵ گیگاپاسکال در این مطالعه استفاده گردیده است. مشخصات مربوط به مواد سیمانی و همچنین مشخصات مربوط به نانو مواد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان، دوده سیلیس و سرباره

Component	Portland cement (Wt. %)	Blast furnace slag (Wt. %)	Silica fume (Wt. %)	Nano-Cu ₂ O	Nano-MgO
CaO	۶۴/۳۸	۴۶/۸۵	۱/۸۷	۱/۳	۱/۴
SiO ₂	۲۱/۰۸	۳۰/۳۶	۸۹/۲۲	۱۴/۸	۱۴/۹
Al ₂ O ₃	۵/۳۶	۷/۶۹	۱/۲	۰/۹۸	۱/۲
Fe ₂ O ₃	۳/۶۴	۰/۴۰	۲/۱۲	۸۰	۷۸
SO ₃	۱/۶۷	۰/۹۷	-	۰/۱۶	۰/۱۸
MgO	۰/۸	۵/۸۰	۱/۶۱	۰/۷	۰/۹
Na ₂ O	۰/۵	۰/۶۰	۰/۵۵۶	۰/۱۳	۰/۱۶
K ₂ O	۰/۸۲	۰/۸۰	۱/۰۵۶	۰/۰۳	۰/۴
TiO ₂	-	۱/۲۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۸	۱/۲
MnO	-	۰/۹۹	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	۰/۷۹	۰/۸۵
L.O.I	۰/۹	۰/۰۲	۲/۶	۰/۲۴	۰/۳

۲-۲- نسبت های مخلوط

در این مطالعه ۱۴ طرح مخلوط ارائه شده است. طرح های مخلوط در چهار گروه کلی طبقه بندی می شوند. گروه اول (فاقد ذرات نانو) و گروه چهارم (حاوی توام سرباره و ۱٪ ذرات نانو) شامل ۴ طرح مخلوط می باشد، در حالی که گروه دوم (حاوی نانو اکسید منیزیم) و گروه سوم (حاوی نانو اکسید مس) هر یک شامل ۳ طرح مخلوط می باشند. همه طرح ها دارای نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ۰/۱۶ و عیار مواد سیمانی ۱۰۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حاوی ۲۰٪ مواد کمکی سیمانی می باشند که به صورت وزنی جایگزین سیمان شده اند. اولین طرح از گروه اول به عنوان طرح شاهد معرفی شده است که حاوی ۲۰٪ دوده سیلیس و فاقد هر گونه سرباره و ذرات نانو بوده است. مشخصات مربوط به هر طرح مخلوط بر حسب کیلوگرم در متر مکعب در جدول (۲) ارائه شده است.

نسبت به نمونه کنترل بهبود یافته بود [۱۳]. هوانگ و همکاران^۱ اثری از نانو لوله کربن و نانو صفحه گرافیت (۰-۰/۳٪) بر روی ساختار و خصوصیات نانو مکانیکی ملات UHPC را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۳٪ از نانو لوله کربن یا نانو صفحه گرافیت منجر به افزایش ۲۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری ملات UHPC بدون الیاف و حاوی الیاف نسبت به ملات بدون نانو مواد گردیده است [۱۴] با توجه به مطالعات انجام شده بر روی UHPC بدیهی است که محققان همواره با استفاده از روش های مختلف عمل آوری و نانو ذرات سعی در ارتقا عملکرد و کیفیت UHPC برای کاربرهای خاص و ویژه داشته اند، اما با توجه به یکسان نبودن اثرات عوامل ذکر شده بر روی عملکرد و ریز ساختار بتن، استفاده از روش عمل آوری تسریع شده و معرفی نانو ذرات جدید می تواند توانمندی های جدیدتری از UHPC آشکار سازد.

۲- بر نامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

ماسه مورد استفاده از نوع ماسه سیلیسی با وزن مخصوص ۲/۶۳ و با دانه بندی حداکثر ۰/۶ میلی متر استفاده گردید. سیمان مورد استفاده سیمان دیلمان تپ ۲ با وزن مخصوص ۳/۱۵ بوده است. دوده سیلیس به صورت پودر خاکستری رنگ با ساختار آمورف، مطابق توضیحات کاتالوگ شرکت تولید کننده با وزن مخصوص ۲/۶، اندازه ذرات کوچکتر از ۴ میکرومتر و رطوبت ۰/۰۱ از شرکت فروسیلیس ایران (Iran Ferrosilice Co) تهیه شده است. فوق روان کننده نسل سوم با نام تجاری FARCO PLAST P9-3R بر پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۰۵ ± ۰/۰۲ در دمای C ۲۰^o از شرکت شیمی ساختمان و نیز سرباره از شرکت بنا بنیان همدان با وزن مخصوص ۲/۸۵ تهیه شده است. نانو اکسید منیزیم به صورت پودر سفید با وزن مخصوص ۳/۵۸ و جرم مولکولی ۴۰/۳ کیلوگرم بر مول به صورت کروی با اندازه ذرات ۱۰۰-۲۰۰ نانومتر و نانو اکسید مس Cu₂O به صورت محلول نارنجی رنگ با وزن مخصوص ۶/۴ و جرم مولکولی ۱۴۳/۰۹ کیلوگرم بر مول و اندازه ذرات ۱۰۰-۵۰ نانومتر از شرکت آرمین نانو تهیه گردیده است. همچنین از میکرو الیاف

² polyvinyl alcohol

¹ Huang et al

جدول ۲- مشخصات طرح ها بر حسب کیلوگرم برای یک متر مکعب

Mix Code	Silica Sand (Kg/m ³)	Cement (Kg/m ³)	Silica Fume (Kg/m ³)	GBFS (Kg/m ³)	Nano-Mgo (Kg/m ³)	Nano-Cu (Kg/m ³)	Water (Kg/m ³)	S.P. (Kg/m ³)
C	۱۲۰۰	۸۴۸	۲۱۲/۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL2.5	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۸۵/۵	۲۶/۵	۰٫۰	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL5	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۵۹/۰	۵۳/۰	۰٫۰	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL10	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۰۶/۰	۱۰۶/۰	۰٫۰	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
Mg5	۱۲۰۰	۸۴۸	۲۰۶/۷	۰٫۰	۵/۳	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
MG10	۱۲۰۰	۸۴۸	۲۰۱/۴	۰٫۰	۱۰/۶	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
MG20	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۹۰/۸	۰٫۰	۲۱/۲	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
CU5	۱۲۰۰	۸۴۸	۲۰۶/۷	۰٫۰	۰٫۰	۵/۳	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
CU10	۱۲۰۰	۸۴۸	۲۰۱/۴	۰٫۰	۰٫۰	۱۰/۶	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
CU20	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۹۰/۸	۰٫۰	۰٫۰	۲۱/۲	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL25MG10	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۷۴/۹	۲۶/۵	۱۰/۶	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL50MG10	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۴۸/۴	۵۳/۰	۱۰/۶	۰٫۰	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL25CU10	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۷۴/۹	۲۶/۵	۰٫۰	۱۰/۶	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸
SL50CU10	۱۲۰۰	۸۴۸	۱۴۸/۴	۵۳/۰	۰٫۰	۱۰/۶	۱۶۹/۶۰	۱۳/۷۸

اساس استاندارد ASTM C109/C109M در سنین مختلف انجام گرفت [۱۵]. سرعت بارگذاری را با سرعت نسبی حداکثر بین صفحات بالایی و پایینی مطابق با بارگذاری روی نمونه ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن بر ثانیه تنظیم گردید.



شکل ۱- میکسر مخلوط‌های غلیظ و روند تهیه نمونه‌های پژوهش

۲-۳-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی

این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO TP95 بر روی نمونه‌ها $75 \times 75 \times 75$ mm در دو حالت عمل آوری استاندارد و تسریع شده انجام گرفت [۱۶]. آزمایش مقاومت الکتریکی به روش چهار الکترودی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. جهت انجام این آزمایش، چهار الکترود مسی روکش دار به وسیله سیم مغناطیس به قطر $0/8$ میلی‌متر با روکش PAI تا عمق $3/8$ سانتیمتر در نمونه‌های مکعبی با فواصل مشخص از یکدیگر دفن شدند (شکل ۲). همچنین ولتاژ DC اعمال شده به میزان ۳۰ ولت جهت برقراری

۲-۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها و روش های آزمایش

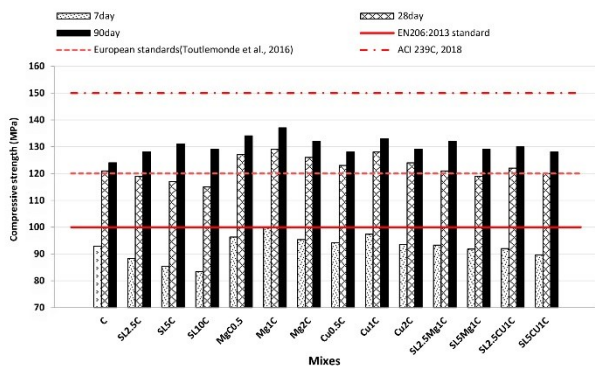
برای تهیه مخلوط‌های بتن ابتدا ترکیبات خشک شامل مواد سیمانی (دوده سیلیس، سرباره و یا هر دو)، ماسه و نانو ذرات به آرامی و با سرعت کم (۲۵ دور در دقیقه) به صورت خشک در میکسر ویژه مخلوط‌های غلیظ (همچون بتن‌های حاوی الیاف و فوق توانمند) با ظرفیت ۱۵ لیتر با یکدیگر مخلوط شدند. سپس آب به همراه فوق روان کننده که از قبل با یکدیگر مخلوط شده بودند به مصالح داخل میکسر اضافه شدند و به مدت ۶ دقیقه با سرعت کم و یک دقیقه با سرعت بالا (۷۰ دور در دقیقه) با یکدیگر مخلوط شدند. سپس الیاف PVA به مخلوط افزوده شد و عمل اختلاط برای توزیع یکنواخت الیاف در تمام مخلوط با سرعت کم برای مدت ۶ دقیقه دیگر ادامه یافت. پس از قالب‌برداری نمونه‌ها برای سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شرایط عمل آوری استاندارد (غوطه ور در محلول آب و آهک) و همچنین برای سنین ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۷۲ ساعت به روش تسریع شده (غوطه ور در آب گرم با دمای 95°C) نگهداری شدند.

۲-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه مکعبی $50 \times 50 \times 50$ mm بر

بررسی تأثیر سرباره، نانو اکسید منیزیم و نانو اکسید مس بر ...

این واقعیت است که محتوای ۲٪ نانوذرات نیز منجر به بهبود مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. با افزودن محتوای نانو اکسید مس در گروه سوم نیز روند تغییرات مقاومت فشاری مشابه با گروه دوم، ابتدا افزایشی و سپس کاهش‌ی بوده است. تمام مخلوط‌های گروه چهارم نسبت به نمونه شاهد مقاومت فشاری کمتری را ارائه نموده‌اند.



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف برای عمل آوری استاندارد

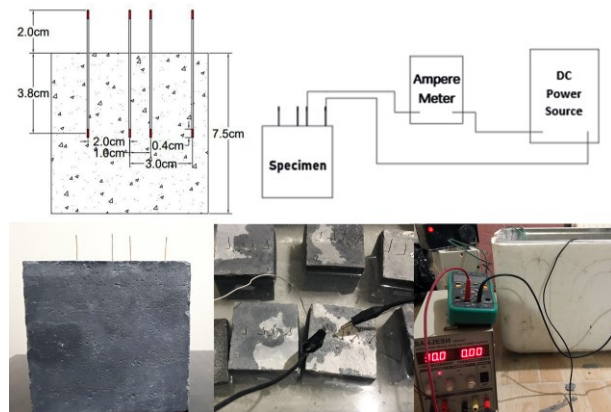
همان‌طور که مشاهده می‌گردد با گذشت ۲۸ روز نیز روند تغییرات مقاومت فشاری برای تمامی مخلوط‌ها مشابه تغییرات مقاومت فشاری در سن ۷ روزه است اما بخشی از کاهش مقاومت فشاری با گذشت زمان و افزایش سن بتن جبران می‌گردد، به طوری که بعد از ۲۸ روز عمل آوری استاندارد، میزان کاهش مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ سرباره به ۵٪ رسیده است.

بر اساس نمودار مربوط به مقاومت فشاری ۹۰ روزه مشاهده می‌گردد که روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های گروه اول کاملاً نسبت به سنین ۷ و ۲۸ روزه متفاوت بوده است، به طوری که نمونه‌های حاوی ۲/۵٪، ۵٪ و ۱۰٪ سرباره به ترتیب ۳/۲٪، ۵/۶٪ و ۴٪ مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن شاهد نشان دادند. با نگاهی کلی به تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سنین مختلف می‌توان دریافت که ازدیاد مقاومت فشاری حاصل از حضور نانو اکسید منیزیم به مراتب بیشتر از نانو اکسید مس می‌باشد. سود بیشتر مقاومت فشاری در حضور نانو اکسید منیزیم را می‌توان به جذب آب آزاد واکنش هیدراتاسیون توسط ذرات نانو اکسید منیزیم منسوب دانست که بر فرایند

جریان الکتریکی به مدت ۵ ثانیه استفاده شد. جریان برقرار شده توسط یک آمپر متر بر حسب میلی آمپر خوانده شده و توسط رابطه (۱) مقاومت الکتریکی محاسبه گردید:

$$\rho = \frac{2\pi \times A \times V}{I} \quad (1)$$

که در آن ρ مقاومت الکتریکی، A فاصله بین الکترودهای داخلی، V ولتاژ بر حسب ولت و I جریان بر حسب آمپر می‌باشد.



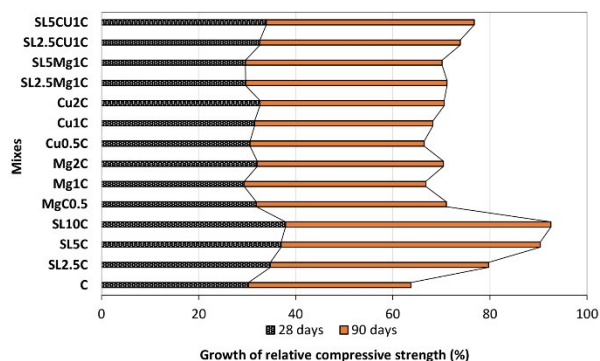
شکل ۲- نحوه قرارگیری الکترودها در نمونه تحت آزمایش مقاومت الکتریکی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

در شکل (۳) تغییرات مقاومت فشاری برای همه مخلوط‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در سن ۷ روزه با افزایش سرباره از ۲/۵ تا ۱۰٪ مقاومت فشاری روند کاهش‌ی داشته است به طوری که در گروه اول بیشترین کاهش مقاومت فشاری با افزودن ۱۰٪ سرباره به میزان ۱۰٪ نسبت به بتن شاهد حاصل گردید. کاهش مقاومت در سنین اولیه در نمونه‌های حاوی سرباره ناشی از ناحیه انتقالی ضعیف ITZ^۱ به دلیل واکنش پوزولانی آهسته سرباره بوده است. برخی از مؤلفان کاهش ۱۸/۱-۴/۸٪ از مقاومت فشاری UHPC در حضور سرباره را در روزهای اولیه گزارش نموده‌اند [۱۷ و ۱۸]. با افزایش ذرات نانو منیزیم در گروه دوم ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس با افزایش بیشتر محتوای نانو اکسید منیزیم مقاومت فشاری روند کاهش داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اگرچه افزایش محتوای نانوذرات تا ۲٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ و ۱٪ گردیده است اما آن بیانگر

¹ Interfacial Transition Zone



شکل ۴- رشد مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روز

در شکل (۵) تغییرات مقاومت فشاری تمامی مخلوط‌ها در حالت عمل‌آوری تسریع شده برای ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲ ساعت و حدود مقاومت فشاری تعیین شده بر طبق استاندارد ACI و استاندارد اروپا ارائه شده است [۲۳ و ۲۲]. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در حالت عمل‌آوری تسریع شده بعد از ۲۴ ساعت تمامی مخلوط‌ها به جز نمونه حاوی ۱۰٪ سرباره در گروه اول، مقاومت فشاری بیشتر از ۱۲۰ مگاپاسکال را داشته‌اند و همچنین نمونه‌های حاوی ۱٪ و ۲٪ نانو اکسید منیزیم مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵۰ مگاپاسکال را تجربه نموده‌اند. بعد از ۳۶ ساعت عمل‌آوری تمامی مخلوط‌ها دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۱۲۰ مگاپاسکال بوده‌اند و روند تغییرات مشاهده شده در روش تسریع شده با افزایش محتوای سرباره و نانو ذرات مشابه با روند تغییرات مقاومت در حالت عمل‌آوری استاندارد بوده است. همچنین پس از گذشت ۴۸ ساعت تمامی مخلوط‌ها به غیر از مخلوط حاوی ۱۰٪ سرباره، مقاومت فشاری بالاتر از ۱۵۰ مگاپاسکال را داشته‌اند و در نهایت بعد از گذشت ۷۲ ساعت برای تمامی نمونه‌ها به جز نمونه شاهد مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵۰ مگاپاسکال ثبت گردید. در واقع مخلوط‌های مذکور بعد از ۳۶ و ۷۲ ساعت در روش تسریع شده به ترتیب به حدود قابل قبول برای پذیرش بتن به‌عنوان بتن فوق‌توانمند توسط استاندارد اروپا و ACI رسیده‌اند در حالت کلی می‌توان بیان نمود که شرایط عمل‌آوری بتن نقش اساسی در بهبود فرایند هیدراتاسیون و مقاومت داشته است. یافته‌های لی و همکاران نیز ثابت نمود که خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های حاوی نانو سیلیس تحت شرایط مختلف عمل‌آوری کاملاً متفاوت است، در دمای بالا نانو ذرات، دوده سیلیس و دیگر مواد در سیستم هیدراتاسیون فعالیت بالاتری داشته و واکنش بیشتر منجر به کسب

هیدراتاسیون تأثیر می‌گذارد [۱۸]. همچنین نمونه‌های حاوی ۵٪ سرباره مقاومت فشاری بالاتری نسبت به دو محتوای دیگر داشته‌اند. در همه سنین نمونه‌های حاوی ۱٪ نانو ذرات مقاومت فشاری بالاتری نسبت به درصد‌های دیگر داشته‌اند به‌طوری‌که با توجه به شکل نمونه‌های حاوی ۱٪ نانو اکسید منیزیم، بالاترین مقاومت فشاری را به میزان ۱۳۷ مگاپاسکال بعد از ۹۰ روز ارائه نمودند. بهبود مقاومت فشاری با افزودن ذرات نانو منسوب به هر دو خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات نانو می‌باشد. ذرات نانو به صورت یک پرکننده بسیار ریز با اثر هسته‌زایی خود منافذ را پر کرده و ساختار متراکم تری را ایجاد می‌نمایند [۱۹]، از طرفی به صورت شیمیایی با هیدروکسید کلسیم در واکنش پوزولانی مشارکت نموده و به تولید ژل هیدرات سیلیکات کلسیم منجر می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که افزودن ۱٪ نانو ذرات منیزیم و مس نسبت به دوزهای دیگر در افزایش مقاومت فشاری موثرتر است [۲۰]. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش نانو ذرات بیش از ۱٪ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد این تنزل به توزیع نامطلوب نانو ذرات در محتوای بالاتر منسوب می‌باشد که تجمع خوشه‌ای از ذرات نانو به‌عنوان نواحی ضعیف برای UHPC محسوب می‌گردند [۱۳ و ۲۱].

بر طبق استاندارد ACI [۲۲] بتن فوق‌توانمند به‌عنوان بتنی معرفی می‌شود که دارای حداقل مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال بعد از ۲۸ روز باشد اما برخی از استانداردهای اروپایی [۲۳] مقدار حداقلی برای پذیرش نمونه‌های بتن به‌عنوان بتن فوق‌توانمند را ۱۲۰ مگاپاسکال ذکر نموده‌اند، در حالی که استاندارد بریتانیا [۲۴] حداقل مقاومت فشاری برای پذیرش بتن به‌عنوان بتن فوق‌توانمند را ۱۰۰ مگاپاسکال معرفی نموده است.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقاومت فشاری تمامی مخلوط‌ها بعد از ۲۸ روز در محدوده بین پایین‌ترین و بالاترین حدود تعیین شده توسط استانداردهای مذکور یعنی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. در شکل (۴) مقاومت فشاری مخلوط‌ها برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به مقاومت فشاری ۷ روز نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌گردد مخلوط‌های حاوی سرباره رشد مقاومت بالاتری در سن ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به سایر طرح‌های فاقد سرباره داشته‌اند.

چنانچه مقاومت الکتریکی کمتر از $5/2 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ باشد، خطر نفوذ یون کلر و خوردگی در بتن بسیار بالا خواهد بود. این طبقه‌بندی بر مبنای مقاومت الکتریکی بتن در جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد تمامی نمونه‌ها UHPC در سن ۷ روزه دارای مقاومت الکتریکی بالاتر از $20 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ بوده‌اند که بیانگر نفوذ کم یون کلر بوده است همچنین این مخلوط‌ها در سن ۲۸ و ۹۰ روزه دارای مقاومت الکتریکی بالاتر از $\text{k}\Omega.\text{cm}$ بوده‌اند که نشان‌دهنده ناچیز بودن مقادیر نفوذ یون کلر است.

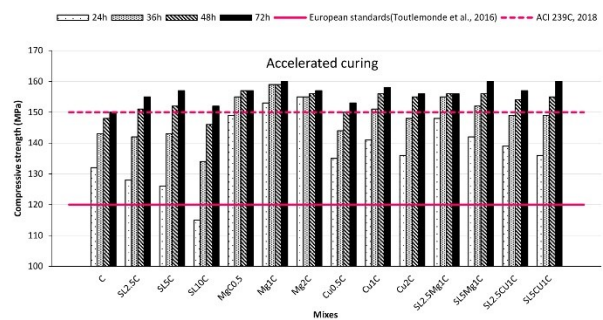
جدول ۳- شرایط نفوذپذیری بر اساس استاندارد ۱۲۰۲

ASTM [۳۰]

مقاومت الکتریکی ($\text{k}\Omega.\text{CM}$)	شرایط نفوذ یا خوردگی
کمتر از ۵/۲	بالا
۱۰/۴ - ۵/۲	متوسط
۲۰/۷ - ۱۰/۴	کم
۲۰۷ - ۲۰/۷	خیلی کم
بیشتر از ۲۰۷	ناچیز

همان طور که مشاهده می‌گردد با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۹۰ روز مقاومت الکتریکی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. مشابه با مقاومت فشاری، تغییرات مقاومت الکتریکی از ۷ تا ۲۸ و ۹۰ روز محسوس‌تر از تغییرات این پارامتر از ۲۸ تا ۹۰ روز بوده است. بعد از ۷ روز در گروه اول با افزایش سرباره $2/5$ ، 5 و 10% مقاومت الکتریکی به ترتیب $3/11$ ، $4/7$ ، $9/3$ ، $5/10$ ، $7/14$ و $2/10$ نانو اکسید منیزیم مقاومت الکتریکی به ترتیب $1/10$ ، $7/14$ و $2/10$ نانو اکسید مس به ترتیب $6/1$ ، $12/6$ و $7/4$ با افزودن $0/5$ ، 1 و 2% نانو اکسید منیزیم مقاومت الکتریکی به ترتیب $1/10$ ، $7/14$ و $2/10$ نانو اکسید مس به ترتیب $6/1$ ، $12/6$ و $7/4$ با افزودن $0/5$ ، 1 و 2% نانو اکسید منیزیم یا نانو اکسید مس به مخلوط‌های حاوی $2/5$ ، 5 و 10% سرباره، افزایش مقاومت الکتریکی $9/13$ و $7/8$ بوده است.

مقاومت بالاتر UHPC می‌گردد [۲۵]. همچنین پارک و همکاران نیز نشان دادند که عمل‌آوری حرارتی و افزایش حرارت از ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند رشد مقاومت فشاری UHPC در سنین مختلف را تحت تأثیر قرار دهد آنان همچنین نشان دادند که در یک دمای ثابت تغییرات مقاومت فشاری از ۲۴ تا ۴۸ ساعت در مقایسه با تغییرات مقاومت فشاری در بازه زمانی ۴۸ تا ۷۲ ساعت چشمگیرتر بوده است روندی که در این مطالعه نیز مشخص گردیده است [۲۶].

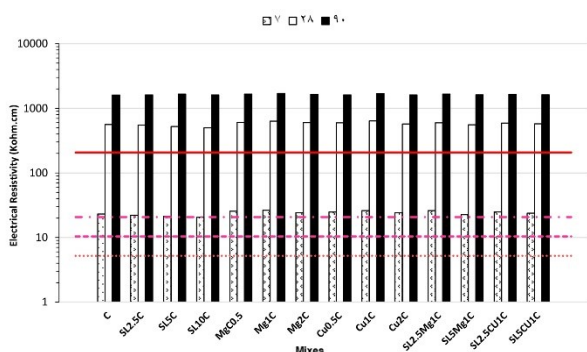


شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری حالت عمل‌آوری تسریع شده

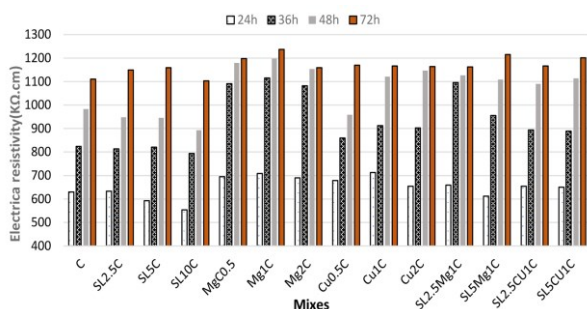
۳-۲- مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی یک مشخصه مهم دوام بتن برای مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی است که ممکن است مستقیماً بر میزان خوردگی تأثیر بگذارد. مقاومت الکتریکی همچنین با نفوذپذیری سیالات و نفوذ یون‌ها از طریق مواد متخلخل مانند بتن مرتبط است. بنابراین مقاومت الکتریکی می‌تواند به عنوان معیار غیر مستقیم برای ارزیابی توانایی بتن به نفوذ محلول‌های نمک کلرید که عامل خوردگی فولاد تلقی می‌شود، استفاده شود [۲۷]. در شکل ۶ و ۷ تغییرات مقاومت الکتریکی برای همه نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری استاندارد و عمل‌آوری تسریع شده نشان داده شده‌اند. مشابه با مقاومت فشاری با افزایش سرباره مقاومت الکتریکی کاهش و با افزایش محتوای ذرات نانو افزایش می‌یابد. با افزایش سن بتن نیز مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. افزایش سن بتن و حضور ذرات نانو منجر به بهبود ریز ساختار ماتریس سیمان، کاهش خلل و فرج، تراکم بهتر و بهبود ناحیه انتقالی می‌گردد بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده بر اساس استاندارد ۱۲۰۲ ASTM شرایط نفوذ یون کلر یا خوردگی بر مبنای مقاومت الکتریکی بتن بیان شده است [۲۸ و ۲۹].

آوری استاندارد کمتر بوده است. همانطور که بیان گردید، روش عمل آوری و سن بتن دو عامل تأثیر گذار بر مقاومت الکتریکی محسوب می شوند به نظر می رسد که سن بتن نسبت به روش عمل آوری پارامتر تأثیر گذارتری بر روی تغییرات مقاومت الکتریکی بوده است.



شکل ۶- تغییرات مقاومت الکتریکی در حالت عمل آوری استاندارد



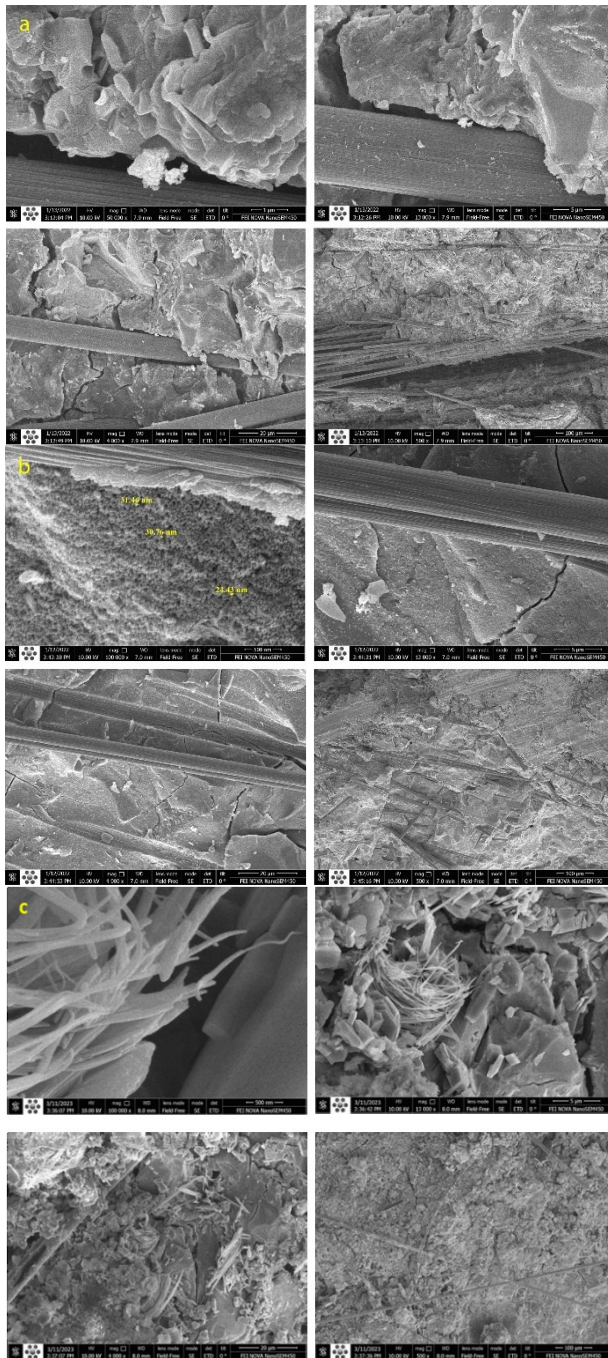
شکل ۷- تغییرات مقاومت الکتریکی در حالت عمل آوری تسریع شده

در شکل های ۸ و ۹ رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی برای زمان های مختلف عمل آوری با یک رابطه خطی رگرسیون بیان شده است. برای بالا بردن اعتبار روابط فوق از تعداد متعددی نمونه استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی نیز افزایش می یابد. با توجه به ضریب همبستگی R^2 رابطه خطی در نظر گرفته شده برای هر دو حالت عمل آوری از دقت بالایی برخوردار بوده است. به طوری که بیشترین مقدار R^2 به میزان ۰/۸۷ بعد از ۴۸ ساعت عمل آوری در حالت تسریع شده حاصل گردیده است. این رابطه کمک می کند که با توجه به آزمایش غیر مخرب مقاومت الکتریکی تخمین خوبی از مقاومت فشاری نمونه ها در شرایط مختلف عمل آوری حاصل شود.

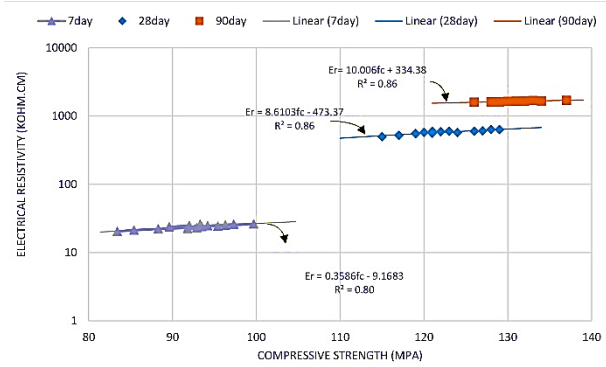
در نهایت با افزودن همین مقادیر نانو ذرات در مخلوط های حاوی ۵٪ سرباره، افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به بتن شاهد به ترتیب ۱/۷ و ۴/۳٪ بوده است. همان طور که مشاهده می گردد در گروه دوم و سوم بیشترین مقاومت الکتریکی برای نمونه های حاوی ۱٪ نانو ذرات منیزیم حاصل گردید به طوری که نمونه های حاوی ۱٪ نانو ذرات اکسید منیزیم در گروه دوم، بیشترین مقاومت الکتریکی را در بین همه مخلوط ها داشته اند. بعد از ۲۸ روز با افزایش سرباره تا ۱۰٪ مقاومت الکتریکی ۱۰٪/۹ کاهش داشته است. در گروه دوم و سوم با افزودن ۱٪ نانو اکسید منیزیم و ۱٪ نانو اکسید مس، مقاومت الکتریکی به ترتیب به میزان ۱۳/۲٪ و ۱۳/۶٪ افزایش داشته اند. همچنین در گروه چهارم نیز با افزودن ۱٪ نانو اکسید منیزیم یا نانو اکسید مس به مخلوط های حاوی ۲/۵٪ سرباره، مقاومت الکتریکی به ترتیب ۶/۸ و ۵/۷٪ افزایش داشته اند. همچنین با افزودن ۱٪ نانو اکسید منیزیم یا نانو اکسید مس به مخلوط های حاوی ۵٪ سرباره، رشد مقاومت الکتریکی به ترتیب ۲/۹٪ و ۱/۱٪ بوده است. با گذشت ۹۰ روز، تغییرات مقاومت الکتریکی برای گروه اول نیز روند افزایشی بوده است اما برای تمامی گروه ها افزایش چشمگیری نسبت به نمونه شاهد مشاهده نگردید، به طوری که بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی در گروه اول به میزان ۳/۶٪ برای نمونه های حاوی ۵٪ سرباره، در گروه دوم به میزان ۶/۲٪ برای نمونه های حاوی ۱٪ نانو اکسید منیزیم، در گروه سوم به میزان ۵/۷٪ برای نمونه های حاوی ۱٪ نانو اکسید مس و در گروه چهارم به میزان ۳/۸۵٪ برای نمونه های حاوی ۲/۵٪ سرباره و ۱٪ نانو اکسید منیزیم حاصل گردید. با گذشت سن بتن تا ۲۸ روز مقاومت الکتریکی مخلوط ها نسبت به سن ۷ روز، در حدود ۲۳ تا ۲۵ برابر شده است در حالی که با گذشت ۹۰ روز مقاومت الکتریکی مخلوط ها به طور چشمگیری افزایش یافته و به طور تقریبی ۶۴ تا ۷۸ برابر گردیده است. در عمل آوری تسریع شده نیز تغییرات با افزایش سرباره و نانو اکسید منیزیم مشابه با عمل آوری استاندارد بوده است، به طوری که بیشترین مقاومت الکتریکی بعد از ۷۲ ساعت برای نمونه های فاقد سرباره و حاوی ۱٪ نانو اکسید منیزیم حاصل گردید که نسبت به نمونه شاهد تقریباً ۱۱/۵٪ افزایش داشته است. با این تفاوت که در حالت تسریع شده مقادیر مقاومت الکتریکی نسبت به عمل

بررسی تأثیر سرباره، نانو اکسید منیزیم و نانو اکسید مس بر ...

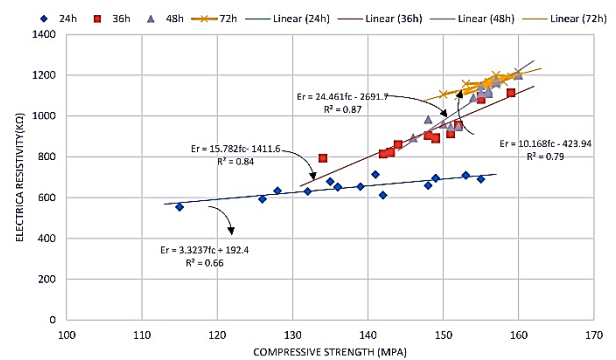
پیرامون الیاف در نمونه شاهد عرض و وسعت بیشتری نسبت به نمونه های حاوی نانو اکسید مس و نانو اکسید منیزیم داشته است اما در حضور نانو ذرات تراکم بالاتری از نمونه ها به دلیل تشکیل سریع ژل C-S-H را می توان مشاهده نمود، به طوری که برای نمونه حاوی ۲/۵٪ سرباره و ۱٪ نانو اکسید منیزیم، عرض ترک نسبت به دو نمونه دیگر بسیار محدود بوده است [۳۲].



شکل ۱۰ - آنالیز پراش ایکس SEM برای (a) نمونه شاهد، (b) نمونه طرح CU10 و (c) نمونه طرح Mg10



شکل ۸- رابطه مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی عمل آوری استاندارد



شکل ۹- رابطه مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی عمل آوری تسریع شده

۳-۳- آنالیز پراش ایکس

در شکل ۱۰ آنالیز SEM از (a) نمونه شاهد، (b) نمونه حاوی ۲/۵٪ سرباره و ۱٪ نانو اکسید مس و (c) نمونه حاوی ۲/۵٪ سرباره و ۱٪ نانو اکسید منیزیم به ترتیب بعد از ۹۰ روز عمل آوری استاندارد ارائه شده است. تجزیه تحلیل مورفولوژی ریز ساختار بتن تفاوت چشمگیری در شکل و بافت محصولات مختلف واکنش نمونه های با و بدون سرباره نشان نمی دهد که احتمالاً منسوب به ماهیت و ساختار بسته منافذ از UHPC می باشد. اثرات مفید سرباره در بتن ناشی از اصلاح ریز ساختار خمیر سیمانی است که دارای منافذ مویرگی بیشتری است که با ژل C-S-H با چگالی کم نسبت به خمیر سیمان پر تلند پر شده است. همچنین می توان بیان نمود که سرباره به طور موثر حجم اندازه و حجم تجمعی منافذ را کاهش می دهد. حضور الیاف PVA در ترکیب UHPC سبب محبوس شدن حفرات هوا در اطراف الیاف و عدم تراکم مناسب می گردد، به طوری که مشاهده می گردد ترک های ایجاد شده در

۴- نتیجه گیری

- استفاده از روابط تجربی حاصل از آزمایش غیر مخرب مقاومت

الکتریکی، می تواند تخمین خوبی از مقاومت فشاری UHPC ارائه دهد، مشروط بر آنکه برای بالابردن اعتبار روابط فوق از تعداد زیادی نمونه استفاده گردد.

- بر اساس آنالیز SEM حضور ذرات نانو، تراکم بالاتری در نمونه ها به دلیل تشکیل سریع ژل C-S-H ایجاد می کند و اثر منفی الیاف در عدم تراکم مناسب را تقلیل می دهند، به طوری که نمونه های حاوی ۲/۵٪ سرباره و ۱٪ نانو اکسید منیزیم عرض ترک محدودتری نسبت به نمونه شاهد داشته اند.

۵- مراجع

- [1] Mishra, O. & Singh, S.P. (2019) "An overview of microstructural and material properties of ultra-high performance concrete", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 8(2), pp. 97-143
- [2] Bajaber, M. A., & Hakeem, I. Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1058-1074
- [3] Mehta, P. K and Monteiro, P. J. M. "Concrete: microstructure, properties, and materials". McGraw-Hill Education, 2014.
- [4] Farmington Hills, M. "ACI 239C. ETR on the Structural Design of Ultra-High Performance Concrete.," in ACI Committee 239, American Concrete Institute, 2017.
- [5] Nematollahi, B. Saifulnaz, M. R. Jaafar, S and Voo, Y. L. "A review on ultra high performance 'ductile' concrete (UHPdC) technology," *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1003–1018, 2012.
- [6] Ahmad, S. Hakeem, I and Maslehuddin, M. "Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 9, pp. 1106–1126, 2016.
- [7] Kadri, E. H. Aggoun, S. Kenai, S and Kaci, A. "The compressive strength of high-performance concrete and ultrahigh-performance," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2012, 2012.
- [8] Z. Li, "Advanced Concrete Technology; Hoboken John Wiley & Sons," Inc. Hoboken, NJ, USA, 2011.
- [9] Mishra O and Singh, S. P. "An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 97–143, 2019.
- [10] Larrard F. De and Sedran, T. "Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model," *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, no. 6,

- حضور سرباره و افزایش محتوای آن به دلیل واکنش پوزولانی آهسته سرباره، به کاهش مقاومت فشاری زودهنگام منجر می گردد، به طوری که با افزودن ۱۰-۲/۵٪ سرباره مقاومت فشاری بعد از ۷ روز ۵ تا ۱۰٪ کاهش داشته است، اما در ۹۰ روز رشد مقاومت فشاری نمونه های حاوی مقادیر بهینه سرباره ۵٪ در مقایسه با نمونه شاهد بیشتر بوده است.

- حضور ذرات نانو اکسید منیزیم و نانو اکسید مس تا ۱٪ موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۰/۵ و ۷/۳۵٪ می گردد که به خاصیت پرکنندگی و اثر هسته زایی ذرات نانو منسوب می گردد، با افزایش بیشتر محتوای نانو ذرات تا ۲٪، مقاومت فشاری به دلیل توزیع نامطلوب در محتوای بالاتر و اثر تجمع خوشه ای نانو ذرات کاهش می یابد، همچنین نقش اکسید منیزیم در بهبود مقاومت فشاری مشهودتر بوده است. بعد از ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه های ترکیب شده سرباره و نانو ذرات مشابه با نمونه های بدون ذرات نانو بوده است.

- در حالت عمل آوری استاندارد بعد از ۲۸ روز تمامی نمونه ها دارای مقاومت فشاری بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مگا پاسکال بوده اند، در حالی که در حالت تسریع شده بعد از گذشت ۳۶ ساعت تمامی نمونه ها مقاومت فشاری بالاتر از ۱۲۰ مگا پاسکال را داشته اند، بدان معنی که تمامی نمونه ها در محدوده مقاومت فشاری تعیین شده برای بتن UHPC توسط استاندارد های معتبر قرار داشته اند. رشد بیشتر مقاومت فشاری در حالت تسریع شده منسوب به بهبود فرایند هیدراسیون با اعمال عمل آوری حرارتی است.

- مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه ها در هر دو حالت عمل آوری افزایش چشمگیری داشته اند. مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه ها در تمامی سنین به غیر از سن ۷ روز، بالاتر از ۲۰۷kΩ.cm بوده است که نشان می دهد احتمال نفوذ یون کلر و خطر خوردگی در نمونه ها بسیار ناچیز است.

- رشد مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی متأثر از سن، شرایط عمل آوری، حضور و محتوای سرباره و ذرات نانو اکسید منیزیم و نانو اکسید مس بوده است اما با توجه به تغییرات پارامترهای آزمایشگاهی عامل سن بتن به مراتب از اهمیت بالاتری نسبت به عوامل دیگر برخوردار بوده است.

- USA2018, 2018.
- [23] Toutlemonde, F. Génèreux, G. Resplendino, J and Delort, M. "Product and design standards for UHPFRC in France," in International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, 2016, vol. 1, no. 1.
- [24] EN, B. S. "206-1"Concrete-Specification," Performance, Prod. Conform. Br. Stand. BSI Gr. Hqrs., vol. 389, 2014.
- [25] Li, W. Huang, Z. Cao, F. Sun, Z and Shah, S. P. "Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix," *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 366–374, 2015.
- [26] Park, J.-S. Kim, Y. J. Cho, J.-R and Jeon, S.-J. "Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 8, pp. 5537–5553, 2015.
- [27] Whiting D. A and Nagi, M. A. "Electrical Resistivity of Concrete—A Literature Review. Portland Cement Association PCA," *Res. Dev. Information, Ser.*, no. 2457, p. 58, 2003.
- [28] ACI 239C, "ETR on the Structural Design of Ultra-High Performance Concrete," in American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. on-line committee documents, 2017.
- [29] A. A. of S. H. and Officials, T. "AASHTO TP 95: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration." Washington, DC, 2011.
- [30] ASTM C1202. (2012). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. In American Society for Testing and Materials (Vol. 100, pp. 1-8)
- [31] Shekarchizadeh, M. Tahersima, M. Hajibabae, A and Layssi, H. "Concrete mix proportions with ultra-high electrical resistivity," in 11DMBC International Conference on Durability of Building Materials and components, 2008.
- [32] Nazari, A. Rafieipour, M. H and Riahi, S. "The effects of CuO nanoparticles on properties of self compacting concrete with GGBFS as binder," *Mater. Res.*, vol. 14, pp. 307–316, 2011.
- pp. 997–1009, 1994.
- [11] Spiesz, R. Yu, P and Brouwers, H. J. H. "Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 140–150, 2014.
- [12] Wu, Z. Shi, C. Khayat, K. H and Xie, L. "Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 118–125, 2018.
- [13] Chunping, G. Qiannan, W. Jintao, L and Wei, S. "The effect of nano TiO₂ on the durability of ultra-high-performance concrete with and without a flexural load," *Ceram-Silikáty*, vol. 62, pp. 374–381, 2018.
- [14] Huang, H. Teng, L. Gao, X. Khayat, K. H. Wang, F and Liu, Z. "Effect of carbon nanotube and graphite nanoplatelet on composition, structure, and nano-mechanical properties of CSH in UHPC," *Cem. Concr. Res.*, vol. 154, p. 106713, 2022.
- [15] ASTM, C. "109/C 109M-02" Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 50mm Cube Specimens," Am. Soc. Test. Mater. west Conshohocken, Pennsylvania, 2002.
- [16] TP95, A. "11, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," Am. Assoc. State Highw. Transp. Off. Washington, DC, USA, 2011.
- [17] Pyo S and Kim, H.-K. "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 459–466, 2017.
- [18] Xu, A. H. Chen, H. X. Guan, B. W and Feng, C. "Early hydration process of magnesium oxychloride cement with mineral admixture," *Appl Chem Ind*, vol. 46, no. 02, pp. 265–269, 2017.
- [19] Janković, K., Bojović, D., & Stojanović, M. (2019). Influence of nanoparticles on the strength of ultra-high performance concrete. In *Nanotechnology in Eco-efficient Construction* (pp. 13-42). Woodhead Publishing.
- [20] Heikal M and Ibrahim, N. S. "Hydration, microstructure and phase composition of composite cements containing nano-clay," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 19–27, 2016.
- [21] Chu, H. Wang, Q. Gao, L. Jiang, J and Wang, F. "An Approach of Producing Ultra-High-Performance Concrete with High Elastic Modulus by Nano-Al₂O₃: A Preliminary Study," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 22, p. 8118, 2022.
- [22] ACI, A. C. I. "239R-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report," Am. Concr. Institute-farmingt. Hills.

Investigating the effect of slag, magnesium nano oxide and copper nano oxide on the properties of high strength concrete under different curing conditions with the help of electrical resistivity monitoring method

Seyyed Shayan Hashemi

Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Ahmad Ganjali *

Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Aboozar Mirzakhani

Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Hamidreza Irani

Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Abstract

During the service period, concrete may come into contact with harsh environmental conditions, ultra-high performance concrete can be considered as a suitable option due to its unique strength and durability. In this study, for the first time, the effect of nanoparticles of magnesium oxide and copper oxide with amounts of 0.5, 1 and 2% separately and combined with different amounts of iron slag (2.5, 5 and 10%) on the compressive strength and electrical resistance of UHPC contains a constant content of PVA fibers in two operating modes Standard and accelerated curing (immersion in water at 95°C) were studied for different ages. Moreover, the Scanning Electron Microscopy test (SEM) is conducted on the specimens to understand the concrete's microstructure better. The results show that by using the heat treatment method and microstructure modification in the presence of new nano materials, it is possible to create a higher potential than UHPC in terms of compressive strength and electrical resistivity. So that after 90 days, the compressive strength for each of the specimens containing 1% of magnesium oxide and copper oxide nanomaterials respectively increased the compressive strength by approximately 37.4% and 37.1% compared to the 7-day sample. While the growth of the compressive strength in the accelerated mode for the mentioned specimens was 16.8% and 18.8%, respectively, compared to the standard curing. In addition, by obtaining accurate experimental relationships between the two parameters of compressive strength and electrical resistivity a non-destructive method for predicting compressive strength has been presented.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete (UHPC), Slag, PVA fibers, UHPC and MgO Nano particles, UHPC and Cu₂O Nanoparticles, Compressive strength, Electrical resistivity.

* Corresponding Author: ahmad.ganjali@iauh-shahrood.ac.ir