

بررسی تجربی و ارزیابی چندمعیاره خواص مکانیکی، الکتریکی کامپوزیت سیمانی حاوی سرباره کوره بلند آهن گدازی (GGBFS)، نانولوله‌های هالوزیت و دوده سیلیسی

حسین دهقان

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده سازه و زلزله دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

امیر طریقت *

دانشیار، دانشکده سازه و زلزله دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

حامد ارزانی

دانشیار، دانشکده سازه و زلزله دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مصطفی آدرسی

دانشیار، دانشکده ژئوتکنیک و آب دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

چکیده

توسعه کامپوزیت‌های سیمانی چندکاره هوشمند برای پایش سلامت زیرساخت‌ها امری حیاتی است. اما طراحی این مواد به دلیل تعاملات پیچیده، وابسته به زمان و اغلب متضاد بین افزودنی‌های معدنی و نانو، یک چالش مهندسی قابل توجه محسوب می‌شود. این مطالعه یک تحقیق آزمایشگاهی جامع در یک چارچوب سیستماتیک با استفاده از آرایه متعامد تاگوچی L_8 ، برای مهندسی خواص این گونه کامپوزیت‌ها که در آن تأثیر چهار عامل کلیدی - سرباره کوره بلند (GGBFS)، دوده سیلیسی (SF)، نانولوله‌های هالوزیت (HNTs) و نسبت آب به خمیر سیمانی (W/B) را بر مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و یکپارچگی ریزساختاری از طریق سرعت امواج فراصوت (UPV) در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد را ارائه می‌دهد. نتایج، حاکی از تأثیر متمایز و متضاد GGBFS و SF بر مقاومت الکتریکی است بطوریکه GGBFS مقاومت الکتریکی را افزایش داده، اما SF به طور قابل توجهی موجب کاهش آن می‌گردد و یک ماتریس رسانا مناسب برای کاربردهای خودحسگری ایجاد می‌کند. تحلیل واریانس (ANOVA) تأیید کرد که GGBFS تأثیرگذارترین عامل بر مقاومت الکتریکی درازمدت بوده و در مقابل، HNTها نقش اصلی را در بهبود مقاومت فشاری سنین اولیه نشان دادند. بر اساس تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N)، یک ترکیب بهینه شناسایی شد که مسیری روشن برای ایجاد تعادل بین عملکرد مکانیکی و خواص عملکردی سفارشی فراهم می‌کند. این تحقیق، راهنمای عملی و ارزشمندی را برای طراحی منطقی کامپوزیت‌های سیمانی چندکاره ارائه می‌دهد و مهندسان را قادر می‌سازد تا ترکیبات مواد را برای دستیابی به عملکرد قابل پیش‌بینی و متناسب با کاربرد خاص انتخاب کنند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت سیمانی چندمنظوره، مقاومت ویژه الکتریکی، سرباره کوره بلند (GGBFS)، دوده سیلیسی، نانولوله هالوزیت (HNTs)، روش تاگوچی، بهینه‌سازی چندمعیاره

* نویسنده مسئول: tarighat@sru.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پایه سیمانی، به‌ویژه بتن، به‌دلیل مزایایی چون تطبیق‌پذیری و مقرون‌به‌صرفه بودن، پرکاربردترین مصالح ساختمانی محسوب می‌شوند [۱]. با این حال، معایب ذاتی بتن مانند شکنندگی و مقاومت کششی پایین، دوام و عمر مفید آن را محدود می‌کند [۲]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، تحقیقات بر توسعه بتن‌های با عملکرد بالا (HPC) از طریق افزودن مواد سیمانی تکمیلی (SCMs) و افزودنی‌های نانومقیاس متمرکز شده است. این رویکرد پتانسیل قابل توجهی در بهبود عملکرد مکانیکی، افزایش دوام و ایجاد ویژگی‌های نوین در ماتریس سیمانی دارد [۳].

نانولوله‌های هالوزیت (HNTs)، که ساختاری لوله‌ای و چندلایه دارند [۴]، به‌دلیل مزایایی چون سطح ویژه بالا، مقاومت مکانیکی زیاد و هزینه پایین، افزودنی مناسبی برای بهبود خواص بتن محسوب می‌شوند [۶]. سیلیس موجود در سطح این نانولوله‌ها با محصولات هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و با تشکیل فازهای C-S-H و C-A-S-H، ریزساختار ماتریس را بهبود می‌بخشد. این فرآیند در نهایت به افزایش مقاومت فشاری، کاهش واکنش‌های مخرب قلیایی-سنگ‌دانه‌ای و تولید بتنی پایدار و با عملکرد بالا منجر می‌شود [۷].

سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) افزودنی‌ای با مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی است که از فرآوری سرباره مذاب تولید می‌شود [۸]. این ماده با خاصیت هیدرولیکی نهفته [۱۰]، در واکنش هیدراتاسیون شرکت کرده و با تولید ژل C-S-H اضافی، ریزساختاری متراکم‌تر ایجاد می‌کند [۱۱]. اگرچه این واکنش کندتر از سیمان پرتلند است و مقاومت اولیه پایین‌تری به همراه دارد، اما در نهایت مقاومت فشاری درازمدت را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۲، ۱۳]؛ به طوری که در درصدهای جایگزینی بالا، مقاومت ۲۸ روزه آن می‌تواند از بتن معمولی فراتر رود [۱۴].

دوده سیلیسی (میکروسیلیس)، یک پوزولان بسیار واکنش‌پذیر است که به طور گسترده برای بهبود عملکرد مکانیکی و دوام بتن استفاده می‌شود. ذرات فوق‌ریز آن با کاهش تخلخل و افزایش

چگالی ماتریس سیمانی، مقاومت فشاری را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهند [۱۵]. جایگزینی جزئی سیمان (تا ۱۵٪) با دوده سیلیسی، مقاومت فشاری و خمشی را ارتقا داده و در دوز ۱۰٪، مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر محیط‌های اسیدی ایجاد می‌کند [۱۶]. علاوه بر این، دوده سیلیسی مقاومت الکتریکی ویژه بتن را که برای جلوگیری از خوردگی در سازه‌های مسلح حیاتی است، به شدت افزایش می‌دهد. تحقیقات نشان داده که جایگزینی ۶٪ و ۱۲٪ آن، مقاومت الکتریکی را به ترتیب ۲٫۵ و ۵ برابر بتن معمولی افزایش می‌دهد [۱۷]. این بهبودها به‌دلیل اصلاح ساختار حفرات و کاهش نفوذپذیری است که انتقال یون را مهار می‌کند.

در حالی که خواص متمایز مواد سیمانی مکمل (SCMs) مانند سرباره کوره بلند آهن‌گدازی (GGBFS) و دوده سیلیسی (SF) به صورت جداگانه به خوبی شناخته شده‌اند، همواره این نیاز احساس شده است که عملکردهای متضاد آنها بر خواص عملکردی در یک سیستم چندجزئی واحد، درک گردد. به ویژه، عملکرد این مواد سیمانی مکمل پرکاربرد بر مقاومت الکتریکی ویژه - خاصیتی پایدار و مهم برای کاربردهای خودحسگر (self-sensing) - به منظور مهندسی خواص الکتریکی هدفمند در مواد، باید مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، چگونگی بهینه‌سازی چنین سیستم‌های پیچیده‌ای با عوامل دارای برهم‌کنش (مانند نانومواد از جمله نانولوله‌های هالوزیت (HNTs) و نسبت آب به چسب‌بند (W/B)) نیز نیازمند رویکردی علمی، فراتر از فرآیند سنتی آزمون و خطا است. هدف این پژوهش، پر کردن این خلاء از طریق به‌کارگیری آرایه متعامد L_8 تاگوجی است تا نه تنها به بهینه‌سازی دست یابد، بلکه به طور خاص تعادلی میان خواص مکانیکی و خواص الکتریکی مهندسی‌شده را تعریف نماید. در این راستا، یک مطالعه سیستماتیک بر روی عملکردهای رقیب میان GGBFS و SF، با افزودن HNTs و تغییر نسبت W/B، بر پاسخ‌هایی نظیر مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی ویژه انجام می‌شود.

هدف نهایی، آشکار ساختن مسیری برای طراحی نسل آینده کامپوزیت‌های سیمانی چندمنظوره با خواص مهندسی‌شده و قابل تنظیم به منظور دستیابی به عملکردهای سطح بالا است.

¹- Supplementary Cementitious Materials

۲- فرایند آزمایشگاهی

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها و اعتبارسنجی

با توجه به تعدد متغیرها در این پژوهش، اجرای رویکرد فاکتوریل کامل بسیار زمان‌بر و پرهزینه بود. از این رو، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد تا با به کارگیری آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌ها به حداقل رسیده و کارایی فرآیند پژوهش افزایش یابد [۱۸]. این تکنیک که توسط دکتر گنجی تاگوچی توسعه یافته [۱۹]، ضمن صرفه‌جویی قابل توجه در زمان و منابع [۲۰]، بر «طراحی استوار» (Robust Design) تمرکز دارد. این امر با کاهش حساسیت نتایج به عوامل نویز (اغتشاش)، به بهبود عملکرد و پایداری کلی سیستم کمک می‌کند [۲۱].

در پژوهش حاضر، تأثیر چهار متغیر کنترل‌شده بر خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت سیمانی مورد ارزیابی قرار گرفت. این متغیرها شامل نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) در دو سطح ۰٫۳۵ و ۰٫۴۰، دوده سیلیسی (SF) در سطوح ۰٪ و ۷٪، سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) در چهار سطح ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪، و هالوزیت در دو سطح ۵٪ و ۱۰٪ بودند. انتخاب این عوامل و سطوح آن‌ها بر اساس پتانسیل بالایشان در تأثیرگذاری بر خواص کلیدی بتن خودحسگر صورت گرفت که برای عملکرد مؤثر آن در کاربردهای واقعی حیاتی است.

برای طراحی آزمایش‌ها، آرایه متعامد L8 انتخاب شد که با سه عامل دو سطحی و یک عامل چهار سطحی پژوهش، تناسب کامل داشت و امکان مطالعه سیستماتیک را با تنها ۸ آزمایش فراهم کرد. در رویکرد تاگوچی، علاوه بر بررسی اثرات اصلی، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای ارزیابی کیفیت و پایداری نتایج استفاده می‌شود [۲۲]. این نسبت، غلبه سیگنال مطلوب (اثر متغیرهای کنترلی) بر نویز (تغییرات ناخواسته) را می‌سنجد و مقدار بالاتر آن نشان‌دهنده پاسخی پایدار و استوار در برابر عوامل نویز است [۲۳].

به منظور صحت‌گذاری، نتایج آزمایشگاهی دو طرح اختلاط جدید با پیش‌بینی‌های مدل تاگوچی مقایسه گردید. اختلاف مشاهده‌شده که کمتر از ۱۰٪ بود، با در نظر گرفتن پراکندگی ذاتی داده‌ها رضایت‌بخش ارزیابی شد. علاوه بر این، از مقدار پی (P-value) برای ارزیابی معناداری آماری استفاده شد؛ به طوری که مقادیر کمتر از ۰٫۰۵، به عنوان شواهدی بر معنادار بودن نتایج و دلیلی برای

رد فرضیه صفر (عدم وجود اثر) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ترکیبات مخلوط‌ها بر اساس روش بهینه‌سازی تاگوچی

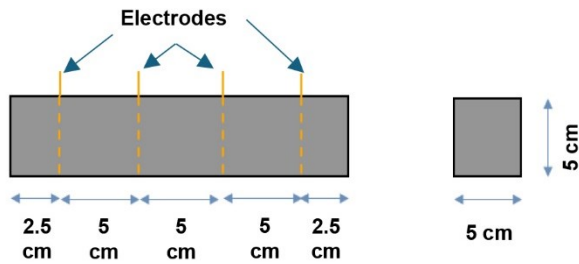
کد طرح اختلاط	سرباره (GGBFS) (%)	هالوزیت (%)	نسبت آب به مواد سیمانی	دوده سیلیسی (%)
Mix 1	۰	۵	۴/۰	۰
Mix 2	۰	۱۰	۳۵/۰	۷
Mix 3	۵	۵	۴/۰	۷
Mix 4	۵	۱۰	۳۵/۰	۰
Mix 5	۱۰	۵	۳۵/۰	۰
Mix 6	۱۰	۱۰	۴/۰	۷
Mix 7	۲۰	۵	۳۵/۰	۷
Mix 8	۲۰	۱۰	۴/۰	۰

۲-۲- ویژگی‌های مواد

در تهیه ملات‌ها از سیمان پرتلند (مطابق با استاندارد ملی ایران ۳۸۹) و ماسه سیلیسی (بر اساس ASTM C778-02 [۲۴]) استفاده شد. نانولوله‌های هالوزیت (HNTs) و سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) که ترکیب شیمیایی هر دو با XRF تعیین گردید (جدول ۳)، به ترتیب در درصدهای وزنی ۵٪ و ۱۰٪ و نیز ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به عنوان جایگزین سیمان به کار رفتند. برای تقویت خواص مکانیکی، دوده سیلیسی در مقادیر ۰٪ و ۷٪ افزوده شد. نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) در دو سطح ۰٫۳۵ و ۰٫۴۰ تنظیم گردید و جهت بهبود روانی، ۱/۳٪ ابرروان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر (نسبت به وزن سیمان) به تمامی مخلوط‌ها اضافه شد.

جدول ۲- دانه‌بندی ماسه سیلیسی استاندارد مطابق با ASTM C778-02

اندازه الک	ماسه ۲۰-۳۰	ماسه درجه‌بندی‌شده
۱٫۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)	۱۰۰	۱۰۰
۸۵۰ میکرومتر (شماره ۲۰)	۸۵ تا ۱۰۰	۱۰۰
۶۰۰ میکرومتر (شماره ۳۰)	۵ تا ۱۰	۹۶ تا ۱۰۰
۴۲۵ میکرومتر (شماره ۴۰)	-	۶۵ تا ۷۵
۳۰۰ میکرومتر (شماره ۵۰)	-	۲۰ تا ۳۰
۱۵۰ میکرومتر (شماره ۱۰۰)	-	۴ تا ۰

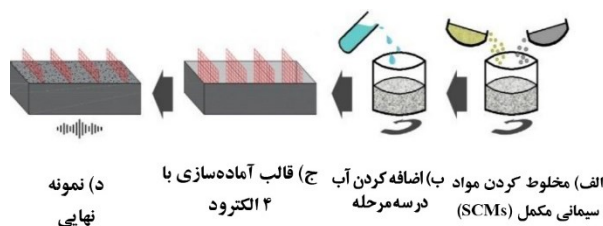


شکل ۱- پیکربندی‌های هندسی نمونه‌های آماده شده برای

آزمون مقاومت الکتریکی

۲-۴- فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا، مواد خشک (سیمان، ماسه، GGBFS و هالوزیت) طبق طرح اختلاط وزن و به طور یکنواخت در میکسر مخلوط شدند. سپس، آب و فوق روان کننده به صورت مرحله‌ای اضافه و اختلاط به مدت حداقل سه دقیقه ادامه یافت. ملات حاصل در قالب‌ها ریخته و برای تراکم کامل، ویریه شد (شکل ۲). با توجه به تأخیر در گیرش ناشی از GGBFS [۲۷] که به اثر رقیق‌شدگی سیمان و ماهیت هیدرولیکی نهفته آن مربوط است [۲۸]، قالب‌ها پس از ۴۸ ساعت باز شدند. در نهایت، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در حمام آب با دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. برنامه آزمایشگاهی این پژوهش بر دو آزمون اصلی متمرکز بود: سنجش مقاومت فشاری و بررسی رسانایی الکتریکی. این آزمون‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز پس از ساخت نمونه‌ها انجام شدند تا تحول خواص مکانیکی و الکتریکی ملات در طول زمان و تحت تأثیر ترکیبات مختلف، مورد مطالعه قرار گیرد. جزئیات هر آزمون در ادامه تشریح شده است.



شکل ۲- آماده‌سازی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی نیمه‌رسانا با

استفاده از مواد سیمانی مکمل (SCMs)

۲-۵- آزمون مقاومت فشاری

برای ارزیابی مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب (مطابق با ASTM C511 [۲۹]) مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون‌ها در سنین ۷ و

جدول ۳- ترکیب شیمیایی هالوزیت، GGBFS و دوده سیلیسی طبق تحلیل با روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

هالوزیت (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	Na ₂ O
۳/۱۱۸	۱۱/۶۲۶	۷/۱۵۲	۳۰/۱۱۲	۹/۷۷	۱/۵۹۸
۹				۵	
K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	
۲/۶۹۱	۰/۷۶۳	۰/۱۳۳	۰/۲۱۶	۱/۰۳	۸
سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	Na ₂ O
۳/۳۲۲	۸/۳۱۶	۰/۱۶۵	۲۶/۵۲۰	۸/۶۷	۰/۶۹۳
۳				۸	
K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	
۱/۰۵۷	۱/۱۵۸	۰/۹۲۱	۰/۰۰۵	-	
دوده سیلیسی (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	Na ₂ O
۸۹/۳۳	۰/۴۱۷	۱/۰۰۹	۰/۵۶۴	۱/۰۴۵	۰/۸۷۱
				۲	
K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	
۱/۴۵۳	۰/۰۶۲	۰/۰۶۷	۰/۱۶۵	۳/۶۶	

۲-۳- مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

برای ارزیابی مقاومت فشاری، از هر طرح اختلاط ۱۵ نمونه مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری تهیه و در پنج سن مختلف (از ۷ تا ۳۶۰ روز) در گروه‌های سه‌تایی مورد آزمایش قرار گرفت. علاوه بر این، جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، برای هر اختلاط ۶ نمونه منشوری $20 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری با توری‌های فولادی ضد زنگ تعبیه شده ساخته شد. این نمونه‌ها، مطابق شکل ۱، به چهار بخش (دو بخش انتهایی $2/5$ سانتی‌متری و دو بخش میانی 5 سانتی‌متری) تقسیم شدند تا مطالعه رفتار الکتریکی در نواحی مختلف نمونه امکان‌پذیر گردد [۲۵، ۲۶].

۲۸ روز در شرایط اشباع با سطح خشک (SSD) و در سنین ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز تحت شرایط آزمایشگاهی انجام شد. به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر رفتار مکانیکی، مقاومت فشاری نهایی برای هر طرح اختلاط در هر سن، به عنوان میانگین نتایج حاصل از سه نمونه گزارش گردید.

۲-۶-آزمایش اندازه‌گیری مقاومت ویژه

اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به عنوان معیاری معتبر برای ارزیابی تحولات ریزساختاری، شامل تخلخل، پیوستگی منافذ و رسانایی یونی محلول حفره‌ای [۳۰، ۳۱]، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به تأثیر قابل توجه افزودنی‌های مورد استفاده (GGBFS، HNTs و SF) بر ریزساختار، این آزمون بینش‌های مهمی در خصوص مکانیسم‌های واکنش آن‌ها با ماتریس سیمانی فراهم می‌آورد. این رویکرد نه تنها به درک بهتر بهبودهای ریزساختاری ناشی از این مواد کمک می‌کند، بلکه ارزیابی عملکرد چندمنظوره کامپوزیت را نیز تکمیل می‌نماید.

هدایت الکتریکی، معیاری برای سنجش توانایی یک ماده در انتقال جریان الکتریکی است و به سهولت حرکت بارهای الکتریکی در ساختار آن بستگی دارد. این خاصیت که بر حسب زیمنس بر متر (S/m) اندازه‌گیری می‌شود، تحت تأثیر ساختار الکترونیکی و ترکیب شیمیایی ماده قرار دارد [۳۲] و درک آن برای کاربردهای مختلف در حوزه‌هایی چون الکترونیک، علم مواد و مهندسی عمران ضروری است.

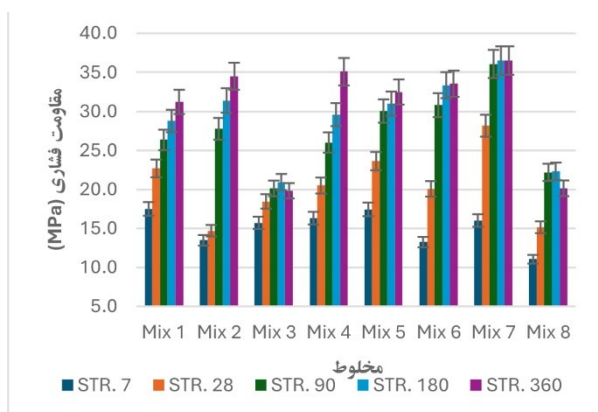
مقاومت ویژه، خاصیتی از ماده است که مقاومت بر واحد طول و واحد سطح مقطع را تعریف می‌کند و مستقل از اندازه و شکل نمونه می‌باشد. این خاصیت تنها به ترکیب و خواص ساختاری ماده وابسته است. رابطه بین مقاومت ویژه (ρ) و مقاومت الکتریکی (R) از طریق رابطه $\rho = R \times A/L$ تعریف می‌شود، که در آن ρ مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر (Ωm)، R مقاومت اندازه‌گیری شده بر حسب اهم (Ω)، A مساحت سطح مقطع بر حسب متر مربع (m^2) و L طول بین الکترودها برای اندازه‌گیری مقاومت بر حسب متر (m) است. بنابراین، مقاومت ویژه معیاری از سهولت یا دشواری عبور جریان در یک ماده، صرف‌نظر از ابعاد آن، می‌باشد [۳۳].

مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه LCR متر متصل به شبکه‌های فولاد زنگ‌نزن تعبیه‌شده در نمونه‌های منشوری

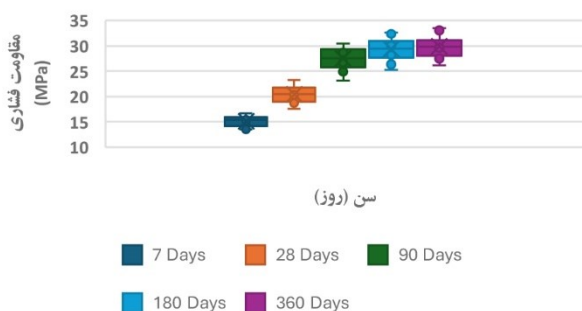
۳- نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

هدف اصلی این تحقیق، طراحی و معرفی یک کامپوزیت سیمانی پیشرفته با خواص مکانیکی و الکتریکی ارتقایافته و شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر این ویژگی‌ها بود. به همین منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سیستماتیک بر پایه طرح اختلاط‌های دقیق طراحی شده برای تحلیل اثرات مستقل و تعاملی متغیرهای ترکیبی به اجرا درآمد.

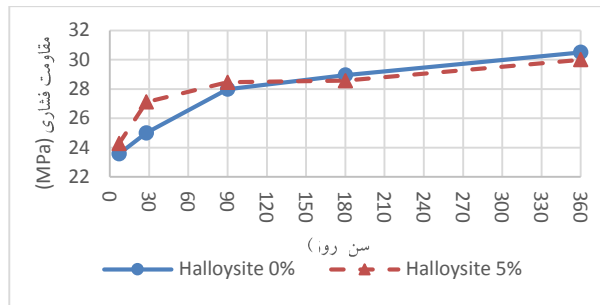


شکل ۳- توزیع داده‌های مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی در سنین مختلف بر اساس طرح‌های اختلاط متفاوت



شکل ۴- توزیع مقاومت فشاری در سنین مختلف عمل‌آوری

افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیتی در دوره‌های عمل‌آوری مختلف (شکل ۳)، روندی مشابه بتن معمولی را در توسعه مقاومت (شکل ۴) نشان می‌دهد. فعالیت‌های آتی بر بررسی



شکل ۶- تأثیر هالوئزیت بر مقاومت فشاری در طول زمان

۳-۳-۳- نسبت آب به مواد سیمانی

نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ تأثیری مثبت بر مقاومت فشاری (SN Ratios) در تمامی سنین دارد که با گذشت زمان معنادارتر می‌شود (شکل ۷). این نسبت در سنین اولیه (۷ روز) به یکنواختی مقاومت کمک می‌کند، اما در سنین بالاتر (۱۸۰ روز) پراکندگی را افزایش می‌دهد.



شکل ۷- تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری در طول زمان

بهبود مقاومت عمدتاً به دلیل کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار بتن است. در حالی که کاهش روانی مخلوط در سنین اولیه می‌تواند بر پراکندگی نتایج تأثیر بگذارد، اما با تکمیل هیدراتاسیون، ساختار پایدارتر شده و یکنواختی بهبود می‌یابد.

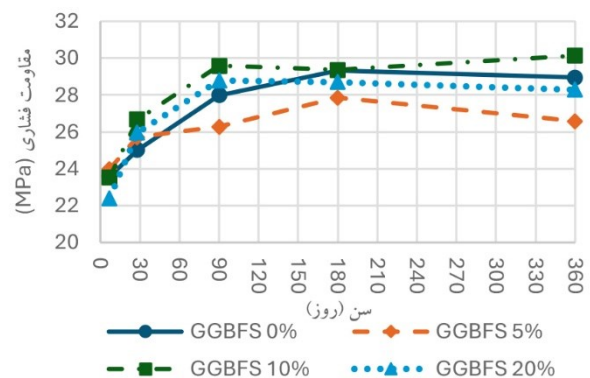
۳-۱-۴- دوده سیلیسی

تأثیر دوده سیلیس ۷٪ بر یکنواختی مقاومت، وابسته به سن است؛ به طوری که در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) باعث افزایش پراکندگی شده، اما در سنین بالاتر (۳۶۰ روز) با کاهش انحراف معیار، یکنواختی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این بهبود ناشی از واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل C-S-H است که تراکم ساختار بتن را افزایش می‌دهد. در مقابل، عدم استفاده از دوده سیلیس منجر به ریزساختار ضعیف‌تر و ناهمگن‌تر می‌شود. این یافته‌ها با تحقیقات پیشین [۴۹-۵۲] هماهنگ است و در داده‌های آزمایشی نیز مشاهده می‌شود (شکل ۸).

اثرات وابسته به زمان ویژگی‌های مصالح بر عملکرد مکانیکی و نقش آن‌ها در مکانیسم‌های توسعه مقاومت متمرکز خواهد بود.

۳-۱-۱- سرباره کوره بلند آهن‌گدازی (GGBFS)

این مطالعه با روش تاگوچی نشان داد که تأثیر GGBFS بر مقاومت فشاری و یکنواختی کامپوزیت سیمانی به سن نمونه وابسته است [۲۷، ۴۰، ۴۱]. در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز)، GGBFS ۵٪ به دلیل واکنش‌های پوزولانی ناگهانی، یکنواختی مقاومت را کاهش داد. اما در سنین بالاتر (۹۰ و ۳۶۰ روز)، GGBFS ۱۰٪ با تکمیل واکنش‌های پوزولانی، تشکیل ژل C-S-H بیشتر و کاهش تخلخل، یکنواختی و مقاومت را به طور چشمگیری بهبود بخشید (شکل ۵) [۴۲]. این بهبود ناشی از واکنش GGBFS با $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و تولید C-S-H اضافی است که خواص مکانیکی را تقویت می‌کند [۴۳].



شکل ۵- تأثیر GGBFS بر مقاومت فشاری در طول زمان

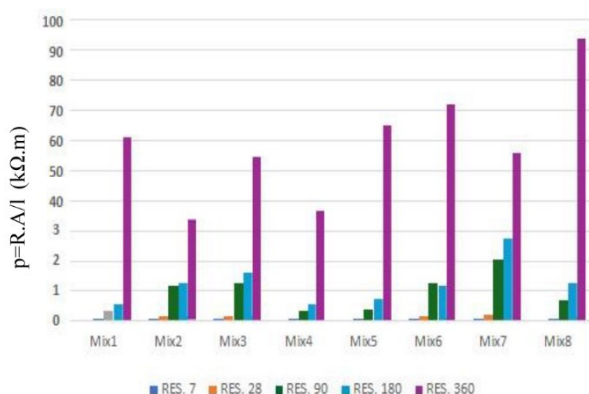
۳-۱-۲- هالوئزیت

نانولوله‌های هالوئزیت (HNTs) تأثیری مثبت و معنادار بر مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) دارند (شکل ۶)، اما این اثر در سنین بالاتر (۹۰ روز به بعد) از نظر آماری معنادار نیست. تأثیر HNTs بر یکنواختی مقاومت نیز وابسته به سن است؛ به طوری که در ۷ روزگی پراکندگی را افزایش داده، در ۹۰ روزگی یکنواختی را بهبود بخشیده و در ۳۶۰ روزگی مجدداً پراکندگی را افزایش می‌دهد. HNTs از طریق واکنش‌های پوزولانی، بهبود ساختار داخلی [۴۴، ۴۵، ۴۶] و همچنین پر کردن ریزترک‌ها و ایجاد پل‌های نانولوله‌ای [۴۷، ۴۸] به عنوان تقویت کننده عمل می‌کنند.

نمودار رتبه‌بندی (شکل ۱۰) نیز نشان می‌دهد که تأثیر شاخص‌ها بر مقاومت با زمان تغییر می‌کند: هالوژیت در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) بیشترین تأثیر را دارد، سپس GGBFS در میان‌مدت (۹۰ و ۱۸۰ روز) و در نهایت نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) در بلندمدت (۳۶۰ روز) غالب می‌شود. دوده سیلیسی در تمام دوره‌ها کمترین تأثیر را نشان می‌دهد. این تحلیل بر پایداری تأثیر GGBFS و W/B در طول زمان و ضرورت توجه هم‌زمان به اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت در بهینه‌سازی طرح اختلاط تأکید می‌کند.

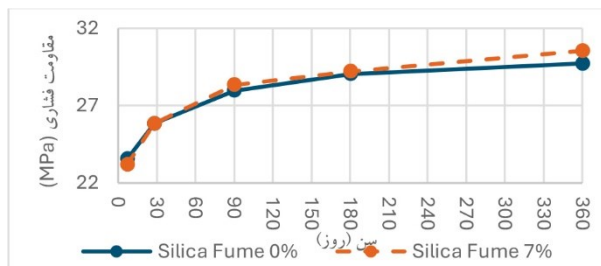
۳-۲- مقاومت ویژه الکتریکی

تحلیل آماری نشان داد که بیشتر اثرات مشاهده‌شده از نظر آماری معنادار نیستند ($P\text{-value} > 0.05$)، به جز تأثیر دوده سیلیس در ۷ و ۲۸ روزگی و هالوژیت در ۷ و ۹۰ روزگی (شکل ۹). این نتایج بر اهمیت تکامل زمانی رفتار مواد در ارزیابی عملکرد بتن تأکید دارد. نمودار رتبه‌بندی (شکل ۱۰) نیز نشان می‌دهد که تأثیر پارامترها بر مقاومت با زمان تغییر می‌کند: هالوژیت در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) بیشترین تأثیر را دارد، سپس GGBFS در میان‌مدت (۹۰ و ۱۸۰ روز) و در نهایت نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) در بلندمدت (۳۶۰ روز) غالب می‌شود. دوده سیلیسی در تمام دوره‌ها کمترین تأثیر را نشان می‌دهد. این تحلیل بر پایداری تأثیر GGBFS و W/B در طول زمان و ضرورت توجه هم‌زمان به اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت در بهینه‌سازی طرح اختلاط تأکید می‌کند.



شکل ۱۱- مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی در سنین مختلف برای طرح‌های اختلاط گوناگون

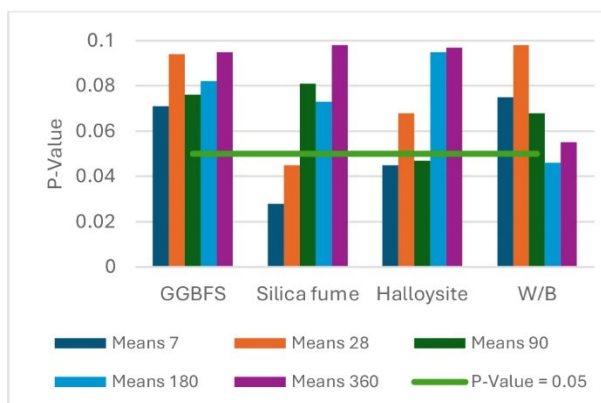
شکل ۱۳ مقادیر P-value تأثیر افزودنی‌ها بر مقاومت الکتریکی را در سنین مختلف نشان می‌دهد. دوده سیلیسی با تأثیر آماری



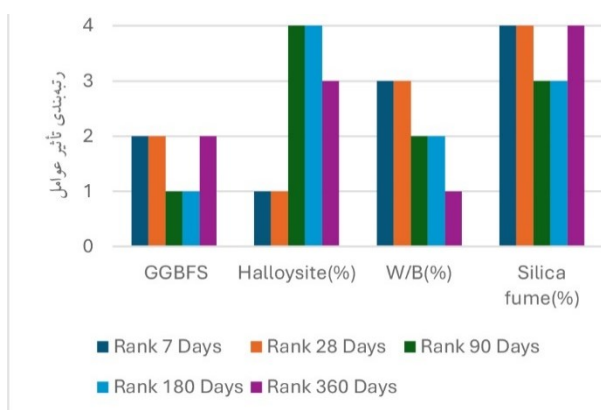
شکل ۸- تأثیر نسبت دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری در طول زمان

۳-۱-۵- بحث و بررسی مقاومت فشاری

تحلیل آماری نشان داد که بیشتر اثرات مشاهده‌شده از نظر آماری معنادار نیستند ($P\text{-value} > 0.05$)، به جز تأثیر دوده سیلیس در روزهای ۷ و ۲۸ و هالوژیت در روزهای ۷ و ۹۰ (شکل ۹). این نتایج بر اهمیت تکامل زمانی رفتار مواد در ارزیابی عملکرد بتن تأکید دارد.



شکل ۹- مقادیر P-value مقاومت فشاری میانگین کامپوزیت‌های سیمانی برای پارامترهای مختلف



شکل ۱۰- نمودار اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز (S/N) مقاومت فشاری. محور Y نشان‌دهنده رتبه تأثیر عامل است، به طوری که رتبه ۱ نشان‌دهنده مؤثرترین عامل بر پاسخ می‌باشد

باعث کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش هدایت پذیری شد که این یافته با تحقیقات پیشین [۵۶، ۵۵] همسو و از نظر آماری معنادار است ($P = ۰/۰۳۹$ در ۳۶۰ روز).

۳-۲-۲- هالوزیت

افزودن نانولوله‌های هالوزیت (HNTs) تأثیر متفاوتی بر مقاومت الکتریکی بتن دارد که به غلظت و سن آن بستگی دارد. در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز)، ۵٪ HNTs به دلیل توزیع بهتر ذرات، مقاومت الکتریکی را بیشتر از ۱۰٪ کاهش می‌دهد. اما در سنین بالاتر (۹۰ روز به بعد)، ۱۰٪ HNTs مقاومت بالاتری نشان می‌دهد. این افزایش مقاومت به واکنش پوزولانی HNTs و تشکیل ژل C-S-H نسبت داده می‌شود که با کاهش نفوذپذیری، مانع حرکت یون‌ها می‌گردد [۵۷، ۵۸]. بنابراین، با وجود اینکه ۵٪ HNTs ابتدا رسانایی را بهتر افزایش می‌دهد، اما عملکرد بلندمدت آن احتمالاً به دلیل ناپایداری ساختاری ضعیف‌تر است.

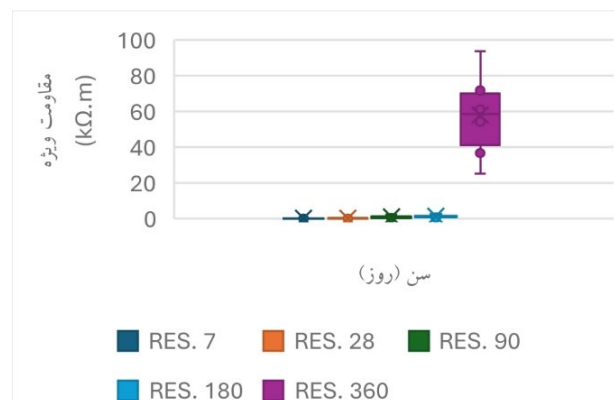
۳-۲-۳- نسبت آب به مواد سیمانی

نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) در سنین اولیه (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) تأثیری متوسط بر مقاومت الکتریکی بتن دارد، اما در سنین بالاتر (۱۸۰ و ۳۶۰ روز) این تأثیر به مراتب بیشتر است. این پدیده به اثرات بلندمدت w/b بر تخلخل و ساختار منافذ بتن بازمی‌گردد؛ نسبت w/b کمتر منجر به میکروساختار متراکم‌تر و تخلخل کمتر شده که به مرور زمان مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد. با پیشرفت هیدراتاسیون، کاهش تخلخل و افزایش چگالی ماتریس بتن، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد و بر اهمیت بهینه‌سازی w/b برای عملکرد بلندمدت بتن خودحسگر تأکید می‌کند.

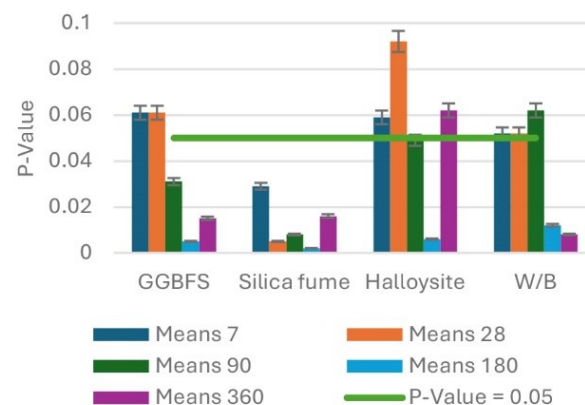
۳-۲-۴- دوده سیلیسی

افزودن ۷٪ دوده سیلیسی در تمام دوره‌های عمل‌آوری، مقاومت الکتریکی بتن را افزایش می‌دهد. این افزایش در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) به طور معناداری بالاتر از نمونه‌های بدون دوده سیلیسی بود ($P = ۰/۰۲۹$ در ۷ روز) و در دوره‌های طولانی‌تر (۹۰ تا ۳۶۰ روز) نیز ادامه داشت ($P = ۰/۰۳۳۰$ در ۳۶۰ روز). علت این پدیده، توانایی دوده سیلیسی در کاهش تخلخل از طریق واکنش پوزولانی و تشکیل ژل C-S-H است که رسانایی یونی را محدود می‌کند.

معنادار ($P\text{-value} < ۰/۰۲$) در تمام سنین، قوی‌ترین و فوری‌ترین اثر را دارد. در مقابل، تأثیر GGBFS از ۹۰ روزگی و نسبت آب به چسباننده (W/B) در سنین بالاتر (۱۸۰ و ۳۶۰ روز) معنادار می‌شود که نشان‌دهنده انباشت تدریجی تأثیر آن‌ها بر اثر تراکم ساختار و به دام افتادن یون‌ها است. نانولوله‌های هالوزیت تنها در ۱۸۰ روزگی تأثیر معناداری دارند. این نتایج بر نقش کلیدی سن کامپوزیت و مکانیزم‌های وابسته به زمان در تعیین تأثیر هر افزودنی بر خواص الکتریکی بتن تأکید می‌کند.



شکل ۱۲- توزیع مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی در دوره‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱۳- مقادیر P-value مقاومت الکتریکی میانگین کامپوزیت‌های سیمانی برای پارامترهای مختلف

۳-۲-۱- سرباره کوره بلند آهن‌گدازی (GGBFS)

تحقیقات نشان داد که تأثیر نسبت‌های مختلف GGBFS بر مقاومت الکتریکی بتن به سن آن بستگی دارد. در مراحل اولیه (۷ و ۲۸ روز)، نمونه بدون سرباره (۰٪) کمترین مقاومت را داشت. اما در دوره‌های طولانی‌تر (۹۰ تا ۳۶۰ روز)، ۱۰٪ و ۲۰٪ GGBFS

در مقایسه با روش‌های سنتی فاکتوریل کامل کاهش داد [۱۸-۲۰]. این رویکرد کارآمد، ضمن صرفه‌جویی قابل توجه در زمان و منابع [۲۱-۲۳]، امکان شناسایی روندهای اصلی، ارزیابی عوامل مؤثر و تحلیل برهم‌کنش‌های بین مواد را فراهم نمود. در این بخش، نتایج و مکانیزم‌های محتمل با استناد به منابع علمی مرتبط تحلیل می‌شوند.

۴-۱- تفسیر نتایج مقاومت فشاری

به طور کلی، در تمامی مخلوط‌ها مقاومت فشاری با افزایش دوره‌های عمل‌آوری بهبود یافت (شکل ۴)، که این روند کاملاً با ادامه واکنش هیدراتاسیون سیمان و مواد سیمانی مکمل (SCMs) هم‌راستا است [۶۲]. تحلیل تاگوجی نشان داد که عوامل مورد بررسی چگونه بر مقاومت فشاری تأثیر گذاشته و این تأثیرات در طول زمان عمل‌آوری تغییر می‌کنند (شکل ۱۰).

نسبت آب به مواد سیمانی (W/B): مطابق انتظار و همسو با مطالعات پیشین [۶۲]، کاهش نسبت W/B به ۰/۳۵ به‌دلیل ایجاد ساختاری متراکم‌تر با تخلخل کمتر، منجر به بهبود معنادار مقاومت فشاری (شکل ۷، $P = ۰/۰۵۱$ در ۳۶۰ روز) و سرعت پالس اولتراسونیک (شکل ۲۰، $P = ۰/۰۰۳$) گردید. نسبت W/B پایین‌تر با کاهش فضای اولیه پر شده از آب، به تشکیل ماتریسی چگال‌تر با منافذ ریزتر پس از فرآیند هیدراتاسیون می‌انجامد.

سرباره کوره بلند آهن‌گدازی (GGBFS): افزودن ۱۰٪ GGBFS تأثیر چشمگیری بر بهبود مقاومت فشاری بلندمدت داشت و عامل اصلی افزایش مقاومت در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روز بود (رتبه اول در شکل ۱۰). این افزودنی همچنین با کاهش معنادار انحراف معیار (شکل ۵، $P < ۰/۰۵$)، یکنواختی مقاومت را در سنین بالا افزایش داد. این اثر ناشی از هیدراتاسیون کند و واکنش پوزولانی GGBFS است که با تولید ژل C-S-H اضافی، ساختار میکروسکوپی بتن را در سنین بالاتر بهبود بخشیده و در نهایت مقاومت و دوام را افزایش می‌دهد [۷-۱۱، ۲۷، ۲۸، ۴۳].

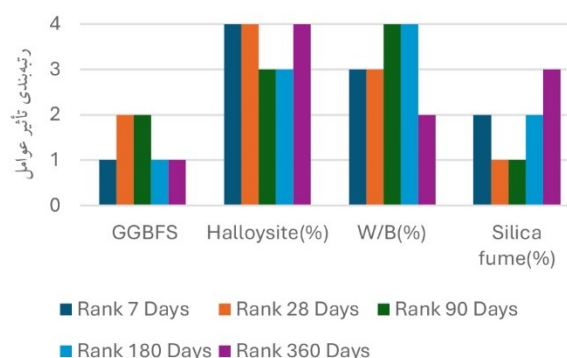
نانولوله‌های هالوزیت (HNT): افزودن ۵٪ HNT، مقاومت فشاری را در سنین اولیه (۷ و ۲۸ روز) به طور قابل توجهی افزایش داد و بیشترین تأثیر را در این بازه زمانی داشت (شکل ۱۰). این افزایش اولیه به‌دلیل نقش دوگانه HNT به عنوان نانوفیلرهایی که فضاهای خالی را پر می‌کنند [۷، ۳۵-۳۹، ۴۴-۴۸] و سایت‌های

همچنین، انحراف معیار پایین‌تر در نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی، نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر ساختار بتن است.

۳-۲-۵- بحث مقاومت ویژه الکتریکی

بررسی رتبه‌بندی‌ها (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که سرباره کوره بلند (GGBFS) با کسب رتبه اول در اکثر بازه‌های زمانی، بهترین عملکرد را بر مقاومت الکتریکی دارد. دوده سیلیسی در کوتاه‌مدت (۲۸ و ۹۰ روز) رتبه اول را کسب می‌کند، اما تأثیرش در بلندمدت کاهش می‌یابد. نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) در ابتدا ضعیف است اما در بلندمدت بهبود یافته و به رتبه دوم می‌رسد. در مقابل، هالوزیت در بیشتر دوره‌ها ضعیف‌ترین عملکرد را دارد.

در مجموع، سرباره (به‌عنوان کاهنده مقاومت) و دوده سیلیسی (به‌عنوان افزایش‌دهنده مقاومت) بیشترین تأثیر را بر مقاومت الکتریکی دارند، در حالی که تأثیر هالوزیت و نسبت W/B کمتر است. این نتایج بر اهمیت انتخاب دقیق افزودنی‌ها برای دستیابی به خواص الکتریکی مطلوب در کامپوزیت‌های سیمانی تأکید می‌کند.



شکل ۱۴- نمودار اثرات اصلی نسبت سیگنال به نویز (S/N) مقاومت الکتریکی. محور Y نشان‌دهنده رتبه تأثیر عامل است، به‌طوری که رتبه ۱ مؤثرترین عامل را نشان می‌دهد

۴- بحث و بررسی

هدف این مطالعه، فراتر از یافتن یک ترکیب بهینه، بررسی سیستماتیک اثرات ترکیبی درصدهای مختلف سرباره (GGBFS)، نانولوله هالوزیت (HNT)، میکروسیلیس (SF) و نسبت آب به بایندر (W/B) بر مقاومت فشاری و الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی بود. استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوجی (آرایه متعامد L8) به‌طور چشمگیری تعداد آزمایش‌ها را

غلظت یونی ناشی از انحلال سرباره و یا تغییر در رسانایی فازهای هیدراتاسیون است [۵۵، ۵۶].

دوده سیلیسی (SF): برخلاف سرباره، افزودن ۷٪ دوده سیلیسی مقاومت الکتریکی را در تمام سنین به طور چشمگیری افزایش داد (شکل ۱۳، $P < 0.02$). این اثر مستقیماً به توانایی دوده سیلیسی در بهبود ریزساختار، کاهش حجم و اتصال منافذ و در نتیجه پیچیده تر کردن مسیرهای هدایت یونی نسبت داده می شود [۱۴، ۱۷، ۳۰، ۳۱، ۳۳، ۵۹-۶۱]. این یافته، چالش دستیابی همزمان به خواص مکانیکی و الکتریکی بالا را برجسته کرده و بر ضرورت بهینه سازی دقیق نسبت افزودنی ها برای کسب خواص مطلوب تأکید می کند.

نانولوله های هالوزیت (HNT): تأثیر نانولوله های هالوزیت (HNT) بر مقاومت الکتریکی، در مقایسه با عواملی چون W/B، GGBFS و SF، کمتر بود. افزودن ۵٪ HNT مقاومت الکتریکی را در مراحل اولیه کاهش داد، در حالی که ۱۰٪ HNT در سنین بالاتر باعث افزایش مقاومت الکتریکی شد (شکل ۱۳، $P = 0.006$ در ۱۸۰ روز). این رفتار دوگانه ممکن است به دلیل پراکندگی ناکافی نانولوله ها در درصدهای بالا یا فعال سازی تدریجی واکنش پوزولانی آن ها باشد که تخلخل ماتریس را تغییر می دهد [۵۷، ۵۸]. با وجود این، تأثیر کلی HNT کمتر از سایر افزودنی ها بود.

نسبت آب به مواد سیمانی (W/B): کاهش نسبت W/B به ۰٫۳۵، باعث بهبود مقاومت الکتریکی شد که این امر به کاهش حجم محلول موجود در منافذ و افزایش چگالی ماتریس هیدراتاسیون در سنین بالاتر نسبت داده می شود (شکل ۱۳، $P < 0.015$ در ۱۸۰ و ۳۶۰ روز). این نتیجه با اصول پایه هدایت الکتریکی در محیط های متخلخل همخوانی دارد [۳۰، ۳۱، ۵۳]. رتبه بندی عوامل مؤثر (شکل ۱۴) نشان داد که GGBFS با تأثیر کاهشی و میکروسیلیس با تأثیر افزایشی بیشترین اثر را بر مقاومت الکتریکی پایه داشته اند.

۴-۳- نقش روش تاگوچی و تحلیل ترکیب بهینه

در این پژوهش، از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای شناسایی کارآمد عوامل مؤثر با حداقل تعداد آزمایش استفاده شد [۱۸-۲۳]. این روش که جایگزین کارآمدی برای طراحی فاکتوریل کامل است، لزوماً به دنبال ترکیب «کاملاً بهینه» نیست، بلکه با تحلیل

هسته زایی که هیدراتاسیون اولیه را تسریع می بخشند، می باشد [۴۴، ۴۵]. با این حال، تأثیر HNT در سنین بالاتر (از ۵۶ روز) کاهش یافت که می تواند به دلایلی تمام هیدراتاسیون اولیه یا مشکلات مربوط به پراکندگی و تجمع نانولوله ها در ماتریس باشد.

دوده سیلیسی (SF): افزودن ۷٪ دوده سیلیسی (SF) به دلیل فعالیت پوزولانی بالا و اثر پرکنندگی ذرات فوق ریزش، مقاومت فشاری را در تمام سنین بهبود بخشید. این ماده با واکنش سریع با هیدروکسید کلسیم (CH)، ژل C-S-H متراکم تری تولید کرده و ساختار میکروسکوپی را بهبود می بخشد [۱۲، ۱۳، ۱۵، ۳۴، ۴۹-۵۲]. اگرچه تأثیر آن بر مقاومت متوسط کمتر از سایر عوامل بود (رتبه چهارم در شکل ۱۰)، اما SF نقش کلیدی در افزایش یکنواختی و کاهش پراکندگی مقاومت در بلندمدت داشت که از نظر آماری نیز معنادار است (کاهش انحراف معیار، شکل ۸، $P = 0.020$ در ۳۶۰ روز).

به طور خلاصه، این نتایج نشان می دهد که بهینه سازی نسبت آب به مواد سیمانی همراه با استفاده مناسب از افزودنی های GGBFS، HNT و SF می تواند منجر به بهبود قابل توجه مقاومت فشاری و یکنواختی عملکرد مکانیکی بتن در طول زمان شود.

۴-۲- تفسیر نتایج مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت الکتریکی حجمی (شکل های ۱۱ و ۱۲) به شدت به میکروساختار، تخلخل و محلول یونی داخل منافذ ماتریس سیمانی وابسته است. هدایت الکتریکی عمدتاً از طریق حرکت یون ها در شبکه منافذ صورت می گیرد، بنابراین هر عاملی که بر این شبکه تأثیر بگذارد، مقاومت را تغییر می دهد [۳۰، ۳۱، ۵۳].

روند کلی افزایش مقاومت با گذشت زمان، ناشی از فرآیند هیدراتاسیون، مصرف یون های آزاد و بهبود ساختار منافذ است. تحلیل عوامل مؤثر (شکل های ۱۳ و ۱۴) یک یافته کلیدی را نشان می دهد: افزودنی های سرباره کوره بلند (GGBFS) و میکروسیلیس (SF) تأثیرات متضادی بر مقاومت الکتریکی دارند.

سرباره گدازش یافته کوره بلند (GGBFS): افزودن ۱۰٪ و ۲۰٪ سرباره کوره بلند (GGBFS) مقاومت الکتریکی را از سن ۹۰ روز به بعد به طور قابل توجهی کاهش داد (شکل ۱۳، $P < 0.05$). این کاهش، که می تواند برای کاربردهای حسگری مفید باشد، احتمالاً به دلیل تغییر در شیمی محلول منافذ و افزایش

دوده سیلیسی و سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS) بر مقاومت الکتریکی سیستم کامپوزیتی است. به طور مشخص، افزودن ۷٪ دوده سیلیسی منجر به بهبود قابل توجه مقاومت الکتریکی در تمامی بازه‌های زمانی سن بتن گردید که این امر ناشی از بهبود ریزساختار منافذ و ایجاد مسیرهای پیچیده‌تر برای هدایت یون‌ها می‌باشد. در مقابل، افزودن GGBFS در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد به طور سیستماتیک و معناداری مقاومت الکتریکی را کاهش داد، به ویژه در مراحل پایانی سن سنجی نمونه‌ها. این پاسخ متفاوت، پیامدهای مهمی در حوزه علم مواد دارد؛ چرا که نشان می‌دهد هرچند مواد سیمانی تکمیلی (SCMs) خواص مکانیکی را ارتقاء می‌بخشند، اما تأثیرات آن‌ها بر خواص عملکردی الکتریکی می‌تواند به شکل قابل توجهی متفاوت باشد. اهمیت این نتایج در طراحی مهندسی بسیار گسترده بوده و امکان انتخاب و تنظیم هدفمند SCM‌ها را برای بهبود عایق‌بندی الکتریکی (از طریق افزایش نسبت دوده سیلیسی) یا ارتقای هدایتی جهت کاربردهای خودحسگر (با افزایش نسبت GGBFS) فراهم می‌سازد.

- از منظر مکانیکی و میکروساختاری، نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) به طور قاطع مهم‌ترین عامل مؤثر بر مقاومت فشاری شناخته شد. نسبت پایین‌تر ۰/۳۵ به طور پیوسته منجر به تشکیل ماتریسی متراکم‌تر و با کیفیت‌تر در تمامی سنین نمونه‌ها گردید. تأثیر افزودنی‌های پوزولانی و نانوذرات به سن نمونه وابسته بود؛ به گونه‌ای که نانولوله‌های هالوزیت (HNTs) بیشترین اثر را در افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه (رتبه اول در ۷ و ۲۸ روز) داشتند که این موضوع احتمالاً ناشی از سطح ویژه بالای آن‌ها و نقش مؤثرشان به عنوان مراکز هسته‌زایی است. در مقابل، سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS) نقش کلیدی در بهبود عملکرد مکانیکی بلندمدت ایفا نمود (رتبه اول در ۹۰ و ۱۸۰ روز) که این امر به واکنش‌های پوزولانی مداوم آن مرتبط است که به تدریج موجب ارتقای میکروساختار می‌شود.

- روش طراحی آزمایش تاگوچی به عنوان یکی از رویکردهای بسیار کارآمد، اثربخشی خود را در شناسایی عوامل مؤثر و الگوهای تأثیرگذاری با حداقل تعداد آزمایش‌ها به اثبات رسانده است. در میان مخلوط‌های سیمانی مورد بررسی، بهینه‌ترین کامپوزیت از نظر خواص کلی شامل ۱۰٪ سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS)، ۵٪ نانولوله‌های هالوزیت (HNT)، ۷٪ دوده

نسبت سیگنال به نویز (S/N)، به تعیین یک ترکیب مطلوب و قابل قبول کمک می‌کند. بهره‌گیری از این روش به ما اجازه داد تا:

- تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر هر خاصیت (رتبه‌بندی شده بر اساس نسبت‌های سیگنال به نویز (S/N))؛

- تعیین روند کلی تأثیر هر عامل (مثلاً افزایش مقاومت با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی) بدون نیاز به آزمایش تمام ترکیبات ممکن.

تحلیل تاگوچی، ترکیبی بهینه را شناسایی کرد که تعادل مطلوبی بین خواص مختلف برقرار می‌کند. این ترکیب شامل ۱۰٪ GGBFS، ۵٪ HNT، ۷٪ دوده سیلیسی و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ است. ویژگی‌های برجسته آن عبارتند از:

- مقاومت فشاری بالا؛ به ویژه در بلندمدت، که حاصل اثر ترکیبی و مکمل GGBFS، دوده سیلیسی و نسبت پایین آب به سیمان است و منجر به انسجام میکروساختاری عالی می‌شود.

- مقاومت الکتریکی متعادل: این ترکیب یک نقطه تعادل کلیدی را نشان می‌دهد. در حالی که دوده سیلیسی و نسبت پایین آب به سیمان مقاومت را افزایش می‌دهند، حضور GGBFS این اثر را تعدیل کرده و از افزایش بیش از حد آن جلوگیری می‌کند.

این ترکیب پتانسیل بالایی برای کاربردهای با عملکرد مکانیکی و دوام بالا دارد. هرچند مقاومت الکتریکی نسبتاً بالای آن ممکن است برخی کاربردهای حسگر را محدود کند، اما داده‌های این پژوهش مبنای ارزشمندی برای تحقیقات آتی فراهم می‌آورد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، خواص الکترومکانیکی سیستم کامپوزیتی سیمانی چندجزئی به صورت دقیق با بهره‌گیری از تکنیک آرایه متعامد L8 در چارچوب روش تاگوچی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. تأثیر پارامترهای مختلف شامل سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS)، نانولوله‌های هالوزیت (HNTs)، دوده سیلیسی (SF) و نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) از مرحله شناسایی پایه‌ای تا تحلیل تعاملی پیچیده و گاه متضاد این عوامل به صورت کمی ارزیابی شد. یافته‌های کلیدی حاصل، که می‌توانند در طراحی مواد چندکاره سفارشی مورد استفاده قرار گیرند، به شرح زیر ارائه می‌گردند:

- یافته‌های اصلی این تحقیق نشان‌دهنده تأثیرات متضاد و متفاوت

Xia, X., & Ji, H. (2020). Influence of halloysite nanotube on hydration products and mechanical properties of oil well cement slurries with nano-silica. In *Construction and Building Materials* (Vol. 247, p. 118545). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118545>

[8] Boukendakdji, O., Kadri, E.-H., & Kenai, S. (2012). Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 34, Issue 4, pp. 583–590). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013>

[9] Shi, C., & Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(3), 195–207.

[10] Siddique, R., & Bennacer, R. (2012). Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29–34.

[11] Barnett, S. J., Soutsos, M. N., Millard, S. G., & Bungey, J. H. (2006). Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 434–440.

[12] Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S., & Tae, S. H. (2015). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*, 103, 774–783.

[13] Mouli, M., & Khelafi, H. (2008). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*, 43(1), 31–36.

[14] Parrott, L. J. (1996). Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete. *Materials and Structures*, 29, 164–173.

[15] Aitcin, P. C. (2016). *High-Performance Concrete*. CRC Press.

[16] Amudhavalli, N. K., & Mathew, J. (2012). Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete. *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, 3(1), 28–35.

[17] Dotto, J. M. R., Abreu, A. G. de, Dal Molin, D. C. C., & Müller, I. L. (2004). Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 26, Issue 1, pp. 31–39). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00120-8](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00120-8)

[18] Ghosh, Nabendu & Pal, Pradip & Nandi,

سیلیسی و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ شناسایی گردید. نکته قابل توجه این است که تأثیر کاهنده مقاومت الکتریکی ناشی از GGBFS به شکل قابل توجهی، افزایش قابل ملاحظه مقاومت الکتریکی به واسطه دوده سیلیسی را تعدیل نمود و در نتیجه کامپوزیتی با مقاومت الکتریکی قابل قبول و بدون افزایش بیش از حد آن ایجاد شد.

– در نهایت، این مطالعه استفاده از روش‌های ساخت‌وساز پایدار را از طریق تأیید اثربخشی استفاده از محصول جانبی صنعتی GGBFS به عنوان جایگزین جزئی سیمان توصیه می‌کند. علاوه بر این، آزمایش خواص پیروزیستو ترکیبات بهینه‌شده تحت بارگذاری چرخه‌ای برای ارزیابی عمیق‌تر مناسب بودن آن‌ها در کاربردهای پایش سلامت سازه اهمیت دارد.

۶- مراجع

[1] Tam, L.-H., Zhou, A., Yu, Z., & Wu, C. (2023). Editorial: Microstructures and Mechanical Properties of Cement-Based Composites. In *Materials* (Vol. 16, Issue 20, p. 6636). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma16206636>

[2] Bentur, A., & Mitchell, D. (2008). Material performance lessons. *Cement and Concrete Research*, 38*(2), 259–272. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.009

[3] Metaxa, Z. S., Tolkou, A. K., Efstathiou, S., Rahdar, A., Favvas, E. P., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2021). Nanomaterials in Cementitious Composites: An Update. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 5, p. 1430). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26051430>

[4] Guimaraes, L., Enyashin, A. N., Seifert, G., & Duarte, H. A. (2010). Structural, electronic, and mechanical properties of single-walled halloysite nanotube models. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(26), 11358–11363.

[5] Srivastava, S., & Pandey, A. (2019). Mechanical behavior and thermal stability of ultrasonically synthesized halloysite-epoxy composite. In *Composites Communications* (Vol. 11, pp. 39–44). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.11.003>

[6] Goda, Emad. S., Yoon, K. R., El-sayed, S. H., & Hong, S. E. (2018). Halloysite nanotubes as smart flame retardant and economic reinforcing materials: A review. In *Thermochimica Acta* (Vol. 669, pp. 173–184). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.017>

[7] Liu, H., Jin, J., Yu, Y., Liu, H., Liu, S., Shen, J.,

- Aali & Salehi, Mustafa. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. *Concrete International*. 37. 41-46.
- [31] Hornbostel, K., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 39, pp. 60–72). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- [32] Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Saunders College Publishing
- [33] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed.). W.H. Freeman and Company.
- [34] Turgut, P. & Kucuk, O.. (2006). Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. 42. 745-751. 10.1134/S1061830906110064.
- [35] Lee, Chan & Jo, Young. (2017). Correlation and correction factor between direct and indirect methods for the ultrasonic measurement of stone samples. *Environmental Earth Sciences*. 76. 10.1007/s12665-017-6810-7.
- [36] Mohamed Sutan, Norsuzailina & Meganathan, M. (2003). A Comparison Between Direct And Indirect Method Of Ultrasonic Pulse Velocity In Detecting Concrete Defects.. *Journal of Nondestructive Testing*. 8. 1-9.
- [37] ASTM C597-22, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete (2023).
- [38] Mielentz, F. (2008). Phased arrays for ultrasonic investigations in concrete components. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 27, 23-33.
- [39] Feller, V., Mielentz, F., Klewe, T., Krause, M., Orglmeister, R., & Pflugrad, M. (2015). Ultrasonic phased array for investigations of concrete components. In *NDT-CE 2015-International symposium non-destructive testing in civil engineering (Proceedings)* (pp. 1-5). Technische Universität Berlin/Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung.
- [40] Ahmad, Jawad & Kontoleon, Karolos & Majdi, Ali & Naqash, Muhammad & Deifalla, Ahmed & Ben Kahla, Nabil & Isleem, Haytham & Qaidi, Shaker. (2022). A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability*. 14. 8783. 10.3390/su14148783.
- [41] Yang, Zhengxian & Xiong, Xiaoli & Chen, Shanghong & Briseghella, Bruno & Marano, Giuseppe & Zhang, Yong. (2023). Effect of fineness on the hydration and microstructure of cementitious materials with high-volume steel slag and blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*. 72.
- Goutam. (2017). GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 20. 10.1016/j.jestch.2017.08.002.
- [19] Pal, S., Malviya, S. K., Pal, S. K., & Samantaray, A. K. (2009). Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 1250-1260.
- [20] Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons.
- [21] Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall.
- [22] Singh, A. K., Debnath, T., Dey, V., & Rai, R. N. (2017). An approach to maximize weld penetration during TIG welding of P91 steel plates by utilizing image processing and Taguchi orthogonal array. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98, 541-551.
- [23] Sapakal, S. V., & Telsang, M. T. (2012). Parametric optimization of MIG welding using Taguchi design method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(4), 28-30.
- [24] ASTM C778-02, Standard specification for standard sand (2002).
- [25] Rana, Sohail & Pichandi, Subramani & Figueiro, Raul & Correia, Antonio. (2016). A Review on Smart Self-Sensing Composite Materials for Civil Engineering Applications. *AIMS Material Science*. 3. 357-379. 10.3934/mat.2016.2.357.
- [26] Chung, D. D. L. (2016). Self-sensing structural composites in aerospace engineering. In *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (pp. 295-331). Woodhead Publishing.
- [27] Wang, Q., Yan, P., & Mi, G. (2012). Effect of blended steel slag-GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. *Construction and Building Materials*, 35, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.085>
- [28] Cahyani, R. A. T., & Rusdianto, Y. (2021). An Overview of Behaviour of Concrete with Granulated Blast Furnace Slag as Partial Cement Replacement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 933(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012006>
- [29] ASTM C511-21, Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes (2021).
- [30] Layssi, Hamed & Ghods, Pouria & Alizadeh,

content and its mode of action on concrete. 101. 327-328.

[51] Khedr, S. A., & Abou- Zeid, M. N. (1994). Characteristics of Silica- Fume Concrete. In *Journal of Materials in Civil Engineering* (Vol. 6, Issue 3, pp. 357–375). American Society of Civil Engineers (ASCE). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1994\)6:3\(357\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1994)6:3(357))

[52] Luo, T., Hua, C., Li, L., Zhang, T., Lu, X., Li, L. G., & Mostafa, S. A. (2024). The effect of micro silica fume (MSF) content on pore fractal dimension (PFD) and mechanical properties of self-consolidating concrete. In *Case Studies in Construction Materials* (Vol. 21, p. e04065). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04065>

[53] Wang, L., & Aslani, F. (2020). Electrical resistivity and piezoresistivity of cement mortar containing ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 263, 120243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120243>

[54] Kuo, W.-T., Chen, S.-H., Wang, H.-Y., & Lin, J.-C. (2013). A study on the mechanical and electricity properties of cement mortar added with GGBFS and piezoelectric powder. *Construction and Building Materials*, 49, 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.036>

[55] Han, B., Ding, S., & Yu, X. (2015). Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. In *Measurement* (Vol. 59, pp. 110–128). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>

[56] Wang, L., & Aslani, F. (2020). Electrical resistivity and piezoresistivity of cement mortar containing ground granulated blast furnace slag. In *Construction and Building Materials* (Vol. 263, p. 120243). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120243>

[57] Owsiak, Z., Sołtys, A., Sztąboroski, P., & Mazur, M. (2015). Properties of Autoclaved Aerated Concrete with Halloysite Under Industrial Conditions. In *Procedia Engineering* (Vol. 108, pp. 214–219). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.140>

[58] Farzadnia, N., Abang Ali, A. A., Demirboga, R., & Anwar, M. P. (2013). Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 48, pp. 97–104). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.005>

[59] Salem, Th. M. (2002). Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes. In *Cement and Concrete Research*

106682. [10.1016/j.jobbe.2023.106682](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106682).

[42] Salhi, K. (2025). PERFORMANCE OF GREEN CEMENT COMPOSITE CONTAINING BLAST FURNACE SLAG AND DUNE SAND POWDER. *Ceramics - Silikaty*, 0–0. <https://doi.org/10.13168/cs.2025.0001>

[43] Takahashi, K., Kawabata, Y., Kobayashi, M., Kasaya, T., Miyamoto, S., & Wong, H. S. (2025). Durability of cementitious binders with blast furnace slag in deep sea conditions: Analysis of microstructure and phase transformation. *Cement and Concrete Research*, 196, 107942. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107942>

[44] Haw, T. T., Hart, F., Rashidi, A., & Pasbakhsh, P. (2020). Sustainable cementitious composites reinforced with metakaolin and halloysite nanotubes for construction and building applications. In *Applied Clay Science* (Vol. 188, p. 105533). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105533>

[45] Fahimzadeh, M., Pasbakhsh, P., Lee, S. M., Tan, J. B. L., Singh, R. K. R., & Yuan, P. (2024). Sustainable biologically self-healing concrete by smart natural nanotube-hydrogel system. In *Developments in the Built Environment* (Vol. 18, p. 100384). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100384>

[46] Fahimzadeh, M., Wong, L. W., Baifa, Z., Sadjadi, S., Auckloo, S. A. B., Palaniandy, K., Pasbakhsh, P., Tan, J. B. L., Singh, R. K. R., & Yuan, P. (2024). Halloysite clay nanotubes: Innovative applications by smart systems. In *Applied Clay Science* (Vol. 251, p. 107319). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107319>

[47] Rashidi, Y., Habibnejad Korayem, A., Farsi, S., & Sadeghi, J. (2023). Utilizing halloysite nanotube to enhance the properties of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 75, p. 106832). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106832>

[48] Razzaghian Ghadikolaei, M., Habibnejad Korayem, A., Sharif, A., & Ming Liu, Y. (2021). The halloysite nanotube effects on workability, mechanical properties, permeability and microstructure of cementitious mortar. In *Construction and Building Materials* (Vol. 267, p. 120873). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120873>

[49] Nk, Amudhavalli & Mathew, Jeena. (2012). Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*. 3.

[50] Bhanja, Samah & Sengupta, B. & Kaushik, S. & Kumar, Praveen. (2004). Optimum silica fume

- (Vol. 32, Issue 9, pp. 1473–1481). Elsevier BV.
[https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00809-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00809-8)
- [60] Salem, Th. M., & Ragai, Sh. M. (2001). Electrical conductivity of granulated slag–cement kiln dust–silica fume pastes at different porosities. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 31, Issue 5, pp. 781–787). Elsevier BV.
[https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00461-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00461-6)
- [61] El-Enein, S. A. A., Kotkata, M. F., Hanna, G. B., Saad, M., & El Razek, M. M. A. (1995). Electrical conductivity of concrete containing silica fume. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 25, Issue 8, pp. 1615–1620). Elsevier BV.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00156-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00156-5)
- [62] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited.

A Multi-Criteria Evaluation of Mechanical and Electrical Properties of Cement Composites Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), Halloysite Nanotubes, and Silica Fume: An Experimental Study

Hossein Dehghan

PhD student, Department of Structure and Earthquake Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Amir Tarighat*

Associate Professor, Department of Structure and Earthquake Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Hamed Arzani

Associate Professor, Department of Structure and Earthquake Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Mostafa Adresi

Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Abstract

The development of smart, multifunctional cementitious composites for infrastructure health monitoring is critical. However, designing these materials poses a significant engineering challenge due to the complex, time-dependent, and often contradictory interactions between mineral admixtures and nanomaterials. This study presents a comprehensive experimental investigation within a systematic framework using the Taguchi L_8 orthogonal array to engineer the properties of such composites. It evaluates the influence of four key factors – Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), Silica Fume (SF), Halloysite Nanotubes (HNTs), and Water-to-Binder ratio (W/B) – on compressive strength, electrical resistivity, and microstructural integrity via Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) at various ages. The results indicate a distinct and opposing effect of GGBFS and SF on electrical resistivity, with GGBFS increasing it while SF significantly reduces it, creating a suitable conductive matrix for self-sensing applications. Analysis of Variance (ANOVA) confirmed GGBFS as the most influential factor on long-term electrical resistivity, whereas HNTs demonstrated a primary role in enhancing early-age compressive strength. Based on Signal-to-Noise (S/N) ratio analysis, an optimal combination was identified, providing a clear pathway for balancing mechanical performance and tailored functional properties. This research offers a valuable practical guide for the rational design of multifunctional cementitious composites, enabling engineers to select material combinations for predictable, application-specific performance.

Keywords: Multifunctional Cementitious Composite, Electrical Resistivity, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), Silica Fume, Halloysite Nanotube (HNTs), Taguchi Method, Multi-Criteria Optimization.

* Corresponding Author: tarighat@sru.ac.ir