

## بررسی مشخصات مکانیکی، الکتریکی و ریز ساختار بتن های فراتوانمند حاوی درصد های مختلف دوده سیلیس و الیاف پلی وینیل الکل

میرعلی محمد میرگذار لنگرودی<sup>۱\*</sup>، سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد<sup>۲</sup>، جلیل باراندوست<sup>۳</sup>، اردلان غنی زاده<sup>۴</sup>

۱- مربی، گروه مهندسی عمران، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- کارشناس مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

بتن فراتوانمند نوع جدیدی از مصالح مرکب به شمار می آید که با نسبت آب به مصالح سیمانی پایین، توانایی تحمل تنش های فشاری تا ۲۰۰ مگاپاسکال و تنش های کششی بالایی در حدود ۱۰ مگاپاسکال را دارا می باشد. انرژی شکست بتن فراتوانمند از ۸۵۶۰ تا ۴۰۰۰۰ ژول بر متر مکعب متغیر است که این میزان تقریباً ۲۲۰ برابر بزرگتر از انرژی شکست ملات معمولی می باشد. به دلیل خصوصیات برتر مکانیکی و دوام، بتن فراتوانمند توجه زیادی را در بین محققان به خود جلب کرده است. مقاومت فشاری بسیار بالا این نوع بتن منجر به کاهش وزن قابل توجه سازه و همچنین ساخت المان های سازه ای با ابعاد کوچک تر می شود. در این مقاله نمونه های بتن فراتوانمند حاوی الیاف پلی وینیل الکل بعد از عمل آوری در دوشراط محیطی متفاوت، یکی شرایط استاندارد در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و دیگری قرارگیری در آب گرم ۷۰ درجه سانتی گراد، تحت آزمایش های مقاومت فشاری، خمشی و مقاومت الکتریکی قرار گرفتند. آزمایش های مقاومت فشاری و خمشی در سنین ۲۸ روزه و ۶ ماهه و آزمایش مقاومت الکتریکی در سن ۶ ماه انجام شدند. با در دست داشتن اطلاعات مقاومت مکانیکی و دوام و ریزساختار، یک دید کلی و جامع از بتن های فراتوانمند و قابلیت های آنها به دست می آید. نتایج نشان داد که الیاف PVA در بهبود مشخصات مکانیکی (به دلیل جلوگیری از گسترش ریزترک ها) از یک سو و همچنین افزایش کلی تخلخل ماتریس سیمانی از سویی دیگر تاثیر بسزایی دارد. ولی تاثیر الیاف روی مشخصات الکتریکی به شدت تحت تاثیر میزان جایگزینی دوده سیلیس با سیمان و همچنین نوع عمل آوری است.

کلمات کلیدی: بتن فراتوانمند، الیاف PVA، ریزساختار، مقاومت الکتریکی

\*نویسنده مسئول: میرعلیمحمد میرگذار لنگرودی  
پست الکترونیکی: ali.mirgozar@fshiau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰

## ۱- مقدمه

از اواسط دهه ۹۰ میلادی با پیدایش نوع جدیدی از بتن با عنوان بتن فراتوانمند، مهندسان و محققان مطالعات خود را معطوف خصوصیات مکانیکی برتر این نوع بتن کردند. مقاومت فشاری بسیار بالا (تا ۲۰۰ مگاپاسکال) این نوع بتن منجر به کاهش وزن قابل توجه سازه و همچنین ساخت المان‌های سازه‌ای با ابعاد کوچک تر می‌شود [۱، ۲]. برای به دست آوردن ماتریس سیمانی با حداکثر چگالی ممکن که منجر به نفوذپذیری بسیار پایین و دوام بالا می‌شود [۳-۵] چارون و چیرزی [۲، ۶] سنگدانه درشت را از مصالح موردنیاز بتن فراتوانمند خارج کرده تا به مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال دست یابند. مخارج بالای ساخت یکی از مشکلات برای بتن فراتوانمند در راه تجاری سازی بود. برای حل این مشکل بعضی محققان از پوزولان‌های مختلف به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کردند. به علاوه، چون مانع افزایش مقاومت فشاری بتن فراتوانمند، شکست در مرز میان سیمان و سنگدانه است، استفاده از پوزولان‌هایی مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی این مرز را تقویت کرده و خصوصیات مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد [۷]. پارک و همکارانش درصدهای بالای دوده سیلیس را جایگزین سیمان کردند و در نهایت ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی جایگزینی دوده سیلیس را به عنوان درصد بهینه پیشنهاد دادند [۷]. ژائو و همکارانش از ماسه سیلیسی به جای ماسه طبیعی استفاده کردند و همچنین خاکستربادی را جایگزین بخشی از سیمان کردند. آنها به بتن توانمند با مقاومت فشاری بیش از ۱۷۰ مگاپاسکال دست یافتند، در حالی که مخارج ساخت به شدت کاهش یافته بود [۸]. اگرچه مقاومت فشاری بالا مشخصه اصلی برتری بتن فراتوانمند بود، مقاومت خمشی و کششی پایین و همچنین رفتار ترد شکننده از ضعف‌های آن به شمار می‌آمدند. محققان برای رفع این مشکل، الیاف گوناگونی از جمله الیاف فولادی با شکل‌ها و طول‌های مختلف برای بهبود مقاومت خمشی و خصوصیات کششی بتن شامل ظرفیت جذب انرژی و ظرفیت کرنش را به مواد اولیه اضافه کردند [۹-۱۵].

حوزه مقاومت الکتریکی بتن به عنوان یک روش غیرمخرب برای بتن در اواخر دهه ۸۰ توجهات را به خود جلب کرد. با توجه به اهمیت پدیده‌های نفوذپذیری و نفوذ یون کلر در طراحی سازه‌های عمرانی، امروزه دوام بتن از جمله فاکتورهای بسیار تاثیرگذار در طراحی و ساخت سازه‌های بتن آرمه محسوب می‌شود. از آنجایی که فاز کلسیم سیلیکات هیدراته شده و محلول حفره‌ای داخل ماتریس سیمانی، مقاومت الکتریکی به مراتب متفاوتی از خود نشان می‌دهند (کلسیم سیلیکات هیدراته شده به عنوان فاز دی الکتریک و محلول حفره‌ای به عنوان فاز رسانا)، اندازه‌گیری خصوصیات الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی می‌تواند راهی ساده و کم‌خرج برای بررسی ریزساختار این کامپوزیت‌ها را ارائه دهد. با تکیه بر مطالعات ونر در اوایل قرن بیستم [۱۶] محققان شروع به استفاده از سیستم‌های فرکانسی کردند که اهمیت زیادی در ارزیابی تغییرات هیدراتاسیون خمیرهای سیمانی داشت [۱۷-۲۰]. با استفاده از روش ونر، موریس و همکارانش مطالعاتی روی استوانه‌های بتنی انجام دادند که تا به امروز یکی از مراجع اصلی روش‌های ونر محسوب می‌شود [۲۱]. با شناسایی مشکلات سیستم‌های جریان متناوب مانند احتمال ایجاد اتصال کوتاه در حضور میلگرد فولادی و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم میزان خوردگی استفاده از جریان مستقیم محبوبیت پیدا کرد [۲۲].

در رابطه با مقاومت الکتریکی بتن فراتوانمند مطالعات محدودی در سال‌های اخیر انجام شده است. بیشتر این تحقیقات بر روی روش مقاومت الکتریکی به عنوان یکی از روش‌های پایش سلامت سازه متمرکز بوده‌اند. پایش سلامت سازه با بتن خودسنجش با مخلوط کردن الیاف رسانا مانند الیاف کربن [۲۳] و یا ذرات رسانا مانند پودر گرافیت یا نیکل یا کربن سیاه [۲۴-۲۶] امکان پذیر می‌شود و بر این اصل استوار است که در چرخه‌های بارگذاری قبل از پیدایش ریزترک‌ها، مقاومت الکتریکی به طور برگشت پذیر تغییر می‌کند. در حالی که با پیدایش و گسترش ترک‌ها این تغییرات برگشت ناپذیر می‌شود. در واقع کامپوزیت‌های سیمانی قادر به سنجش تنش و کرنش خود

هستند. این خاصیت را پیژورسیستوییتی می نامند [۲۶-۲۸]. ویت و همکارانش مقاومت الکتریکی بتن فراتوانمند حاوی ۲ درصد الیاف کوتاه فولادی و ۱ درصد الیاف بلند فولادی را تحت کشش بررسی کردند [۲۹]. هدف آنها بررسی اثر ترک خوردگی و طول نمونه روی مقاومت الکتریکی بود. نتایج آنها نشان داد که قبل از مقاومت پساترک، مقاومت نمونه ها با افزایش ریز ترک ها کاهش پیدا کرد. از آنجا که بعد از مقاومت پساترک فقط بازشدگی دهانه یک ترک اتفاق می افتد و ترک خوردگی بیشتری دیده نمی شود، تخلخل ماتریس افزایش یافته و در نتیجه مقاومت الکتریکی نیز افزایش می یابد. آنها همچنین نشان دادند قابلیت سنجش ترک روش و نر برای بتن فراتوانمند با افزایش فاصله بین الکترودها کاهش می یابد. انگوین و همکارانش [۳۰] رفتار الکتریکی کامپوزیت های سیمانی مهندسی شامل ۱,۵ درصد الیاف فولادی با اشکال مختلف (صاف، پیچیده شده و قلاب شده) و طول های ۱۳، ۲۰ و ۳۰ میلی متر را در حالت تحت کشش بررسی کردند. نمونه های شامل الیاف قلاب شده بلند بیشترین رسانایی الکتریکی را داشتند. در حالی که الیاف کوتاه فولادی بیشترین مقاومت الکتریکی را نشان دادند. مقاومت الکتریکی تمام نمونه ها تا نقطه پساترک کاهش پیدا کرد که این نتیجه همراستا با نتایج ویت و همکارانش بود. رانده و همکارانش [۳۱] مقاومت الکتریکی کامپوزیت های سیمانی مهندسی شده حاوی الیاف پلی وینیل الکل و درصد های مختلف خاکستریادی را در حالت تحت کشش مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که شکل پذیری کششی نمونه ها با درصد های بالاتر خاکستر بادی نزدیک به دو برابر نمونه های حاوی درصد های پایین خاکستر بادی بود. به علاوه، مقاومت الکتریکی نمونه های با درصد بالای الیاف پلی وینیل الکل قبل از بارگذاری بسیار بالاتر از دیگر نمونه ها بود. بر اساس مطالعات مرور شده در بالا، اهداف این مطالعه شامل بررسی نقش مقادیر مختلف دوده سیلیس روی خصوصیات مقاومت مکانیکی و دوام بتن فراتوانمند الیافی است. این مطالعه همچنین به بررسی تاثیر شرایط عمل آوری مختلف بر خصوصیات بتن فراتوانمند می پردازد. از سویی دیگر مقاومت الکتریکی نمونه ها در ولتاژهای مختلف اندازه گیری شده تا تاثیر تغییر اختلاف پتانسیل بر روی خصوصیات الکتریکی بتن فراتوانمند و همچنین اثر تغییر قطبیت جریان روی رفتار نمونه ها بررسی شود. تهیه ریزنگارهای الکترونی و آنالیز EDS به منظور بررسی نقش دوده سیلیس در بهبود کیفیت ماتریس سیمانی انجام شد.

## ۲. مواد و مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱. مواد

سیمان تیپ یک با توجه به استاندارد ASTM C150 [۳۲] استفاده شد. دوده سیلیس با رعایت استاندارد ASTM C1240 [۳۳] در مخلوط ها به عنوان جایگزین سیمان در درصد های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی سیمان و دوده سیلیس در جدول ۱ ارائه شده است. سنگدانه مورد استفاده از نوع ماسه سیلیسی رد شده از الک شماره ۳۰ بوده و فوق روان کننده با رعایت نکات مطرح شده در استاندارد ASTM C494 [۳۴] مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی وینیل الکل استفاده شده در طرح های اختلاط در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

ترکیب	سیمان (%)	دوده سیلیس (%)
CaO	64.38	1.87
SiO <sub>2</sub>	21.08	89.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.36	1.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.64	2.12
MgO	2	1.61
K <sub>2</sub> O	0.82	1.056
Na <sub>2</sub> O	0.5	0.556
L.O.I (افت حین احتراق)	0.9	2.6

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی و فیزیکی الیاف پلی وینیل الکل

نوع ماده	هندسه	طول (mm)	قطر ( $\mu\text{m}$ )	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
مصنوعی	میکرو	6	13	1300	29.5

## ۲-۲. طرح اختلاط

ساخت، قالب گیری و عمل آوری به رعایت نکات اشاره شده در استاندارد ASTM C109 [۳۵] گرفت. در این راستا نمونه های منشوری با ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متر ساخته شدند. در ابتدا، مواد سیمانی به همراه ماسه سیلیسی با یکدیگر مخلوط شده تا دوده سیلیس به خوبی در مخلوط پخش شده و رنگ خاکستری روشنی به دست آید. سپس مخلوط آب و فوق روان کننده اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه با سرعت متوسط ادامه پیدا کرد. بعد از تشکیل خمیر، الیاف اضافه شده و مخلوط کرن به مدت ۲ دقیقه با سرعت بالا ادامه پیدا کرد. در تمام طرح های اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی ثابت در نظر گرفته شد تا از کم شدن مقاومت مکانیکی بتن در نتیجه افزایش این نسبت جلوگیری شود. اما با توجه به درصد های مختلف دوده سیلیس، برای به دست آوردن مخلوط با روانی مناسب، فوق روان کننده در درصد های مورد نیاز به هر طرح اختلاط اضافه شد. جدول ۳ طرح های اختلاط ساخته شده برای این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۳: طرح های اختلاط

کد طرح	عیار سیمان	دوده سیلیس (درصد حجمی)	آب/مواد سیمانی	فوق روان کننده/مواد سیمانی	الیاف (%)
S15P0	1060	15	0.17	0.015	0
S20P0	1060	20	0.17	0.015	0
S25P0	1060	25	0.17	0.015	0
S30P0	1060	30	0.17	0.015	0
S35P0	1060	35	0.17	0.015	0
S40P0	1060	40	0.17	0.015	0
S15P03	1060	15	0.17	0.015	0.3
S20P03	1060	20	0.17	0.015	0.3
S25P03	1060	25	0.17	0.015	0.3
S30P03	1060	30	0.17	0.015	0.3
S35P03	1060	35	0.17	0.015	0.3
S40P03	1060	40	0.17	0.015	0.3
S15P06	1060	15	0.17	0.015	0.6
S20P06	1060	20	0.17	0.015	0.6
S25P06	1060	25	0.17	0.015	0.6
S30P06	1060	30	0.17	0.015	0.6
S35P06	1060	35	0.17	0.015	0.6
S40P06	1060	40	0.17	0.015	0.6
S15P09	1060	15	0.17	0.015	0.9
S20P09	1060	20	0.17	0.015	0.9
S25P09	1060	25	0.17	0.015	0.9
S30P09	1060	30	0.17	0.015	0.9
S35P09	1060	35	0.17	0.015	0.9
S40P09	1060	40	0.17	0.015	0.9
S15P12	1060	15	0.17	0.015	1.2
S20P12	1060	20	0.17	0.015	1.2
S25P12	1060	25	0.17	0.015	1.2
S30P12	1060	30	0.17	0.015	1.2
S35P12	1060	35	0.17	0.015	1.2
S40P12	1060	40	0.17	0.015	1.2

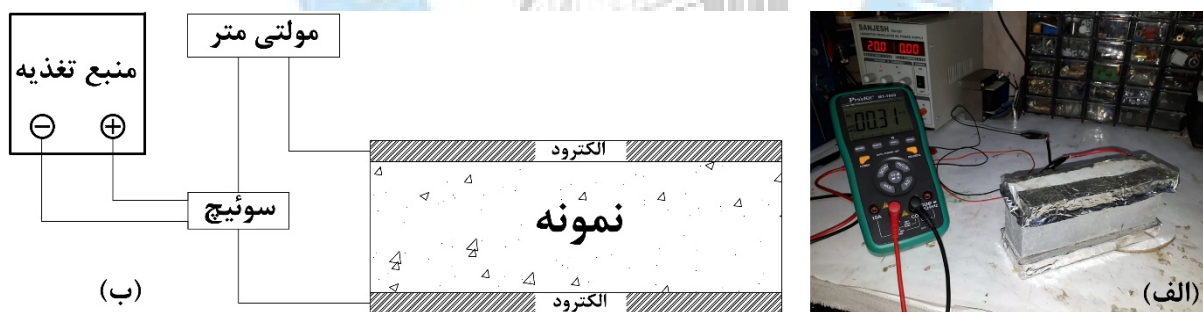
در ارتباط با عمل آوری، دو رژیم مختلف در نظر گرفته شد. برای این منظور نمونه ها به دو گروه تقسیم شده و گروه اول تحت عمل آوری در شرایط و دمای استاندارد قرار گرفتند. این نمونه ها در حوضچه آب آهک و در دمای ۲۳ سانتی گراد قرار گرفتند. گروه دوم ابتدا در

آب ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفته و سپس به حوضچه آب آهک با دمای ۲۳ درجه سانتی گراد منتقل شده و تا زمان انجام آزمایش در آن قرار گرفتند.

### ۲-۳. آزمایشات و تجهیزات آزمایشگاهی

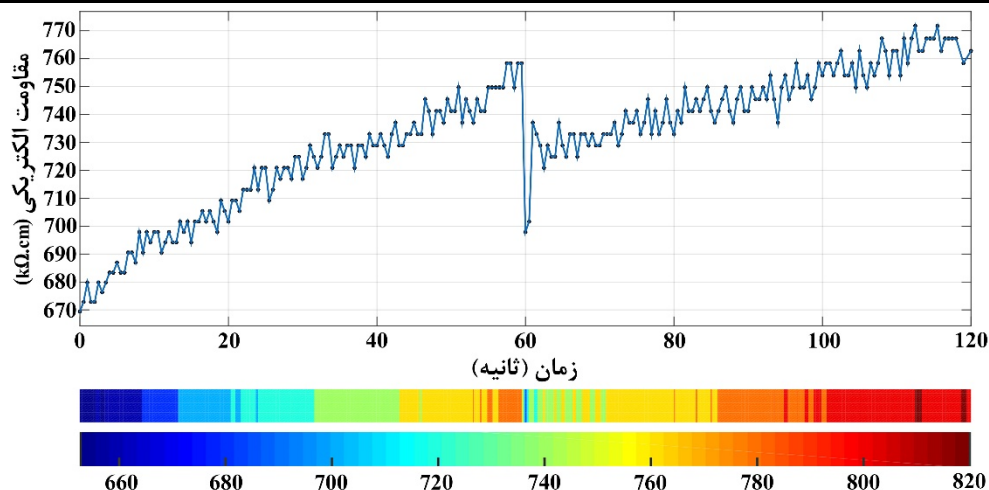
#### ۱-۲-۳. مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی به منظور بررسی خصوصیات مربوط به دوام بتن فراتوانمند انجام شد. از آنجایی که نتایج آزمایش به شدت وابسته به مقدار آب حاضر داخل ماتریس، میزان یون موجود در محلول حفره ای و تخلخل نمونه دارد، این آزمایش می تواند فاکتوری تعیین کننده برای دوام سازه های بتنی باشد. دو روش معمول برای اندازه گیری مقدار مقاومت الکتریکی کامپوزیت های سیمانی روش دو الکتروده و روش ورنر هستند. این دو روش که به کرار توسط محققان استفاده شده اند [۳۶-۳۹]، در عین داشتن مزیت های قابل توجه، دارای کمبودهایی نیز می باشند [۴۰، ۴۱]. ولی با این حال هر دوی این روش ها از جمله قابل اعتماد ترین روش ها برای بررسی مقاومت الکتریکی کامپوزیت های سیمانی به شمار می آیند. در این مقاله، با توجه به تخلخل بسیار پایین و همچنین نسبت آب به سیمان پایین که مقاومت بالا را نتیجه می دهد، تنها روشی که نتایج قابل قبول ارائه می دهد روش دو الکترودی می باشد. برای بررسی دقیق رفتار الکتریکی نمونه ها و ارزیابی تغییرات مقادیر در یک بازه زمانی، اندازه گیری در یک بازه ۶۰ ثانیه ای انجام شد و بعد از آن قطبیت جریان عوض شد و اندازه گیری برای ۶۰ ثانیه دیگر ادامه پیدا کرد. برای فراهم کردن جریان مستقیم مورد نیاز از یک منبع تغذیه استفاده شد. مولتی متر دیجیتال با قابلیت اتصال به کامپیوتر برای ذخیره مقادیر مقاومت الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. بعد از خارج شدن از حوضچه آب آهک، آب آزاد سطح نمونه ها خشک شد و اندازه گیری صورت پذیرفت. الکترودها نقش مهمی در اندازه گیری مقاومت الکتریکی کامپوزیت های سیمانی دارند و در واقع رابط میان ماتریس سیمانی و تجهیزات اندازه گیری هستند [۴۰]. بنابراین انتخاب یک جنس مناسب و آرایش مناسب می تواند تاثیر بسزایی روی اندازه گیری داشته باشد. لذا در این مقاله، دو الکتروده برنجی با ابعاد ۱۶×۴ سانتی متر ساخته شدند و در بالا و پایین هر نمونه قرار گرفتند. یک سوئیچ دو قطبی نیز استفاده شد و تغییر قطبیت در ثانیه ۶۰ انجام شد. شکل ۱ تصویر حقیقی و شماتیک وسایل اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها را نشان می دهد.



شکل ۱: تجهیزات اندازه گیری مقاومت الکتریکی: (الف) تجهیزات استفاده شده (ب) طرح شماتیک

برای جمع آوری مقادیر مقاومت الکتریکی، مقدار جریان الکتریکی در هر ۰,۵ ثانیه در ۶۰ ثانیه اول برداشت شد. قطبیت جریان در ۶۰ ثانیه عوض شد و رفتار الکتریکی نمونه ها برای ۶۰ ثانیه دیگر نیز ادامه یافت تا تاثیر تغییر قطبیت و رفتار نمونه ها بعد از آن به دقت بررسی شود. با توجه به تعداد طرح های اختلاط بالا و به دست آمدن حجم زیادی از اطلاعات روش خاصی برای به تصویر کشیدن مقاومت الکتریکی نمونه ها استفاده شد. به این ترتیب که هر کدام از پارامترهای دوده سیلیس، الیاف و زمان در یک بعد و تغییرات مقاومت به عنوان رنگ در یک نمایش سه بعدی به تصویر در آمدند. با این کار تعداد بسیار زیادی از داده در یک شکل قابل نمایش است و همچنین دنبال کردن تغییرات مقادیر برای خواننده راحت تر است. برای درک بهتر نمونه ای از داده خام به دست آمده و طیف رنگی متناظر با آن در شکل ۲ به نمایش در آمده است. مجموعه ای از این داده ها در کنار هم با درون یابی انجام شده توسط نرم افزار به صورت یک مکعب رنگی در آمد که تعداد زیادی از نتایج به دست آمده را به نمایش در می آورد.



شکل ۲: تغییرات مقاومت و طیف رنگی متناظر با آن

### ۲-۳-۲. مقاومت خمشی

اندازه گیری مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C348 [۴۲] انجام شد. نمونه ها در سنین ۲۸ روزه و ۶ ماهه تحت این آزمایش قرار گرفتند. سه نمونه با عمل آوری استاندارد و سه نمونه با عمل آوری آب گرم آزمایش شدند.

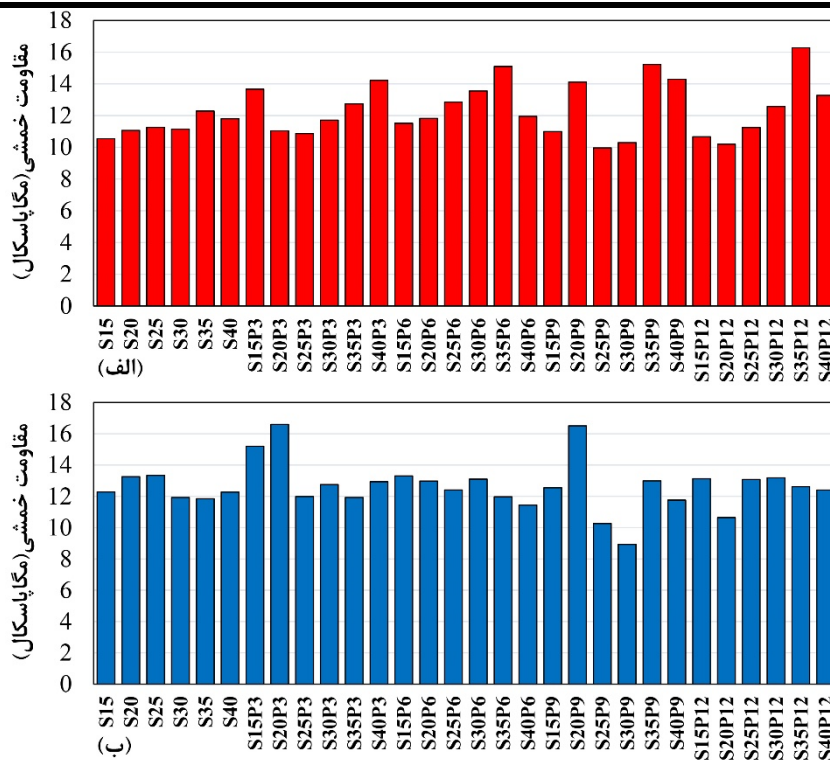
### ۲-۳-۳. مقاومت فشاری

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C349 [۴۳] انجام شد. تکه های از نمونه هایی که تحت آزمایش مقاومت خمشی قرار گرفتند برای این آزمایش استفاده شدند. طبق استاندارد دو طفحه فولادی به ابعاد  $5,1 \times 4$  سانتی متر بالا و پایین نمونه قرار گرفتند به طوری که مکعبی  $4 \times 4$  تحت بار فشاری قرار بگیرد. این آزمایش هم در سنین ۲۸ روزه و ۶ ماهه انجام شد.

### ۳. نتایج و بحث و بررسی

#### ۳-۱. مقاومت فشاری و خمشی

شکل ۳ مقاومت خمشی نمونه ها در سن ۲۸ روزه را نشان می دهد. بالاترین مقادیر در شکل ۳-الف که متعلق به نمونه های با عمل آوری آب گرم است، مربوط به نمونه های حاوی ۳۵ و ۴۰٪ دوده سیلیس است. از آنجا که دوده سیلیس تخلخل نمونه را پایین آورده و همچنین چگالی ماتریس سیمانی را به شدت بالا می برد و در نتیجه آن رفتار ترد نمونه را باعث می شود، این نتایج قابل پیش بینی نبوده و می توان آن را به تاثیر دمای عمل آوری بالا روی ساختار و کارایی دوده سیلیس نسبت داد. همانطور که در شکل دیده می شود، به طور کلی مقاومت خمشی با افزایش درصد الیاف افزایش می یابد. این پدیده می تواند مربوط به درگیری خوب بین الیاف و ماتریس سیمانی باشد که از گسترش زود هنگام ترک ها جلوگیری می کند. شکل ۳-ب مقاومت خمشی نمونه ها تحت عمل آوری استاندارد را نشان می دهد. بر خلاف شکل ۳-الف بالاترین مقادیر مقاومت خمشی در نمونه های با دوده سیلیس پایین دیده شد. در کل، با افزایش مقدار الیاف مقاومت خمشی به مقدار کمی افزایش داشته است. نکته دیگر اینکه با افزایش مقدار دوده سیلیس، مقاومت به مقدار کمی تغییر یافته است. این نشان می دهد که نتایج به دست آمده در شکل ۳-الف تحت تاثیر دمای عمل آوری هستند.



شکل ۳: نتایج مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز: (الف) عمل آوری آب گرم (ب) عمل آوری استاندارد

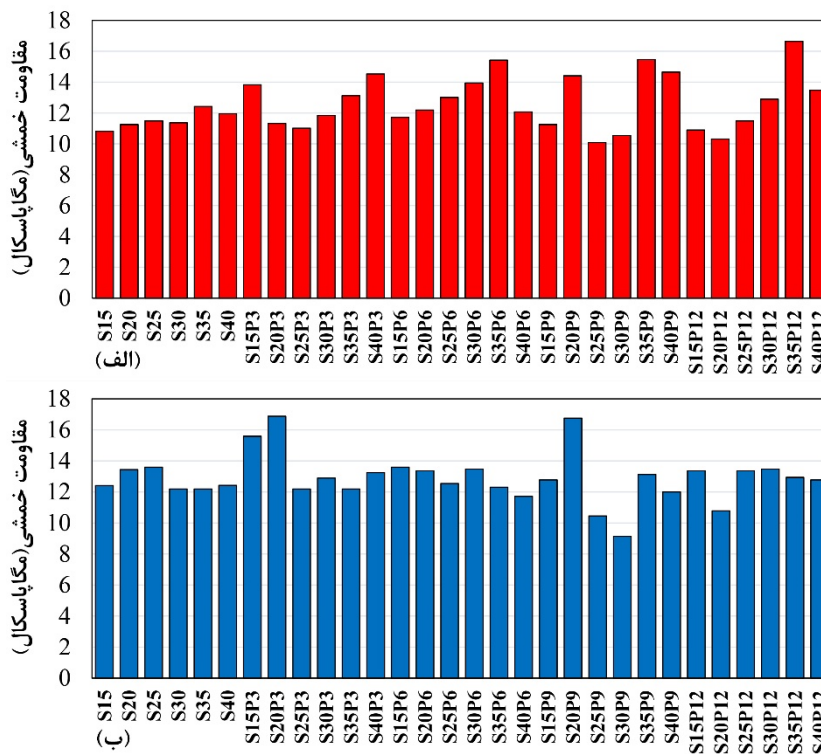
نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۶ ماه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود مقاومت خمشی نمونه ها در هر دو نوع عمل آوری به حداکثر ۱۶ مگاپاسکال می رسد. در نمونه های با عمل آوری آب گرم نمونه های حاوی ۳۵ تا ۴۰ درصد دوده سیلیس و ۰,۶، ۰,۹، ۰ و ۱,۲ الیاف افزایش مقاومت خمشی را از خود نشان داده اند. در برابر، نمونه های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد دوده سیلیس و ۱,۲ و ۰,۶ درصد الیاف کاهش مقاومت داشته اند. اثر مخرب عمل آوری با آب گرم روی نمونه های اشاره شده به خصوص نمونه حاوی ۳۰ درصد دوده سیلیس و ۱,۲ درصد الیاف می تواند به دلیل تغییرات خصوصیات مکانیکی الیاف در دماهای بالا باشد. در مجموع، پایین بودن مقاومت خمشی نمونه های با درصد های پایین دوده سیلیس نشان از بهبود مقاومت خمشی با درصد های بالای دوده سیلیس در عمل آوری با آب گرم دارد.

در شکل ۳-الف در خصوص مقاومت خمشی نمونه های با درصد بالای دوده سیلیس، مشخص است که افزودن الیاف تاثیر بسزایی بر روی مقاومت داشته است. نمونه های بدون الیاف و با درصد های پایین الیاف مقاومت های در حدود ۱۰ مگاپاسکال نشان داده اند که کمترین مقدار در میان نمونه هاست. این می تواند نتیجه تاثیر دوده سیلیس روی مرز میان سنگدانه و خمیر سیمانی باشد که باعث رفتار ترد نمونه می شود. اگرچه افزودن دوده سیلیس در کاهش تخلخل نمونه ها تاثیر بسزایی دارد، با این وجود اضافه نمودن آن سبب بروز اثرات قابل ملاحظه ای بر کاهش ضخامت مرز میان سنگدانه و خمیر سیمانی نمی گردد [۴۴].

نتایج شکل ۴-الف نشان می دهد که مقدار بهینه ای را می توان برای دوده سیلیس در نظر گرفت. همانطور که مشاهده می شود مقدار بهینه را می توان بین ۲۵ تا ۳۰ درصد جایگزینی در نظر گرفت. مقادیر بیشتر و کمتر استفاده از دوده سیلیس منجر به کاهش نسبی مقاومت خمشی شده است.

شکل ۴-ب نتایج آزمایش مقاومت خمشی با شرایط عمل آوری استاندارد نشان می دهد. بیشترین مقدار مقاومت خمشی در نمونه هایی که مقدار الیاف حداکثر و مقدار دوده سیلیس ۲۵ تا ۳۰ درصد داشته اند دیده می شود. بنابراین زمانی که مقاومت خمشی مورد بررسی، بدون توجه به شرایط عمل آوری مقدار بهینه جایگزینی دوده سیلیس چیزی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد است باشد.

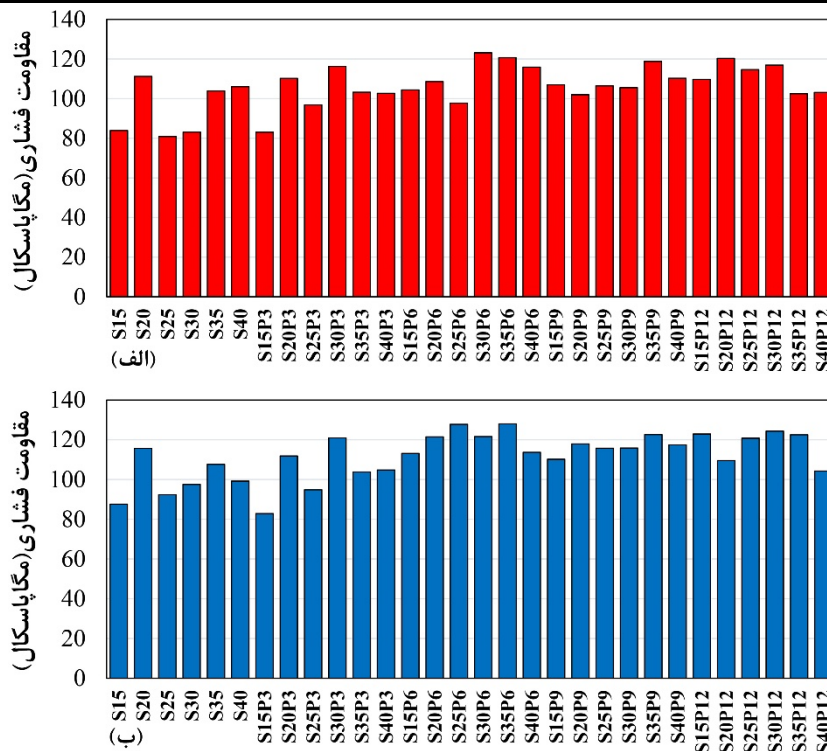
همچنین نکته قابل توجه دیگر در شکل ۴-ب مقاومت بالای نمونه های با مقدار الیاف ۰,۹٪ و جایگزینی دوده سیلیس ۲۰٪ است، در حالی که این نتایج دور از انتظار بوده و مقاومت خمشی این نمونه ها نباید فرق چندانی با دیگر نمونه ها داشته باشد. این پدیده را می توان به توزیع مناسب الیاف داخل ماتریس سیمانی به دلیل حضور دوده سیلیس دانست که به خوبی منجر به تاخیر افتادن گسترش ریز ترک ها شده است.



شکل ۴: مقاومت خمشی نمونه ها در سن شش ماه: (الف) عمل آوری آب گرم (ب) عمل آوری استاندارد

شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۲۸ روزه را نشان می دهد. نتایج نمونه های تحت عمل آوری گرم نشان می دهد که به طور کل مقاومت فشاری با افزایش درصد دوده سیلیس افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط دیگر محققان همخوانی دارد [۴۵]. علت این امر می تواند به فعالیت پوزولانی بالای دوده سیلیس و پایین آوردن تخلخل ماتریس سیمانی نسبت داده شود. توزیع نامناسب الیاف داخل ماتریس سیمانی منجر به تشکیل حفرات در اطراف الیاف شده که این مناطق می توانند محل شروع و گسترش ریزترک ها باشند. اما ذرات دوده سیلیس بدلیل افزایش لزجت مخلوط منجر به توزیع بهتر الیاف داخل ماتریس شده و همچنین به دلیلی ریزی قابلیت جایگیری در تخلخل اطراف الیاف را داشته و در نتیجه مرز میان الیاف و ماتریس را تقویت می کنند. شکل ۵-ب نتایج آزمایش را برای نمونه های با عمل آوری استاندارد نشان می دهد. بار دیگر مشاهده می شود که مقاومت فشاری با افزایش درصد دوده افزایش می یابد. حتی در درصدهای بالای ۳۵٪ کاهش در مقاومت دیده نمی شود. مشابه شکل ۵-الف با افزودن الیاف مقاومت فشاری تغییر چندانی نکرده که این امر در نتیجه حضور ذرات دوده سیلیس در مخلوط بوقوع پیوسته است.





شکل ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز: (الف) عمل آوری آب گرم (ب) عمل آوری استاندارد

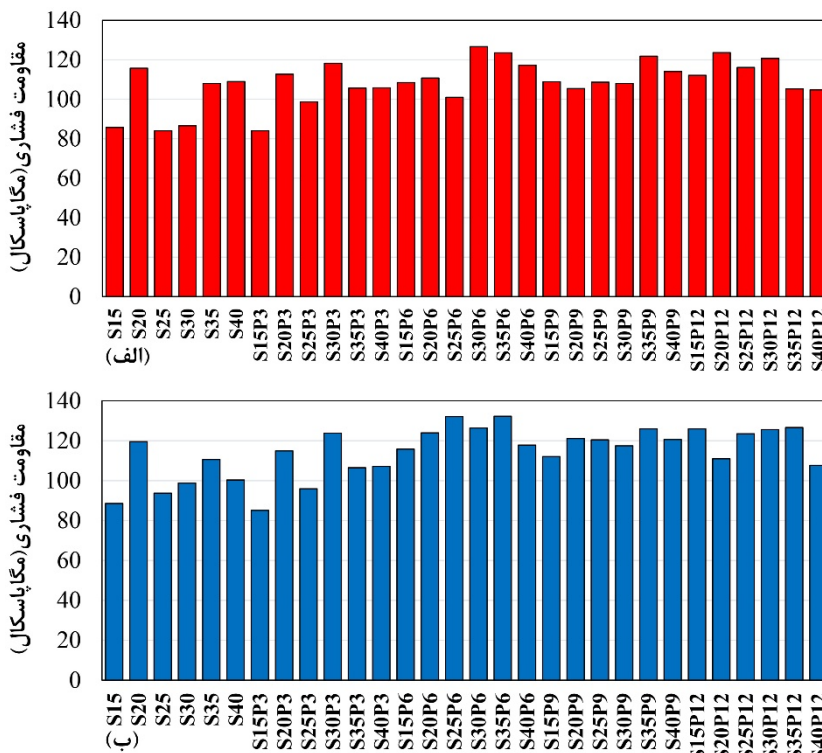
نتایج آزمون مقاومت فشاری در سن ۶ ماه در شکل ۶ به نمایش در آمده است. مهم ترین نکته کمتر بودن مقاومت فشاری نمونه های تحت عمل آوری آب گرم در مقایسه با نمونه های عمل آوری استاندارد است. بر خلاف نتایج مقاومت خمشی تغییرات درصد مواد اولیه (دوده سیلیس و الیاف) منجر به تغییرات مشابهی بر روی مقاومت فشاری نمونه ها در هر دو شرایط عمل آوری شده است.

شکل ۶-الف نتایج آزمایش مقاومت فشاری را روی نمونه های تحت عمل آوری آب گرم نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت، با افزایش درصد دوده سیلیس، مقاومت فشاری افزایش یافته است. بدین صورت که مقدار مقاومت فشاری به بیش از ۱۲۵ مگاپاسکال در نمونه های حاوی ۴۰٪ دوده سیلیس رسیده است. این امر را می توان به فعالیت بالای دوده سیلیس و در نتیجه آن چگال تر شدن ماتریس سیمانی نسبت داد. این پدیده منجر به قوی تر شدن مرز میان سنگدانه و خمیرسیمانی شده و در نتیجه مقاومت فشاری بالاتری را نتیجه می دهد. به علاوه، در درصدهای بالای دوده سیلیس، مقداری از ذرات وارد واکنش پوزولانی نشده و به عنوان پر کننده عمل می کنند. در نمونه ها مختلف با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری کمی کاهش پیدا می کند. این می تواند به دلیل افزودن الیاف و مرز میان آن با ماتریس سیمانی باشد که محل حفرات ریز نیز است. این حفرات به پدیدار شدن و گسترش ریزترک ها منجر می شوند و در نهایت نمونه مقاومت فشاری پایین تری از خود نشان می دهد.

فرق میان مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۴۰٪ و ۱۵٪ دوده سیلیس چیزی در حدود ۴۰ مگاپاسکال است که به طور واضح نقش دوده سیلیس را در بهبود مقاومت مکانیکی نشان می دهد. اگرچه که تصور می شد که افزایش مقدار جایگزینی دوده سیلیس به مقداری بالاتر از ۳۰٪، منجر به کاهش مقاومت مکانیکی نمونه ها گردد، اما مشاهده می شود که با افزایش تا ۴۰٪ نیز مقاومت فشاری به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

شکل ۶-ب نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های با عمل آوری استاندارد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نتایج شباهت زیادی به نتایج نمونه های با عمل آوری آب گرم دارد. باز هم افزایش درصد دوده سیلیس منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است.

به طور کلی، بدون توجه به شرایط عمل آوری اولیه، دوده سیلیس حتی در درصدهای بالا مقاومت فشاری را بهبود می بخشد. بر خلاف نتایج مقاومت خمشی که افزودن الیاف آن را بهبود بخشیده بود، مقاومت فشاری با افزایش الیاف کاهش می یابد.



شکل ۶: مقاومت فشاری در سن شش ماه: الف) عمل آوری آب گرم (ب) عمل آوری استاندارد

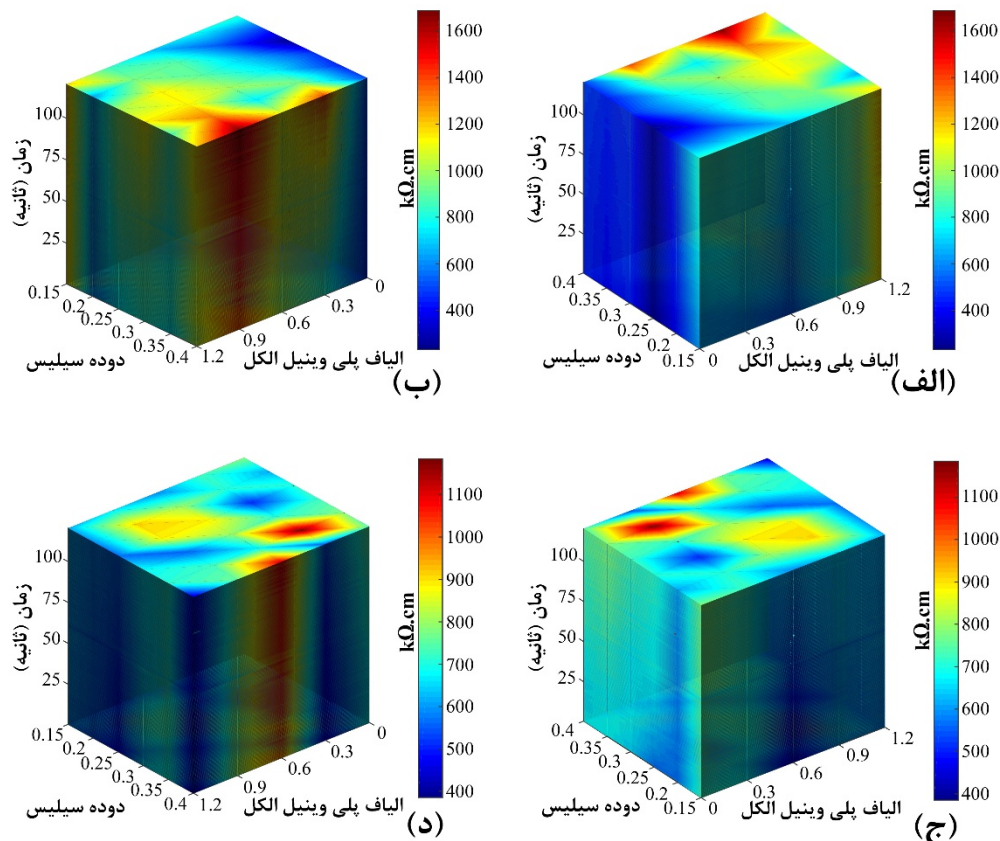
### ۳-۲. مقاومت الکتریکی

شکل ۷ نتایج اندازه گیری مقاومت الکتریکی در ولتاژ ۲۰ ولت را نشان می دهد. همانطور که گفته شد، هر مکعب نشان دهنده تمام داده های طرح های اختلاط به عنوان تابعی از زمان است. همانطور که دیده میشود، زمانی که درصد های دوده و الیاف به بالای ۳۰٪ و ۹٪ می رسد، مقاومت الکتریکی افزایش قابل توجهی را نشان می دهد. بر خلاف بتن معمولی که افزایش الیاف منجر به پایین آمدن مقاومت الکتریکی می شود، نتایج حاصله از انجام آزمایشات بر روی بتن فراتوانمند نشان می دهد که با افزایش میزان الیاف مصرفی، مقاومت الکتریکی نیز افزایش می یابد. از آنجایی که این روند در تمام نمونه ها و شرایط عمل آوری دیده شده، پس نمی تواند تصادفی و یا خطا باشد.

در عمل آوری با آب گرم تاثیر قابل ملاحظه حضور الیاف در درصدهای متوسط (۰,۶٪) دیده می شود و به نظر می رسد که عمل آوری گرم منجر به تغییر در اثر موینگی دیواره الیاف شده و در نتیجه مقاومت الکتریکی متفاوت از عمل آوری استاندارد را نتیجه داده است. همچنین منطقه ای با مقاومت الکتریکی بالا در درصد های ۳۰ تا ۴۰ درصد دوده سیلیس دیده می شود. با بالارفتن نسبت جایگزینی دوده سیلیس به ۰,۳ درصد و بیشتر، این پوزولان فعال نه تنها باعث چگال تر شدن خمیر سیمانی می شود، بلکه ذراتی از دوده که وارد واکنش نمی شوند تخلخل داخل ماتریس را پر کرده و در نتیجه آن، مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. در نمونه های تحت عمل آوری با آب گرم، یکنواختی در نتایج دیده می شود که می تواند ناشی از اثر آب گرم روی دوده سیلیس و ساختار آن و همچنین تغییر ساختار شیمیایی الیاف پلی وینیل الکل در دمای بالا باشد.

در شکل ۷-الف و ب کاهش ناچیزی در مقاومت الکتریکی با افزایش درصد دوده بدون توجه به درصد الیاف دیده می شود (در شکل ۷-الف سمت چپ مکعب نمونه های بدون الیاف و در شکل ۷-ب سمت چپ مکعب نمونه های با ۱,۲٪ الیاف را نشان می دهد). اگرچه دوده سیلیس به عنوان پرکننده عمل کرده و فرض بر این است با افزایش درصد جایگزینی مقاومت الکتریکی افزایش یابد، اما این روند کاهش می

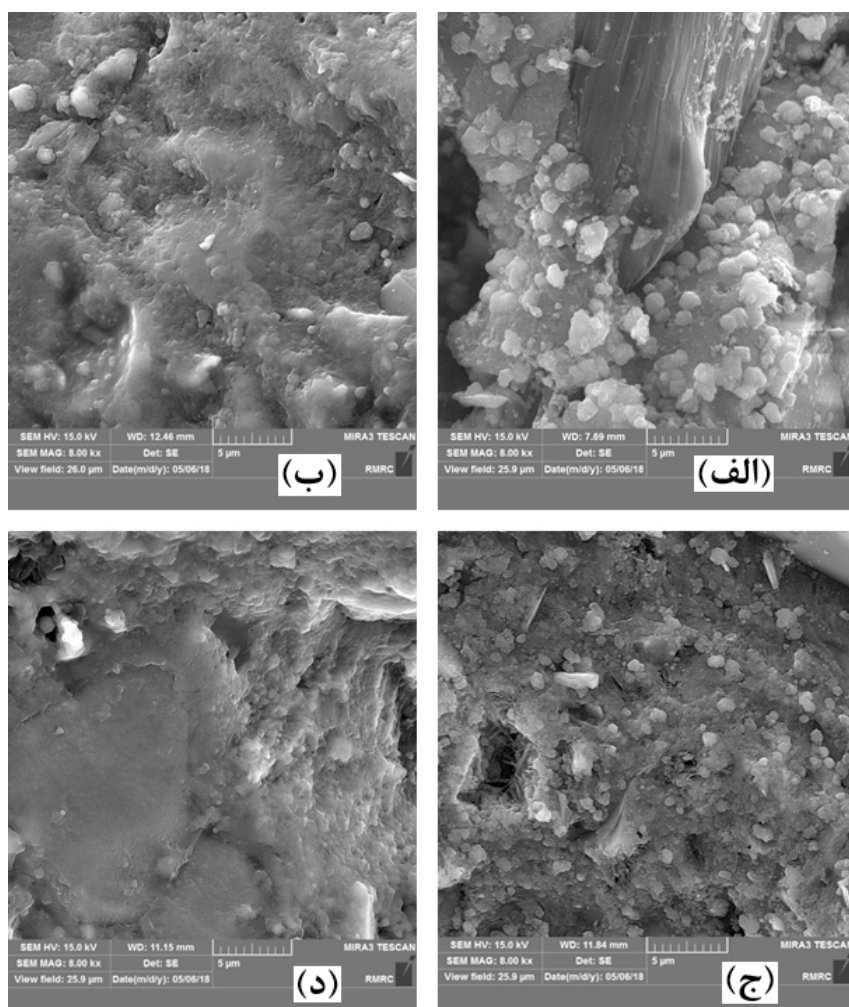
تواند مربوط به نقش دیگر دوده سیلیس در کامپوزیت های سیمانی باشد [۴۶]. دوده سیلیس به توزیع بهتر رطوبت داخل نمونه کمک می کند. در مطالعات پیشین گزارش شده است که به دلیل ریز بودن ذرات دوده سیلیس نسبت به دیگر پوزولان های متداول، استفاده از این ماده می تواند سبب پراکندگی بیشتر رطوبت در داخل نمونه گردد.



شکل ۷: نتایج اندازه گیری مقاومت الکتریکی: (الف) عمل آوری استاندارد، زاویه رو به روی مکعب (ب) عمل آوری استاندارد، زاویه پشت مکعب (ج) عمل آوری آب گرم، زاویه رو به روی مکعب (د) عمل آوری آب گرم، زاویه پشت مکعب

### ۳-۳. ریز نگار الکترونی

شکل ۸-الف الیاف گسیخته شده را در ماتریس سیمانی نشان می دهد. لایه لایه بودن الیاف پلی وینیل الکل در این کل به خوبی نشان داده شده است. همچنین مرز میان الیاف و ماتریس به خوبی نشان دهنده تخلخل بسیار پایین و درگیر قوی بین الیاف و ماتریس است. شکل ۸-ب ماتریس سیمانی را نشان می دهد. با توجه به نسبت آب به سیمان پایین و نبود فضای کافی برای رشد کریستال های پرتلنیدیت و اترینگایت، اثری از آنها در تصاویر دیده نمی شود. در شکل ۸-ج ذرات نیمه هیدراته سیمان دیده می شوند. همچنین در سمت چپ تصویر حفره ای دیده می شود که داخل آن کریستال هایی سوزنی شکل تشکیل شده اند. در واقع این حفرات تنها فضاهای خالی در بتن فراتوانمند هستند که اجازه تشکیل اترینگایت را فراهم می سازند. همانطور که در تصویر ۸-د مشاهده می شود، ماتریس سیمانی بتن فراتوانمند در مقایسه با بتن های معمولی چگال تر بودن و تخلخل کمتر آن کاملاً مشهود است. همچنین در مقایسه با بتن معمولی که کلسیم سیلیکات هیدراته شده به اشکال گوناگون و در بعضی مواقع شبه کریستالی رشد می کند، در بتن فراتوانمند همانطور که در شکل ۸-د دیده می شود به طور کلی خمیر سیمانی به شکل کاملاً آمورف مشاهده می شود. همچنین در سمت چپ تصویر سطح صافی از کلسیم سیلیکات هیدراته شده دیده می شود، که به نظر روی یک دانه سیمان رشد کرده و سطح آن را فرا گرفته است.



شکل ۸: ریزنگارهای الکترونی

#### ۴. نتیجه گیری

برای مشاهده اثر شرایط عمل آوری در طولانی مدت روی خصوصیات مکانیکی و الکتریکی بتن فراتوانمند الیافی طرح های اختلاط تحت دو شرایط عمل آوری گرم و استاندارد قرار گرفته و در سنین ۲۸ روزه و ۶ ماهه آزمایشات برنامه ریزی شده روی آنها انجام شد. برای بررسی اثر مقادیر مختلف دوده سیلیس و الیاف پلی وینیل الکل روی خصوصیات مکانیکی و الکتریکی آزمایشات برای درصدهای متفاوت این مواد تکرار شد. با توجه به خروجی آزمایشات نتایج را زیر قابل ارائه است:

۱. مقاومت فشاری بتن فراتوانمند وابسته به درصد دوده سیلیس است. با افزایش درصد دوده، مقاومت فشاری نیز افزایش می یابد. حتی در درصدهای بالای دوده سیلیس نیز کاهش در مقاومت فشاری دیده نشد. در هر دو سن نمونه های تحت عمل آوری با آب گرم مقادیر پایین تری را از خود به نمایش گذاشتند.

۲. مقاومت خمشی بیشتر تحت تاثیر مقدار الیاف است. هرچه درصد الیاف بالاتر رود امکان ایجاد پل الیافی میان ریز ترک ها و به تاخیر افتادن گسترش ترک ها بیشتر می شود. از طرف دیگر ذرات دوده سیلیس منجر به ترد شدن رفتار نمونه شده و سبب کاهش مقاومت خمشی می گردند. اما از طرف دیگر ذرات دوده به پخش بهتر و یکنواخت الیاف داخل ماتریس سیمانی کمک نموده و از این طریق رفتار

خمشی را بهبود می بخشند. پس در بحث مقاومت خمشی مقدار جایگزینی دوده سیلیس اهمیت فراوانی دارد. در خصوص تاثیر شرایط عمل آوری، نمونه های با عمل آوری استاندارد مقادیر بالاتری از مقاومت خمشی را نشان دادند.

۳. در بحث مقاومت الکتریکی در تمام موارد مقادیر برداشت شده از نمونه های با عمل آوری استاندارد بالاتر از نمونه های با عمل آوری گرم بود. مقدار جایگزینی دوده سیلیس فاکتور تعیین کننده ای مشاهده گردید. به دلیل نقش های مختلف دوده سیلیس در ماتریس سیمانی، تا حدود ۳۰٪ جایگزینی افزایش مقاومت الکتریکی چشمگیر نبوده ولی با افزایش این درصد مقاومت الکتریکی به شدت افزایش می یابد.

۴. بررسی ریزنگارهای الکترونی، چگالی بسیار بالای خمیر سیمانی و مرز قوی میان سنگدانه و خمیر سیمانی و یاف با خمیر سیمان را به طور مناسبی تائید می کند.

## مراجع

- [1] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review, *Cement and Concrete Composites* 73 (2016) 267-280
- [2] J. Charron, E. Denarié, E. Brühwiler, Permeability of UHPFRC under high stresses, *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, RILEM Publications SARL, 2004.
- [3] P. Richard, M. Cheyrezy, *Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength*, Metha, PK (edition) *Concrete Technology Past Present and Future*, SP.
- [4] M. Reda, N. Shrive, J. Gillott, Microstructural investigation of innovative UHPC, *Cement and Concrete Research* 29(3) (1999) 323-329
- [5] T. Ahlborn, D. Harris, D. Misson, E. Peuse, Characterization of strength and durability of ultra-high-performance concrete under variable curing conditions, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2251) (2011) 68-75
- [6] P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes, *Cement and concrete research* 25(7) (1995) 1501-1511
- [7] J.J. Park, S.T. Kang, K.T. Koh, S.W. Kim, Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion, *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*, 2008, pp. 105-112.
- [8] S. Zhao, J. Fan, W. Sun, Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials* 50 (2014) 540-548
- [9] S.H. Park, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites* 34(2) (2012) 172-184
- [10] K. Wille, S. El-Tawil, A. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement and Concrete Composites* 48 (2014) 53-66
- [11] S.-T. Kang, J.-K. Kim, The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), *Cement and Concrete Research* 41(10) (2011) 1001-1014
- [12] M.-J. Kim, D.-Y. Yoo, S. Kim, M. Shin, N. Banthia, Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 107 (2018) 30-40
- [13] D.L. Nguyen, G.S. Ryu, K.T. Koh, D.J. Kim, Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, *Composites Part B: Engineering* 58 (2014) 279-292
- [14] D.-Y. Yoo, S.-T. Kang, Y.-S. Yoon, Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers, *Composite Structures* 147 (2016) 220-230
- [15] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh, Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials* 25(11) (2011) 4144-4155
- [16] F. Wenner, A method for measuring earth resistivity, *Journal of the Washington Academy of Sciences* 5(16) (1915) 561-563
- [17] P. Gu, Z. Xu, P. Xie, J. Beaudoin, Application of AC impedance techniques in studies of porous cementitious materials:(I): influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance, *Cement and Concrete Research* 23(3) (1993) 531-540

- [18] Z. Xu, P. Gu, P. Xie, J. Beaudoin, Application of AC impedance techniques in studies of porous cementitious materials:(II): Relationship between ACIS Behavior and the Porous Microstructure, *Cement and concrete research* 23(4) (1993) 853-862
- [19] W. McCarter, R. Brousseau, The AC response of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* 20(6) (1990) 891-900
- [20] K. Brantervik, G. Niklasson, Circuit models for cement based materials obtained from impedance spectroscopy, *Cement and concrete research* 21(4) (1991) 496-508
- [21] W. Morris, E. Moreno, A. Sagüés, Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe, *Cement and concrete research* 26(12) (1996) 1779-1787
- [22] S. Millard, L. Sadowski, Novel method for linear polarisation resistance corrosion measurement, *e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics* 14 (2009)
- [23] S. Wen, D. Chung, The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement, *Carbon* 44(11) (2006) 2130-2138
- [24] H. Li, H.-g. Xiao, J.-p. Ou, Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites, *Cement and Concrete Composites* 28(9) (2006) 824-828
- [25] B. Chen, J. Liu, K. Wu, Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading, *Cement and concrete research* 35(11) (2005) 2183-2191
- [26] S.P. Wu, L. Mo, Z. Shui, Piezoresistivity of graphite modified asphalt-based composites, *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2003, pp. 391-396.
- [27] S. Wen, D. Chung, Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions, *Cement and Concrete Research* 30(8) (2000) 1289-1294
- [28] F. Reza, G.B. Batson, J.A. Yamamuro, J.S. Lee, Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites, *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(5) (2003) 476-483
- [29] H.V. Le, D.J. Kim, Effect of matrix cracking on electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites in tension, *Construction and Building Materials* 156 (2017) 750-760
- [30] D.L. Nguyen, J. Song, C. Manathamsombat, D.J. Kim, Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension, *Composites Part B: Engineering* 69 (2015) 159-168
- [31] R. Ranade, J. Zhang, J.P. Lynch, V.C. Li, Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites, *Cement and Concrete Research* 58 (2014) 1-12
- [32] A. C150, Standard specification for Portland cement, American Society for Testing and Materials:(ASTM) International West Conshohocken, PA, 2002.
- [33] A. ASTM, Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures, (2011)
- [34] C. ASTM, Standard specification for chemical admixtures for concrete, Annual book of ASTM standards (2013)
- [35] A.S.f. Testing, M.C.C.-o. Cement, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International 2013.
- [36] B. Chen, K. Wu, W. Yao, Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites, *Cement and Concrete Composites* 26(4) (2004) 291-297
- [37] J. Cao, D. Chung, Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement, *Cement and Concrete research* 34(3) (2004) 481-485
- [38] P. Xie, P. Gu, J.J. Beaudoin, Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres, *Journal of Materials Science* 31(15) (1996) 4093-4097
- [39] S. Wen, D. Chung, Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement, *Cement and Concrete Research* 31(1) (2001) 141-147
- [40] B. Han, X. Guan, J. Ou, Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors, *Sensors and Actuators A: Physical* 135(2) (2007) 360-369
- [41] B. Han, S. Ding, X. Yu, Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review, *Measurement* 59 (2015) 110-128
- [42] A. ASTM, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, (2008)
- [43] C. ASTM, 349-97. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), Annual book of ASTM 4 (2002)
- [44] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, O. Copuroglu, Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash, *Cement and Concrete Research* 41(11) (2011) 1104-1111
- [45] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construction and Building Materials* 101 (2015) 741-751
- [46] N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, V. Baroghel-Bouny, Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume, *Cement and Concrete Research* 106 (2018) 23-32