



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Comparative Evaluation of Effect of Fly Ash and Microsilica on the Development of Compressive Strength and Electrical Resistance of Concretes Exposed to Sulfate-Rich Waters

Yaghoub Babaei¹, Seyyed Arash Mousavi Ghasemi^{2*}, Yousef Zandi³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Reinforced concrete is one of the most widely used building materials in the construction industry. The sulfate attack on concrete structures is one of the factors effectively causing the reduced durability of concrete and structural damage. In the design and construction of concrete structures, service life, sustainable development, and environmental issues are important indicators considered by researchers in optimizing materials to achieve sustainable concrete with high strength by substituting various types of pozzolans for cement. The present study aims to compare the effects of fly ash and micro-silica on the development of the compressive strength, and electrical resistance of concretes exposed to sulfate-rich waters by performing experiments. The plans of this study include two types of conventional concretes and concretes containing pozzolanic material. Concrete mixing plans in sulfate medium were divided into 11 groups. The first group, with no additive material, included one plan (control plan), and the other 10 groups included 8 plans with the substitution of different percentages of micro-silica and fly ash powders for cement in concrete. Accordingly, 81 plans, each with 4 samples (7, 14, 28, and 42-day ages), were constructed to test compressive strength (N=324 plans). The results indicate that in the sulfate medium, with an optimal mixing design, the concrete containing standard sand reinforced with fly ash and microsilica pozzolans had higher compressive strength compared to the concrete with no pozzolan so that Samples # 5 and 6 of Group 2, with a 7.2% reduction in compressive strength, and Samples #30 and 31, with a 28% reduction in compressive strength, had the highest and lowest compressive strength, respectively. Also, the substitution of 15% microsilica caused a 1.58-fold increase in the electrical resistance in the 90 day-old concrete sample compared to the 28 day-old sample.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2021

Revise Date: 19 February 2022

Accept Date: 05 April 2022

Keywords:

Durability of Concrete
Concrete Structure
Sulfate Medium
Fly Ash
Microsilica
Concrete
Electrical Resistanc

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.322127.2680>

*Corresponding author: Seyyed Arash Mousavi Ghasemi

Email address: amousavi2000@iaut.ac.i

ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر خاکستربادی و میکروسیلیس بر روی روند رشد، مقاومت

فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های در معرض آب‌های سولفات دار

یعقوب بابائی^۱، سیدآرش موسوی قاسمی^{۲*}، یوسف زندی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

بتن مسلح یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی در صنعت ساخت و ساز است. حمله سولفات‌ها به سازه‌های بتنی از عوامل تأثیرگذار در کاهش دوام بتن و خرابی سازه‌ای است. در طراحی و ساخت سازه‌های بتنی، عمر سرویس دهی، توسعه پایدار و مباحث زیست محیطی از شاخص‌های مهمی هستند که محققین جهت دست‌یابی به بتنی پایدار با مقاومت بالا، درصد بهینه سازی مصالح با جایگزینی انواع پوزولان‌ها به جای سیمان شده‌اند. تحقیق حاضر با انجام آزمایشاتی به ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر خاکستربادی و میکروسیلیس بر روی روند رشد، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های در معرض آب‌های سولفات دار پرداخته است. طرح‌های این تحقیق به دو بخش بتن‌های معمولی و بتن‌های دارای ماده پوزولانی تقسیم شده‌اند که طرح‌های اختلاط بتن‌ها در محیط سولفاتی در ۱۱ گروه اصلی دسته بندی گردیدند. گروه اول بدون هیچ گونه مواد افزودنی جایگزین سیمان، شامل یک طرح به عنوان طرح مبنا شد و در ۱۰ گروه بعدی، هر گروه شامل ۸ طرح با جایگزینی پودرهای میکروسیلیس و خاکستربادی با درصد‌های متفاوت به جای سیمان شدند. با این شرح ۸۱ طرح که هر کدام شامل ۴ نمونه برای آزمون‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه با جمع کل ۳۲۴ طرح ساخته شده و بررسی شدند. نتایج این پژوهش نشان داد در محیط سولفاتی، بتن با سنگدانه استاندارد که با پوزولان‌های خاکستربادی و میکروسیلیس تقویت شده با ارائه طرح اختلاط بهینه‌ای توانست در مقایسه با بتن بدون ترکیب با هیچ گونه ماده پوزولانی مقاومت فشاری بالاتری داشته باشد، به گونه‌ای که نمونه‌های طرح‌های ۵ و ۶ از گروه ۲ تقریباً با ۷۲٪ کاهش مقاومت فشاری دارای بیش‌ترین مقاومت فشاری و طرح‌های ۳۰ و ۳۱ تقریباً با ۲۸٪ کاهش مقاومت فشاری دارای کم‌ترین مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شدند و مقاومت الکتریکی با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس در سنین ۹۰ روزه در مقایسه با سنین ۲۸ روزه، ۱/۵۸ برابر افزایش یافت.

کلمات کلیدی: دوام بتن، سازه های بتنی، محیط‌های سولفاتی، خاکستر بادی، میکروسیلیس، مقاومت الکتریکی بتن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.322127.2680	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.322127.2680	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۰۱/۱۶	۱۴۰۱/۰۱/۱۶	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۴۰۰/۱۰/۰۹
سیدآرش موسوی قاسمی amousavi2000@iaut.ac.ir					*نویسنده مسئول: بست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن مسلح ماده‌ای پرکاربرد در صنعت ساخت و ساز می‌باشد، که از آن در اکثر سازه‌های پروژه‌های عمرانی در شرایط محیطی مختلف استفاده می‌شود و در برخی شرایط محیطی، دچار آسیب دیدگی می‌گردد. حملات سولفاتی در بتن‌ها، از عواملی است که ممکن است در طولانی مدت باعث کاهش عمر مفید سازه گردد. حملات تخریبی سولفات‌ها مربوط به اترینگایت می‌باشد. قسمت‌هایی از سیمان هیدراته، دارای هیدروکسید کلسیم^۱ و آلومین هستند که آسیب‌پذیری بتن و سیمان را در مقابل حملات یون‌های سولفات افزایش می‌دهند. اعمال فشار ناشی از جذب آب در محیط قلیایی توسط اترینگایت، عواملی هستند که می‌توانند موجب خرابی در بتن شوند [1].

سیمان‌هایی که دارای بیش از ۸٪ ماده C_3A باشند در صورتی که $Ca(OH)_2$ در مجاورت سولفات‌ها قرار گیرد، ماده مخرب و انبساط‌زای اترینگایت تشکیل می‌گردد [2]. سولفات‌های موجود در آب‌های زیرزمینی منشأ طبیعی دارند، اما ممکن است از کوه‌ها یا از فاضلاب‌های صنعتی بوجود آمده باشند و معمولاً "سولفات سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم در خاک یا آب زیرزمینی وجود دارند [3] به طور کلی متوسط حدود ۵/۳٪ از وزن آب دریاها حاوی نمک‌ها و سولفات‌های مختلف می‌باشند [4].

بسیاری از سازه‌ها در حوزه خلیج فارس ایران به طور مستقیم و یا غیرمستقیم در تماس با آب هستند که به علت داشتن دما و رطوبت زیاد، از محیط‌های خورنده محسوب می‌شود ولی در این خصوص تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف، سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده و مناطق دریایی، بدلیل خوردگی فولاد داخل بتن دچار آسیب دیدگی و خرابی زودرس شده‌اند [5]. خرابی این سازه‌ها بر اثر عوامل محیطی، نیازمند به تعمیر، بازسازی و گاه "ساخت مجدد بوده و هزینه‌های قابل توجهی را در پی دارد [6].

دوام سازه‌های بتنی در معرض عوامل خورنده موضوع مهمی است که بسته به نوع و محیط کاربرد بتن، می‌توان خواص متفاوتی از آن انتظار داشت، بدان سبب، مولفه‌های اصلی بتن نظیر مقاومت فشاری، روانی و دوام آن مورد توجه مهندسين سازه است تا با انتخاب مصالح و سیمان با کیفیت و رعایت ترکیب مصالح در اختلاط بتن به بتنی با دوام و مقاومت فشاری بالا دست یابند که به منظور دستیابی به آن عمدتاً از پوزولان‌ها استفاده می‌شود [7-8]. مسائل دوام بتن در اکثر کشورهای توسعه یافته مورد توجه قرار گرفته که جهت بالابردن معیارهای واقعی دوام و پایداری، به ارزیابی علمی طرح‌ها و کنترل دقیق کیفیت پروژه‌های ساخت بتن جهت افزایش عمر مفید ساختمان‌ها نیاز می‌باشد. بررسی دوام بتن یک امر مهم پژوهشی است [9-10] و فهم دقیق از معنی دوام بتن مهم است. طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن امریکا (ACI) دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش و یا هرفرآیندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد گفته می‌شود. بتن پایا بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمات رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید [11]. دوام بتن در شرایط طبیعی، محیطی و داخلی عامل مهمی برای حفظ الزامات کارایی بتن می‌باشد [12-13]. باید توجه داشت که در بررسی دوام سازه‌های بتنی در معرض عوامل خورنده، پی بردن به خواص بتن و پیش‌بینی عملکرد آن در محیط‌های خورنده حائز اهمیت است. [14-15].

عامل اصلی آسیب به دوام بتن در محیط سولفاتی نفوذپذیری بتن می‌باشد. نفوذپذیری بیان‌کننده سهولت و یا صعوبت ورود سیال به داخل محیط متخلخل بتن می‌باشد. از تبخیر آب اضافی در بتن، مجراها و منافذ موئین باقی می‌مانند که این منافذ مهمترین عامل متخلخل و نفوذپذیر بودن بتن محسوب می‌شود [16]. با اتصال این منافذ به یکدیگر نفوذپذیری بتن بیش‌تر شده و آب اضافی میزان ترک‌های جمع‌شدگی را بیش‌تر می‌کند، این ترک‌ها محل و مسیر نفوذپذیری به بتن می‌شود که آب یا سیالات دیگر می‌توانند در بتن جریان پیدا نموده و مواد آسیب رسان را با خود به درون بتن حمل نمایند [17]. بتنی که نفوذپذیری پایینی داشته باشد، در مقابل حملات شیمیایی مقاومت بهتری نشان می‌دهد، به گونه‌ای که می‌توان بتن نسبتاً "غیرقابل نفوذ را بتن با دوام دانست [18-19]. مهم‌ترین علت نفوذپذیری

^۱ $Ca(OH)_2$

بتن نداشتن فشردگی لازم و وجود خلل و فرج در بتن است اما علاوه بر آن به اندازه، توزیع، شکل پیچ و خم مسیر و پیوستگی منافذ نیز بستگی دارد، در حالت کلی میزان نفوذپذیری بتن تابع دو عامل سیال عبوری و محیط متخلخل نفوذ است [20] و با ورود عوامل تهاجم به داخل سازه بتنی، آسیب دیدگی بتن مسلح بر اثر خوردگی فولاد مدفون در آن به دو طریق اتفاق می‌افتد، اول اینکه کاهش سطح مقطع میلگرد را سبب می‌شوند و دومی، انبساط حجمی است که در واقع، محصولات خوردگی حجمی بزرگ‌تر از خود فولاد را به وجود می‌آوردند که این افزایش حجم با ایجاد تنش‌های کششی در بتن با ترک خوردگی و از بین رفتن پوشش بتنی فولاد ظاهر می‌گردد و در نهایت موجب خرابی سازه‌ای می‌گردد [21].

افزایش دوام بتن به ویژه در محیط‌های خورنده می‌تواند نقش عمده‌ای در توسعه پایدار داشته باشد که اصطلاح "توسعه پایدار" بر اساس گزارش سازمان ملل توسعه و پیشرفتی است که بتواند نیازهای زمان حال را به گونه‌ای تامین کند که توانایی نسل‌های آینده در تامین نیازهای خود به مخاطره نیفتد [22-24]. سیمان یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن است که در فرایند تولید آن کربن دی‌اکسید² و گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌شود که اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی این امر باعث افزایش نگرانی جامعه جهانی گردیده و راه-کارهایی را به همراه داشته [25-27] و محققان را تشویق به بهینه سازی مصالح ساختمانی و بررسی بودن مواد جایگزین به جای سیمان پرتلند در بتن نموده است [28]. جایگزینی مواد افزودنی معدنی در دسترس از جمله پوزولان‌ها به جای درصدی از سیمان از مناسب-ترین راه‌های بهسازی مصالح است و حضور مواد مکمل معدنی و سیمانی در بتن باعث کاهش هزینه، کاهش آلودگی محیط زیست و موجب اصلاح و بهبود برخی از خواص بتن از جمله خواص مکانیکی، خواص رئولوژیکی و انتقال و دوام می‌شود [29-30]. افزایش تقاضا برای دوام و مقاومت مصالح مبتنی بر سیمان موجب شده است که مواد ضایعاتی مختلف با خواص پوزولانی به مخلوط بتن وارد شوند که از پایه های توسعه پایدار می‌باشد [31-33].

استاندارد ASTM C618 پوزولان را به این صورت تعریف می‌کند: ماده سیلیس یا سیلیس آلومیناتی، به خودی خود ارزش چسبندگی ندارند، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند. تحقیقات چندسال اخیر برخی از پژوهشگران در محیط سولفاتی مورد مطالعه قرار گرفت [34-36]. در مقاله ای دوام بتن حاوی خاکستربادی و دوده سیلیس در برابر حمله ترکیبی انجماد-ذوب و سولفات مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که وقتی بتن در معرض 5٪ محلول سولفات سدیم قرار گیرد، هم خاکستربادی و هم میکروسیلیس می‌توانند مقاومت بتن در برابر حمله سولفات را بهبود بخشند [37] و همچنین در مقاله ای خواص مکانیکی و دوام بتن خود متراکم با مقاومت متوسط با خاکستر بادی حجم بالا و سنگدانه های مخلوط بهبود یافته مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج نشان داد که خاکستر بادی کارایی را بهبود می‌بخشد و مقاومت فشاری و همچنین استحکام کششی شکاف را کاهش می‌دهد. بتن خود متراکم مبتنی بر خاکستربادی نسبت به مخلوط کنترل مقاومت بهتری در برابر جذب آب، حجم ظاهری حفره‌های نفوذپذیر، جذب و نفوذ یون نشان می‌دهد [38].

بر اساس نتایج مطالعات مروری، سازه‌های بتنی در محیط خورنده سولفاتی با کاهش مقاومت روبرو می‌شود و در این تحقیق با استفاده از انواع طرح اختلاط بتن درسین مختلف با انجام آزمایشات به ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر خاکستربادی و میکروسیلیس بر روی روند رشد، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های در معرض آب‌های سولفات دار پرداخته شده است.

² CO₂

۲- مواد و مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ سیمان صوفیان با خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مندرج در جدول ۱ طبق استاندارد ASTM C150 [38] استفاده شد و برای کسب کارایی مطلوب در مخلوط‌های بتن از فوق روان کننده‌ای بنام Structuro 335 که بر پایه پلی‌کربوکسیلیک هست، استفاده گردید. در این پژوهش از پودر خاکستریادی و میکروسیلیس که ساخت شرکت فرافزون شیمی (اصفهان) و طبق استاندارد ASTM C494 [39] در رده G تولید می‌شود به عنوان جایگزین سیمان استفاده شد که خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از سنگدانه درشت شکسته شده با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر و سنگدانه‌های ریز طبیعی، طبق استاندارد ASTM C33 [40] متعلق به شرکت استخراج ایرانیان (ماسه شوئی امامیه) استفاده شد که جدول ۲ مشخصات سنگدانه‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات سیمان مصرفی، خاکستریادی و میکروسیلیس
خواص فیزیکی و مکانیکی

چگالی	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm ²)	زمان گیرش ثانویه (min)	زمان گیرش اولیه (min)	بلین
—	۴۶۲	۲۳۷	۱۷۱	۱۷۵	۱۱۶	سیمان ۲۹۷۴
۲/۳۱	—	—	—	—	—	خاکستر بادی
۱/۷۵	—	—	—	—	—	میکروسیلیس

ترکیبات شیمیایی (%)

میکروسیلیس س	خاکستر تر بادی	سیمان	میکروسیلیس	خاکستر بادی	سیمان	میکروسیلیس	خاکس تر بادی	سیمان
—	—	۱۱/۱۳	—	—	—	۰/۶۳	۵۶/۶	۲۱/۷۷
—	—	—	—	—	—	—	۲۶/۲۲	۴/۵۳
۰/۱	—	—	—	—	—	—	۳/۱۰	۳/۶۶
—	—	—	—	—	—	—	۱۱/۱۷	۶۳/۱۳
—	—	—	—	—	—	—	۲/۳۴	۲/۱۷
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲
—	—	—	—	—	—	—	—	۰/۳۲

جدول ۲: دانه بندی و خواص فیزیکی سنگدانه‌ها

۰/۸	۱۰۰	۹۵	۳۲	۴	۰/۲	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۱۵/۱	۴/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۷	۷۴	۵۸	۳۳	۲۴	۴	۱/۶	۰	۰

۲-۲- طرح اختلاط

طرح‌های این پژوهش در دو بخش بتن‌های معمولی در محیط آب نرمال و بتن‌های دارای ماده پوزولانی شامل درصدهایی از خاکستر بادی و میکروسیلیس در محیط سولفات تقسیم شده‌اند. بخش بتن معمولی که تحت عنوان نمونه بتنی شاهد می‌باشد، از شن و ماسه استاندارد و بدون جایگزینی مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جای سیمان ساخته شده و در معرض آب معمولی (آب بدون سولفات) قرار داده شدند و بخش بتن‌های دارای ماده پوزولانی که طرح‌های این بتن‌ها در ۱۱ گروه اصلی دسته‌بندی گردیده و در معرض آب‌های سولفات‌دار قرار داده شدند، که در این بخش، در گروه اول (طرح مینا) به نمونه بتنی این طرح در معرض آب‌های سولفات‌دار قرار داده شد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جای سیمان افزوده نشد و فقط نمونه بتنی این طرح در معرض آب‌های سولفات‌دار قرار داده شد که از این طرح شماره ۱ به عنوان طرح مینا صرفاً برای مقایسه میزان نتیجه مقاومت فشاری سایر طرح‌های بتنی مورد آزمایش در معرض آب سولفات‌دار با یکدیگر استفاده شد. بنابراین بتن‌های هردو طرح شاهد و مینا فاقد مواد پوزولانی بوده و تفاوت نمونه بتنی شاهد با نمونه بتنی طرح مینا صرفاً در محیط‌های قرارگیری بتن‌های مذکور می‌باشد که نمونه بتنی شاهد در آب معمولی و نمونه بتنی طرح شماره ۱ (طرح مینا) در معرض آب سولفات‌دار قرار داده شدند.

در گروه‌های ۲ الی ۱۱ پودرهای میکروسیلیس و خاکستر بادی با درصد‌های متفاوتی جایگزین سیمان شدند که در مجموع ۸۱ طرح فقط برای بتن‌های طرح‌ها در محیط سولفات ساخته شد که هر کدام از این طرح‌ها شامل ۴ نمونه شدند که برای آزمون مقاومت فشاری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه آزمایش شدند. در نهایت ۳۲۴ نمونه آزمایشگاهی در ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ ساخته شد و یک نمونه هم که به عنوان نمونه شاهد از محیط نرمال در سنین مذکور ساخته و نگهداری شد که بنا به اهداف این تحقیق، نتایج مقاومت فشاری بدست آمده از آزمایشات در محیط سولفات با نتایج مقاومت فشاری نمونه شاهد مقایسه و مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

در این طرح‌ها نسبت آب به مواد سیمانی به صورت تجربی و با آزمون و خطا مقدار ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در برخی از طرح‌های اختلاط مثلاً "گروه ۲ این نسبت $W/C+P$ می‌باشد که معادل W/C در جزئیات طرح‌های اختلاط قبلی است و به عبارت ساده تر با کاهش وزن سیمان، پوزولان خاکستر بادی و یا میکروسیلیس جایگزین آن گردیده است و برای فوق‌روان‌کننده نسبت ۰/۶ درصد وزنی مواد سیمانی انتخاب گردید. ساخت بتن براساس جزئیات طرح‌های اختلاط این تحقیق و طبق استاندارد ACI 211.1-91 [41] با استفاده از مواد و مصالح مندرج در بخش ۲-۱ انجام گرفت که جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده به تفکیک هر گروه در جدول ۳ ارائه شده است.

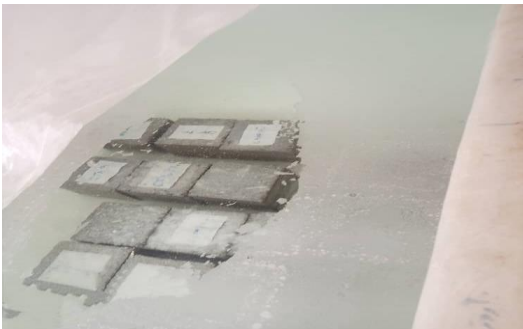
جدول ۳: طرح‌های اختلاط

گروه	ردیف	سیمان		میکروسیلیس		خاکستر بادی		آب	سوپرفوق روان کننده	شن بادمی	شن نخودی	ماسه	جمع کل
		مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد						
	1	350.000	0	0.000	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	2	341.463	0	0.000	2.5	8.537	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	3	333.333	0	0.000	5	16.667	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	4	325.581	0	0.000	7.5	24.419	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	5	318.182	0	0.000	10	31.818	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	6	311.111	0	0.000	12.5	38.889	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	7	304.348	0	0.000	15	45.652	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	8	297.872	0	0.000	17.5	52.128	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	9	291.667	0	0.000	20	58.333	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	10	341.463	2.5	8.537	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
3	11	333.333	5	16.667	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	12	325.581	7.5	24.419	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	13	318.182	10	31.818	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	14	311.111	12.5	38.889	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	15	304.348	15	45.652	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6
	16	297.872	17.5	52.128	0	0.000	0	157.5	2.1	426	284	1130	2349.6

2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	0.000	0	58.333	20	291.667	17	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	8.333	2.5	8.333	2.5	333.333	18	4
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	16.279	5	8.140	2.5	325.581	19	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	23.864	7.5	7.955	2.5	318.182	20	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	31.111	10	7.778	2.5	311.111	21	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	38.043	12.5	7.609	2.5	304.348	22	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	44.681	15	7.447	2.5	297.872	23	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	51.042	17.5	7.292	2.5	291.667	24	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	57.143	20	7.143	2.5	285.714	25	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	8.140	2.5	16.179	5	325.581	26	5
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	15.909	5	15.909	5	318.182	27	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	23.333	7.5	15.556	5	311.111	28	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	30.435	10	15.217	5	304.348	29	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	37.234	12.5	14.894	5	297.872	30	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	43.750	15	14.583	5	291.667	31	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	50.000	17.5	14.286	5	285.714	32	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	56.000	20	140.000	5	280.000	33	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.955	2.5	23.864	7.5	318.182	34	6
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	15.556	5	23.333	7.5	311.111	35	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	22.826	7.5	22.826	7.5	304.348	36	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	29.787	10	22.340	7.5	297.872	37	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	36.458	12.5	21.875	7.5	291.667	38	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	42.857	15	21.429	7.5	285.714	39	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	49.000	17.5	21.000	7.5	280.000	40	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	54.902	20	20.588	7.5	274.510	41	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.778	2.5	31.111	10	311.111	42	7
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	15.217	5	30.435	10	304.348	43	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	22.340	7.5	29.787	10	297.872	44	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	29.167	10	29.167	10	291.667	45	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	35.714	12.5	28.571	10	285.714	46	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	42.000	15	28.000	10	280.000	47	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	48.039	17.5	27.451	10	274.510	48	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	53.846	20	26.923	10	269.231	49	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.609	2.5	38.043	12.5	304.348	50	8
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	14.894	5	37.234	12.5	297.872	51	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	21.875	7.5	36.458	12.5	291.667	52	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	28.571	10	35.714	12.5	285.714	53	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	35.000	12.5	35.000	12.5	280.000	54	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	41.176	15	34.314	12.5	274.510	55	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	47.115	17.5	33.654	12.5	269.231	56	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	52.830	20	33.019	12.5	264.151	57	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.447	2.5	44.681	15	297.872	58	9
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	14.583	5	43.750	15	291.667	59	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	21.429	7.5	42.857	15	285.714	60	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	28.000	10	42.000	15	280.000	61	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	34.314	12.5	41.176	15	274.510	62	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	40.385	15	40.385	15	269.231	63	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	46.226	17.5	39.623	15	264.151	64	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	51.852	20	38.889	15	259.259	65	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.292	2.5	51.042	17.5	291.667	66	10
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	14.286	5	50.000	17.5	285.714	67	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	21.000	7.5	49.000	17.5	280.000	68	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	27.451	10	48.039	17.5	274.510	69	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	33.654	12.5	47.155	17.5	269.231	70	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	39.623	15	46.226	17.5	264.151	71	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	45.370	17.5	45.370	17.5	259.259	72	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	50.909	20	44.545	17.5	254.545	73	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	7.143	2.5	57.143	20	285.714	74	11
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	14.000	5	56.000	20	280.000	75	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	20.558	7.5	54.902	20	274.510	76	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	26.923	10	53.846	20	269.231	77	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	33.019	12.5	52.830	20	264.151	78	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	38.889	15	51.852	20	259.259	79	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	44.545	17.5	50.909	20	254.545	80	
2349.6	1130	284	426	2.1	157.5	50.000	20	50.000	20	250.000	81	

پس از ساخت هر سری بتن، بلافاصله برای تعیین روانی بتن تازه، آزمایش اسلامپ طبق استاندارد *ASTM C 143* [42] انجام شد. در این تحقیق مقدار روان کننده به گونه‌ای انتخاب شد تا روانی دست کم معادل ۱۲ سانتی متر حاصل شود. در بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳، خاکستربادی منجر به پهن شدگی بتن بعد از آزمایش اسلامپ می‌شود. سپس بتن در قالب‌های مکعبی ریخته شده و پس از تراکم مناسب (توسط میز لرزان)، به اتاق با شرایط استاندارد منتقل شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش در آب با دمای ۲۰±۲ نگهداری شدند و سپس نمونه‌ها جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری در محیط سولفاتی داخل مخزن‌های

حاوی منیزیم سولفات (ایجاد محیط سولفاتی) ۵ درصد با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۷ روز، قرارداد شده شد (شکل ۱). در جدول ۴ میزان غلظت یون‌های غالب در محلول ذکر شده است [43].



(الف)



(ب)

شکل ۱: نمونه بتنی غرق آب حاوی منیزیم سولفات ۵ درصد (محیط سولفاتی)

جدول ۴: محلول‌های استفاده شده در آزمایش

کد	محلول	یون	Ppm
Cl	NaCl	Na ⁺	۲۲۰۰۰
		Cl ⁻	۳۵۵۰۰
S	Na ₂ SO ₄	Na ⁺	۴۵۵۵۰
		SO ₄ ²⁻	۱۹۳۳۰۰

۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های بتنی را بعد از ۷ روز از داخل مخزن محیط سولفاتی خارج نموده و بر روی نمونه‌های بتنی هر گروه اختلاط، آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز، به وسیله جک هیدرولیکی با بارگذاری سرعت ۶/۸ کیلو نیوتن بر ثانیه انجام شد (شکل ۲).

شایان ذکر است که مقاومت فشاری بتن‌های هر طرح در سنین مذکور از میانگین مقاومت فشاری سه نمونه به دست آمده، محاسبه و در بخش نتایج ذکر گردید. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز انجام شد.



(الف)



(ب)

شکل ۲: تست مقاومت فشاری نمونه بتن مکعبی

۴-۲- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب هم مطابق با دستورالعمل 122BS 1881-Part انجام شد. روش آزمایش بدین شکل است که در سن ۲۸ روز از این طرح چند نمونه درون گرمخانه با دمای تقریباً ۴۵ درجه سانتیگراد و به مدت ۱۴ روز خشک می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها از گرمخانه جرم نمونه‌ها در وضعیت خشک توزین شده و سپس در ظرف آب قرار داده می‌شوند. این عمل به گونه ای انجام می‌شود که ارتفاع آب بالای نمونه 25 ± 5 میلی‌متر باشد. نمونه‌ها به مدت ۱، ۰/۵، ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۱۶۸ ساعت درون آب باقیمانده و پس از آن از آب خارج شده و در وضعیت اشباع با سطح خشک توزین می‌شوند. نتایج جذب آب اندازه‌گیری شده برای هر نمونه به عنوان افزایش جرم نمونه بر اثر غرق شدن در آب و برحسب درصدی از وزن خشک نمونه ارائه می‌شود.



شکل ۳: اندازه‌گیری وزن نمونه بتن

۵-۲- آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی

برای تعیین مشخصات مکانیکی بتن سخت شده از آزمون‌های مقاومت الکتریکی و همچنین مقاومت نمونه‌های فشاری استفاده شد. در این تحقیق آزمایش‌های مقاومت الکتریکی در شرایط محیطی سولفات انجام شد.

آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد ACI 222. بر روی آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی متری در هر یک از سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. این آزمون‌ها بعد از متراکم کردن با میز و بیره و قالب‌گیری، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط استاندارد نگهداری شدند. عمل آوری بتن تاثیر بسزایی بر ویژگی‌های بتن سخت شده دارد و به منظور حفظ بتن از گزند عوامل زیان‌بار باید بلافاصله پس از تراکم بتن آغاز شود و عمل آوری از مفاهیم سه گانه مراقبت، محافظت و پروراندن تشکیل شده و فرایندی است که طی آن از افت رطوبت بتن جلوگیری و دمای بتن در وضعیت رضایت بخشی حفظ شود که در این آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی نحوه عمل آوری بتن همچون آزمایش تعیین مقاومت فشاری انجام و فقط بر روی آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی متری انجام پذیرفت. پس از قالب‌برداری، آزمون‌ها در حوضچه آب قرار گرفتند. برای انجام این آزمایش از یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی استفاده شد. برای این منظور دو صفحه مسی به همراه لایه نازکی از خمیرسیمان کم‌اسلامپ در دو طرف آزمون اشباع با سطح مرطوب قرار داده شد و مقاومت الکتریکی بین آن دو اندازه‌گیری شد (شکل ۴). برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح مقطع آزمون ضرب و بر ارتفاع آن تقسیم شد، که از فرمول شماره ۱ بدست می‌آید.

$$\rho = R \frac{A}{H} \quad (1)$$

که در آن ρ مقاومت ویژه الکتریکی (اهم متر) و R مقاومت الکتریکی قرائت شده از دستگاه (اهم) و A و $(B*L)$ مساحت سطح آزمون (مترمربع) و H ارتفاع آزمون (متر) است.



شکل ۴: دستگاه مقاومت الکتریکی دو نقطه‌ای

۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

در این تحقیق با استفاده از انواع طرح‌های اختلاط بتن در سنین مختلف، با انجام آزمایشاتی به ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر خاکستر بادی و میکروسیلیس بر روی روند رشد، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های در معرض آب‌های سولفات دار پرداخته شد که کلیه نتایج مقاومت فشاری بدست آمده بر حسب مگاپاسگال محاسبه گردیده و به شرح ذیل می‌باشد:

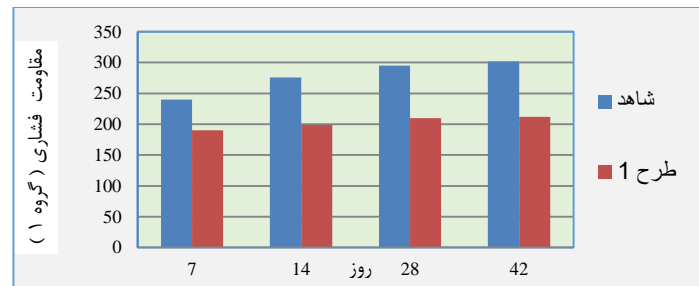
نتایج مقاومت فشاری حاصله در نمونه بتنی شاهد در سنین مختلف، در جدول شماره ۵ قید گردیده است و جدول شماره ۶ نتایج مقاومت فشاری بتن گروه ۱ طرح شماره ۱ (طرح مبنا) را نشان می‌دهد، نتایج بدست آمده، نشان داد که مقاومت فشاری نمونه بتنی طرح مبنا با قرارگیری در محیط سولفات‌ها در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه بتنی شاهد در سنین مختلف با کاهش مقاومت فشاری چشم‌گیری مواجه گردید به طوری که این کاهش مقاومت فشاری در سن ۷ روزه تقریباً ۲۰/۸٪، در سن ۱۴ روزه ۲۸٪، در سن ۲۸ روزه ۲۹٪ و در سن ۴۲ روزه ۲۹/۸٪ بود. شکل ۵ نشان‌گر نمودار نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شاهد و طرح مبنا هست.

جدول ۵: نتایج مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن‌های با شن و ماسه استاندارد در شرایط نرمال بدون سولفات (گروه شاهد)

گروه	نمونه ۱ (۷ روزه)	نمونه ۲ (۱۴ روزه)	نمونه ۳ (۲۸ روزه)	نمونه ۴ (۴۲ روزه)
	240(MPa)	276(MPa)	295(MPa)	302(MPa)

جدول ۶: نتایج مقاومت فشاری بتن با سنگدانه‌های سنگدانه استاندارد ماسه شوئی امامیه در محیط سولفاتی بدون ماده افزودنی (گروه ۱: طرح مبنا)

گروه	نمونه ۱ (۷ روزه)	نمونه ۲ (۱۴ روزه)	نمونه ۳ (۲۸ روزه)	نمونه ۴ (۴۲ روزه)
	190(MPa)	199(MPa)	210(MPa)	212(MPa)

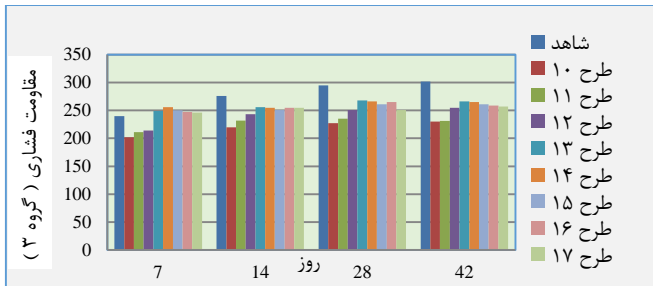


شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری بتن با سنگدانه‌های سنگدانه استاندارد ماسه شوئی امامیه در محیط سولفاتی بدون ماده افزودنی (گروه ۱: طرح ۱)

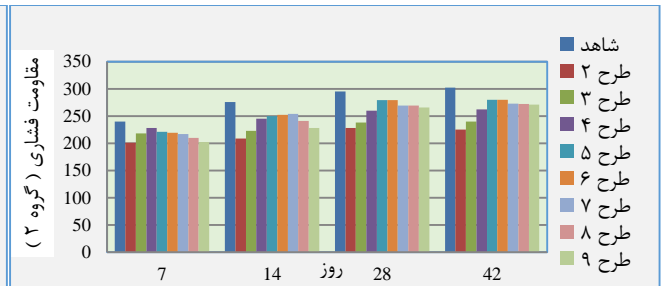
در گروه‌های ۲ الی ۱۱ مطابق جزئیات طرح اختلاط ارائه شده در جدول شماره ۳، در بتن‌های طرح‌ها نسبت به افزودن مقادیر مختلفی از مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس به صورت مجزا و همچنین بصورت ترکیبی از هردو پوزولان مذکور به جای بخشی از سیمان اقدام گردید و نتایج مقاومت فشاری حاصله از بتن طرح‌ها با نمونه بتنی شاهد مقایسه گردید (شکل ۶). بررسی نتایج مقاومت فشاری تمامی طرح‌ها که با افزودن درصد‌های مختلف مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جای بخشی از سیمان همراه بود، ثابت نمود که مقاومت فشاری طرح‌های بتنی در سن ۷ روزه در طرح‌های شماره ۲۳ الی ۴۷ و طرح‌های شماره ۵۳ و ۵۴ نسبت به نتایج نمونه‌های طرح‌های مبنا و شاهد کاهش یافتند ولی با افزایش سن بتن طرح‌ها، روند رشد مقاومت فشاری بتن طرح‌ها نیز افزایش یافته و میزان آن به بالاتر از میزان مقاومت فشاری طرح مبنا رسید و به غیر از طرح‌های مذکور، مقاومت فشاری سایر طرح‌ها در سنین ۷ روزه از همان ابتدا بیش‌تر از میزان مقاومت فشاری طرح مبنا بودند و در این طرح‌ها نیز با روند رشد سن بتن طرح‌ها، میزان مقاومت فشاری بتن طرح‌ها نیز افزایش یافت که این میزان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با توجه به جزئیات طرح‌های اختلاط بتن، متغیر بود به طوری که در گروه ۲ در طرح شماره ۵ با افزودن فقط ۱۰٪ خاکستر بادی و در طرح شماره ۶ با افزودن فقط ۱۲/۵٪ خاکستر بادی به جای بخشی از سیمان، شاهد بالاترین افزایش مقاومت فشاری بتن طرح‌ها به میزان ۳۲٪ نسبت به نمونه طرح شماره ۱ (طرح مبنا) شدیم و همچنین در گروه ۵ در طرح شماره ۳۰ که دارای ۵٪ میکروسیلیس و ۱۲/۵٪ خاکستر بادی بود و در طرح شماره ۳ که حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ خاکستر بادی به جای بخشی از سیمان بود شاهد پائین‌ترین میزان افزایش مقاومت فشاری به میزان تقریبی ۴٪ نسبت به نمونه طرح مبنا (طرح شماره ۱) شدیم.

با جمع‌بندی نتایج بدست آمده از کلیه طرح‌های این پژوهش و مقایسه آن با نتایج نمونه شاهد که هدف اصلی این پژوهش بود، ثابت گردید که طرح‌های شماره‌های ۵ و ۶ از گروه ۲ که دارای بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری در بین تمامی طرح‌های بتنی مورد آزمایش در معرض آب سولفات‌دار بودند در مقایسه با میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد در سنین مختلف بصورت تقریبی با ۷/۲٪ کاهش مقاومت فشاری بتن مواجه گردیدند و طرح‌های شماره‌های ۳۰ و ۳۱ که دارای کم‌ترین افزایش مقاومت نسبت به سایر نمونه طرح‌های بتنی بودند در مقایسه با میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد با ۲۸٪ کاهش مقاومت فشاری مواجه گردیدند.

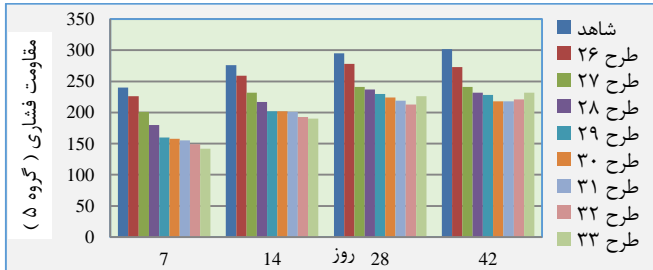
نتایج حاصله در این پژوهش بر روی ۳۲۴ طرح بتنی ثابت کرد که افزودن مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری بتن طرح‌ها در محیط آب‌های سولفات‌دار گردید و این افزایش مقاومت فشاری با روند رشد سنین بتن طرح‌ها هم افزایش یافت که هرچند که این افزایش نسبت به مقاومت فشاری طرح مبنا مناسب بود ولی در کل در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری نمونه شاهد کاهش مقاومت فشاری بتن در محیط سولفاتی علیرغم افزودن مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس اتفاق افتاد.



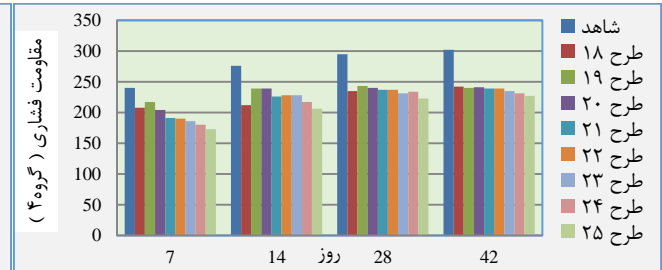
(الف)



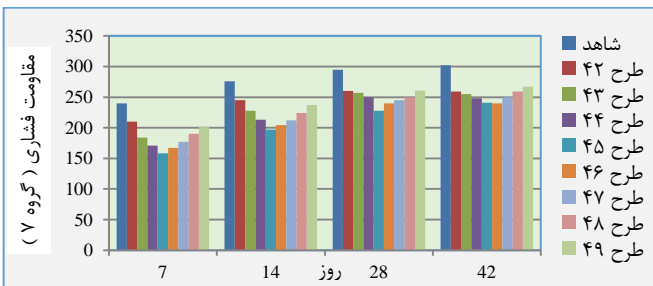
(ب)



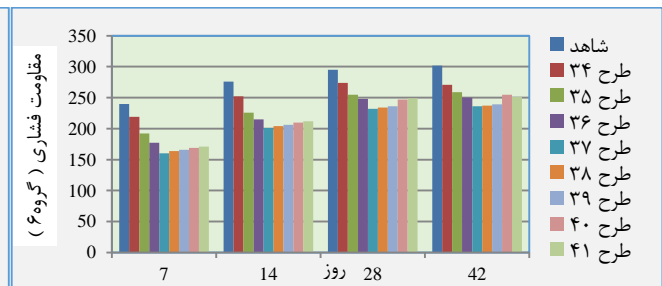
(پ)



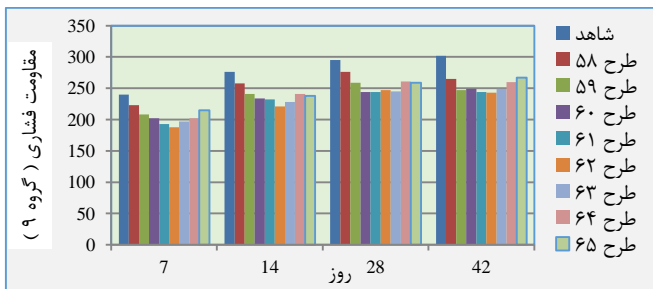
(ت)



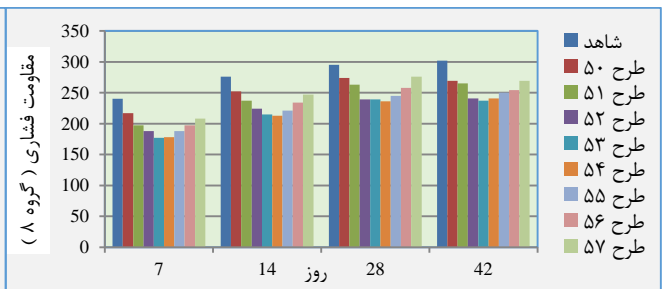
(ث)



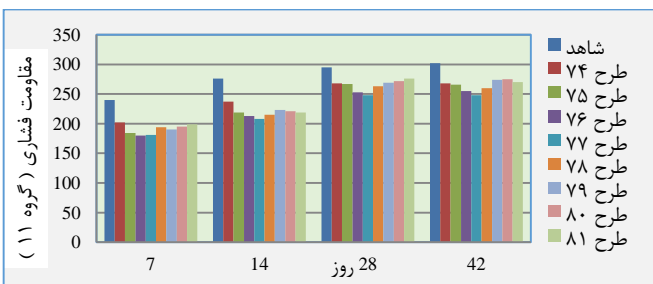
(ج)



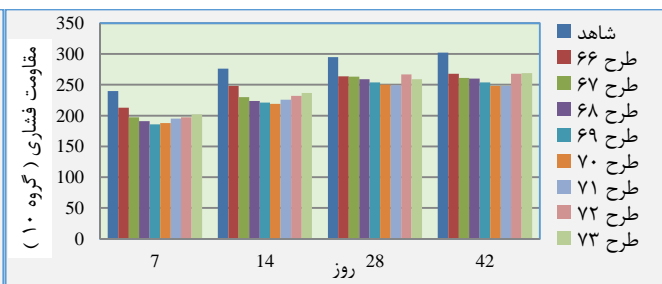
(چ)



(ح)



(خ)



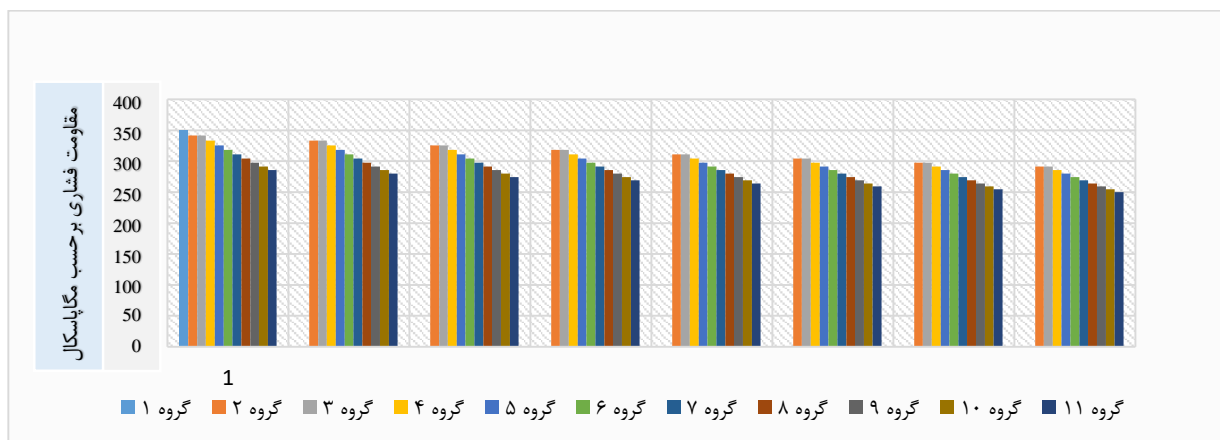
(د)

شکل ۶: نتایج مقاومت فشاری بتن گروه‌های ۲ الی ۱۱ با سنگدانه‌های سنگدانه استاندارد ماسه شوئی امامیه در محیط سولفاتی

۱-۳- ارزیابی مقایسه‌ای و تحلیل نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

خاکستربادی مورد استفاده در طرح‌های اختلاط با ملات سیمان با کاهش آب همراه شد و واکنش پذیرتر بودن این خاکستربادی منجر به افزایش مقاومت فشاری بیشتری در برابر حمله اسیدها گردید. خاکستربادی علاوه بر بهبود کارایی، سهم قابل توجهی بر مقاومت فشاری دارد همان طوری که مورد انتظار هست مقاومت فشاری با کاهش آب و افزایش تراکم همراه است، با توجه به نتیجه آزمایش اولیه در طرح شماره ۱ مشخص گردید که بتن فاقد خاکستربادی با قرار گرفتن در محیط سولفات، با کاهش مقاومت فشاری چشم‌گیری مواجه گردید که این نتیجه بیان‌گر آن است که بتن فاقد خاکستربادی و میکروسیلیس در معرض سولفات و اسید مقاوم نمی‌باشد. به طور کلی جایگزین نمودن میکروسیلیس به جای سیمان در بتن باعث افزایش زمانهای گیرش اولیه و نهایی بتن می‌گردد و با افزایش خاکستربادی به جای سیمان در بتن زمان‌های گیرش طولانی‌تر می‌شود. میکروسیلیس به علت ریزی و فعالیت پوزولانی تخلخل بتن را فوق‌العاده کاهش داده و در نتیجه در تمام سنین به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد، اما خاکستربادی به علت واکنش پذیری کند آن-ها باعث کاهش مقاومت فشاری اولیه بتن می‌گردد بنابراین به مرور زمان و با انجام واکنش‌های پوزولانی در سنین بالاتر مقاومت را افزایش می‌دهد و از آنجایی که زمان گیرش نهایی تعیین‌کننده شروع توسعه مقاومت مکانیکی در بتن می‌باشد، ارتباط موثری بین زمان گیرش نهایی و مقاومت فشاری وجود دارد به طوری که با داشتن زمان گیرش نهایی بتن، می‌توان مقاومت فشاری را تخمین زد. نتایج ثابت کرد که با افزایش درصد مواد جایگزین سیمان مورد استفاده در این مطالعه، در درازمدت، روند رشد مقاومت فشاری سرعت بیشتری را پیدا کرد که در سنین اولیه دارای مقاومت‌های فشاری کمتر و در سنین بالاتر دارای مقاومت‌های فشاری بیشتری شدند. بدیهی است که افزایش خاکستربادی و میکروسیلیس تا درصد مشخصی به این نحو عمل می‌کند و نهایتاً مقاومت فشاری در درصد مشخصی از مواد افزودنی به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد.

باید این نکته را نیز در نظر داشت که در این تحقیق عیار مواد سیمانی یکسان در نظر گرفته شده است و با جایگزینی پودرهای میکروسیلیس و خاکستربادی به جای سیمان، به مقدار زیادی از مصرف سیمان کاسته شده و به جای سیمان کاسته شده مواد افزودنی جایگزین سیمان شده‌اند و همین نکته باعث کاهش مقاومت فشاری بتن‌ها شده است. در صورتی که اگر مقدار سیمان مصرفی ثابت نگه داشته شود و در عین حال مواد افزودنی به سیمان اضافه شوند شاهد مقاومت‌های فشاری خیلی بالاتری چه در سنین اولیه و چه در سنین نهایی خواهیم بود. شکل ۷ نمودار روند کاهش میزان مصرف سیمان در بتن‌های با شن و ماسه استاندارد را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمودار روند کاهش میزان مصرف سیمان در بتن‌های با شن و ماسه استاندارد

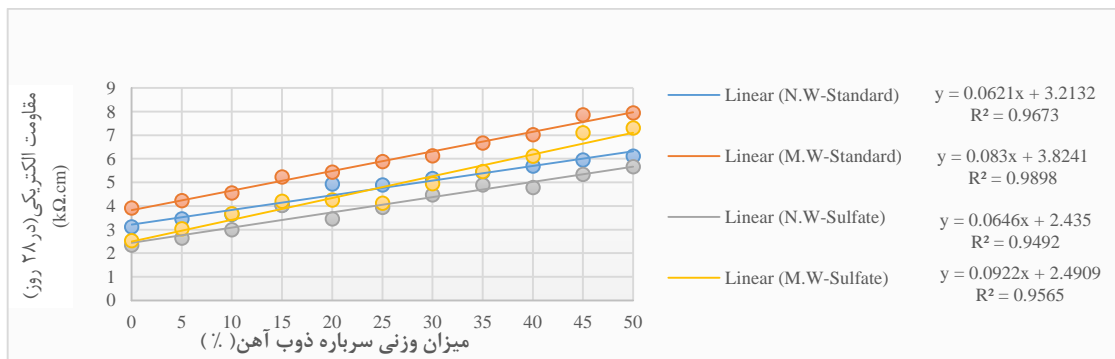
۲-۳- نتایج و تحلیل آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

نتایج آزمون مقاومت ویژه الکتریکی در شرایط محیطی سولفات نشان داد که پوزولان‌ها به ویژه میکروسیلیس، حباب‌هایی را که در زمان اختلاط ایجاد می‌شود، تثبیت نموده و کشش سطحی آب اختلاط را پایین آورده و موجب بهبود یکسان شدن اندازه‌های مختلف حباب‌های هوا گردیده و از ادغام حباب‌های هوا جلوگیری نموده و آن‌ها را به ذرات سیمان و سنگدانه متصل نمود و به همین دلیل با کاهش منافذ بتن و دفع ذرات سیمان از یکدیگر باعث افزایش مقاومت الکتریکی گردید.

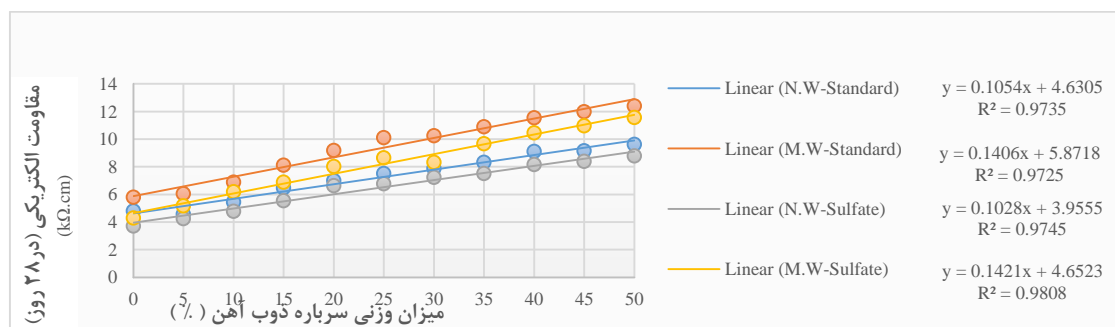
پوزولان‌ها به ویژه میکروسیلیس لایه نازک محکم دافع آبی مشابه با غشاء حباب صابون ایجاد می‌کنند که برای نگهداری و تثبیت حباب‌های هوا و جلوگیری از ادغام آن‌ها، از مقاومت و حالت ارتجاعی کافی برخوردار است، همچنین این لایه نازک آب‌گریز، آب را از حباب‌های هوا دور نگه داشته و از طرفی میکروسیلیس باعث مصرف آب‌آهک موجود در بتن گردید که این امر موجب افزایش ژل‌سیلیکاتی شد و در نتیجه از تخلخل موجود در بتن کاسته شده و نمونه بتنی متراکم‌تر شد.

با افزایش سن، سرعت انجام واکنش‌ها (هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی) در بتن کاهش یافته و از غلظت یون‌های موجود در بتن نیز کاسته شد که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شد و با پیشرفت هیدراتاسیون سیمان و همچنین انجام واکنش پوزولان که هیدروکسید کلسیم تولیدی از هیدراتاسیون سیمان را مصرف کرد در مخلوط‌های بتنی، ژل‌سیلیکاتی افزایش یافته و موجب تراکم بیش‌تر در نمونه شد، در نتیجه عملاً میزان یون آزاد در نمونه کاهش یافته و مقاومت الکتریکی نمونه افزایش یافت. بنابراین با افزایش سن نمونه و پیشرفت هیدراتاسیون نمونه و همچنین انجام واکنش پوزولانی در طرح مخلوط‌ها، میزان مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده افزایش یافت [44].

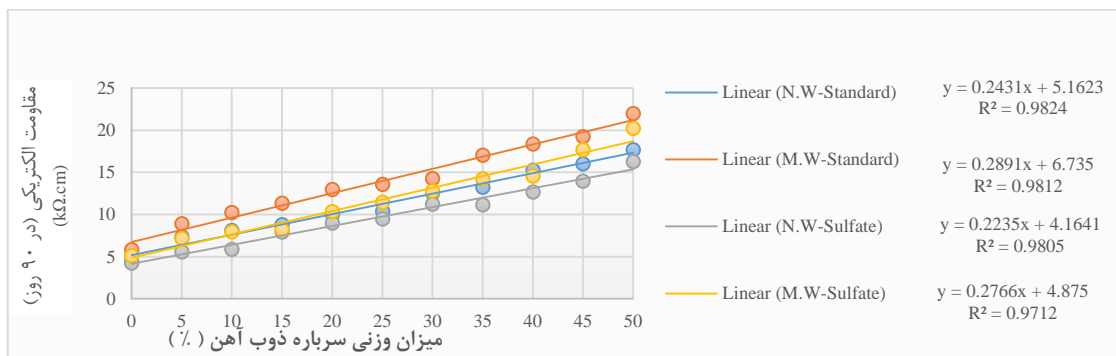
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت الکتریکی اشکال (۸، ۹، ۱۰، ۱۱) احتمال خوردگی در آزمون‌های ساخته شده با افزایش درصد پوزولان‌ها، کاهش یافت و مقاومت الکتریکی در آزمون‌ها بر اساس استاندارد ACI222 در محدوده خوب قرار گرفت [45-46].



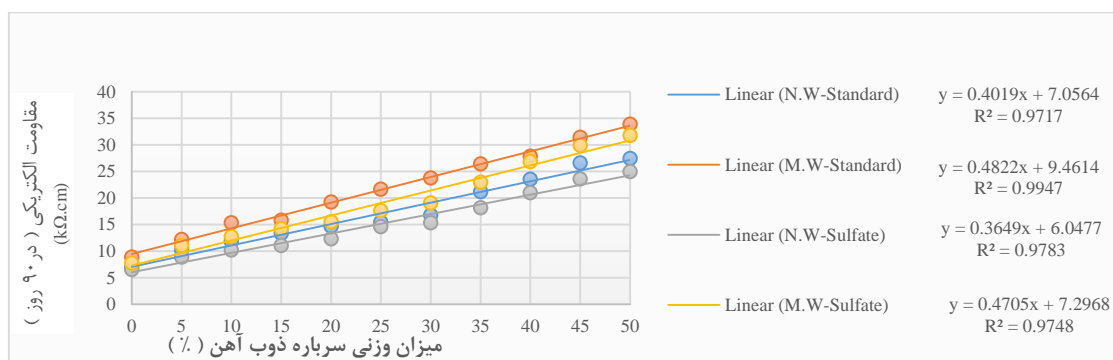
شکل ۸: مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با خاکستر بادی



شکل ۹: مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با میکروسیلیس



شکل ۱۰: مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با خاکستر بادی



شکل ۱۱: مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با میکروسیلیس

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی، نشان داد که آزمون P40-50 دارای بیشترین مقاومت الکتریکی بود که استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس به جای سیمان در سنین ۲۸ روزه باعث افزایش ۱۹۱ درصدی و همچنین در سنین ۹۰ روزه باعث افزایش ۳۰۲ درصدی مقاومت الکتریکی شد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر خاکستر بادی و میکروسیلیس بر روی روند رشد، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های در معرض آب‌های سولفات دار با انجام آزمایشات تعیین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌های ساخته شده با نمونه‌های بتنی در معرض آب‌های سولفات دار پرداخته شده است که نتایج زیر بدست آمدند:

۱- نتایج طرح شماره ۱ به عنوان طرح مبنا که در آن بتن با شن و ماسه استاندارد و بدون هیچ‌گونه ماده افزودنی پوزولانی میکروسیلیس و خاکستر بادی ساخته شده و در معرض آب سولفات دار قرار داده شد، نشان داد که بتن این طرح در تمامی سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه با کاهش مقاومت فشاری قابل ملاحظه‌ای همراه شد به طوری که این کاهش مقاومت در سن ۷ روزه تقریباً "۲۰/۸٪" در سن ۱۴ روزه ۲۸٪، در سن ۲۸ روزه ۲۹٪ و در سن ۴۲ روزه ۲۹/۸٪ بود که در این تحقیق ثابت شد که نمونه‌های بتنی بدون مواد افزودنی پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس در محیط سولفاتی مقاوم نبودند.

۲- بررسی نتایج تمامی طرح‌های بتنی در این پژوهش که با افزودن درصدهای مختلف مواد پوزولانی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جای بخشی از سیمان همراه بود، ثابت نمود که مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های بتنی در سن ۷ روزه در طرح‌های شماره ۲۳ الی ۴۷

و طرح‌های شماره ۵۳ و ۵۴ نسبت به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های مینا و شاهد کاهش یافتند ولی با افزایش سن بتن طرح‌ها، روند رشد مقاومت فشاری بتن طرح‌ها نیز افزایش یافته و میزان آن به بالاتر از میزان مقاومت فشاری طرح مینا رسید و به غیر از طرح‌های مذکور، مقاومت فشاری سایر طرح‌ها در سنین ۷ روزه از همان ابتدا بیش‌تر از میزان مقاومت فشاری طرح مینا بودند و در این طرح‌ها نیز با روند رشد سن بتن طرح‌ها، میزان مقاومت فشاری بتن طرح‌ها نیز افزایش یافت.

۳- جایگزین نمودن میکروسیلیس و خاکستر بادی به جای سیمان در بتن به‌طور کلی باعث افزایش زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن گردید. در این تحقیق عیار مواد سیمانی یکسان در نظر گرفته شد و با جایگزینی پودرهای میکروسیلیس و خاکستر بادی به جای سیمان، به مقدار زیادی از مصرف سیمان کاسته شد. نتایج نشان داد، استفاده تنهایی از پودر میکروسیلیس در بتن، در سنین اولیه و در سنین بالاتر، در هر دو حالت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شد. استفاده از هردو پودر میکروسیلیس و خاکستر بادی باعث افزایش سرعت روند رشد مقاومت فشاری بتن شد.

۴- نتایج بدست آمده از مقایسه طرح‌های بتنی در معرض آب سولفات‌دار با نمونه طرح مینا ثابت کرد که در گروه ۲ در طرح‌های شماره ۵ با افزودن فقط ۱۰٪ خاکستر بادی و در طرح شماره ۶ با افزودن فقط ۱۲/۵٪ خاکستر بادی به‌جای بخشی از سیمان، شاهد بالاترین افزایش مقاومت فشاری بتن طرح‌ها به میزان ۳۲٪ نسبت به نمونه طرح شماره ۱ (طرح مینا) شدیم و همچنین در گروه ۵ در طرح‌های شماره ۳۰ که دارای ۵٪ میکروسیلیس و ۱۲/۵٪ خاکستر بادی بود و در طرح شماره ۳۱ که حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ خاکستر بادی به‌جای بخشی از سیمان بود شاهد پائین‌ترین میزان افزایش مقاومت فشاری به میزان تقریبی ۴٪ نسبت به نمونه طرح مینا (طرح شماره ۱) شدیم.

۵- نتایج حاصله، از مقایسه طرح‌های بتنی در معرض آب سولفات‌دار با نمونه طرح شاهد ثابت نمود که طرح‌های شماره‌های ۵ با جایگزینی ۱۰٪ خاکستر بادی و طرح شماره ۶ با جایگزینی ۱۲/۵٪ خاکستر بادی از گروه ۲ که دارای بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری در بین تمامی طرح‌های بتنی مورد آزمایش در معرض آب سولفات‌دار بودند در مقایسه با میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد در سنین مختلف بصورت تقریبی با ۷/۲٪ کاهش مقاومت فشاری بتن مواجه گردیدند و طرح شماره ۳۰ با جایگزینی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۲/۵٪ خاکستر بادی و طرح شماره ۳۱ با جایگزینی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ خاکستر بادی که دارای کم‌ترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به سایر نمونه طرح‌های بتنی بودند در مقایسه با میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد با ۲۸٪ کاهش مقاومت فشاری مواجه گردیدند.

۶- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نشان داد که آزمون P40-50 دارای بیش‌ترین مقاومت الکتریکی بود که استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس به جای سیمان در سنین ۲۸ روزه باعث افزایش ۱۹۱ درصدی و همچنین در سنین ۹۰ روزه باعث افزایش ۳۰۲ درصدی مقاومت الکتریکی شد.

مطالعه فصل مشترک و تعیین کیفیت پیوستگی سنگدانه‌ها نسبتاً مشکل است و هیچ‌گونه آزمایش قابل قبولی در این زمینه وجود ندارد. با در نظر گرفتن مقادیر پیشنهادی در این طرح اختلاط به اهداف مورد نظر تحقیق دست یافتیم. پیشنهاد می‌شود ارتباط مقاومت فصل مشترک انواع بتن‌ها با سنگدانه‌های متفاوت ساخته شده با مقاومت فشاری بتن‌ها (رابطه مقاومت کششی و فشاری با مقاومت ناحیه اتصال) بررسی شود و همچنین انتظار می‌رود بررسی خرابی‌های بتن بر اساس تکنیک‌های مناسب و بر اساس مطالعات موردی در کارهای آبی، مورد توجه محققان واقع گردد.

مراجع

- [1] Zandi Y. (2016). Excellent concrete technology design based on durability parameters. *Tabriz University research Publication*.
- [2] ACI Committee 201. (2001). *Guide to Durable Concrete*.
- [3] Neville Adam. (1999). Properties of Concrete. *Abu Reihan Biruni Publications*.
- [4] Ramezani pour, Jahangiri, Ahmadi, Delnavaz. (2010). Evaluation of service life estimation models for reinforced concrete structures built in the Persian Gulf. *Second National Concrete Conference*.
- [5] Zandi Y, Husem M and Pul S. (2011). Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete. *Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development-environment-biomedicine. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*. Pages 260-264.
- [6] zandi, Y., and Akpinar, M. V. (2012). An experimental study on separately ground and together grinding Portland slag cement strength properties. *Res. J. Recent Sci.* Volume 1, no. 4, Pages 27–40.
- [7] Ahmadi Mogaddam H., Jahanyar Agdam M., Ahmadi Mogaddam A. (2006). Cement mixed with fly ash effectiv for concrete durability. *13th Conference of Civil Engineering Students Nationwide*.
- [8] Zandi Y., Akgun Y. and Durmus A. (2012). Investigating the use of high-performance concrete in partially prestressed beams and optimization of partially prestressed ratio. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol.5, No.7, Pages 2991-2996.
- [9] Y. Zandi, R. Naziri, R. Hamedani. (2013). Effect of layout and size optimization conditions in architectural design of reinforced concrete flat slab buildings *Bull. Environ. Pharmacol. Life Sci.* Pages 62-68.
- [10] Mousavi H. (2001). Factors affecting compressive strength and durability of concrete. *Cement Technology Scientific Monthly*.
- [11] ACI Committee. (2001). Protection of Metals in Concrete against Corrosion. *ACI 222-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*.
- [12] Zandi, Y. (2013). Effect of mix design on restrained shrinkage of concrete. *Bulletin of Environment and Life Sciences*. Pages 13–20.
- [13] Ayyoubi M. (2016). Application of micro silica slurry in concrete industry. *8th Iranian Concrete Conference*
- [14] Zandi, Y., and Alayi, M. (2019). Effect of comparison of Ardabil pozzuoli cement and type 2 Sufyan cement compressive strength viewpoints and improvement solutions. *Journal of Structural and Construction Engineering*. Volume 6, no. 4, Pages 95–110.
- [15] Cai, T., Zandi, Y., Agdas, A. S., Selmi, A., Issakhov, A., & Roco-Videla, A. (2021). The compressive strength of concrete retrofitted with wind ash and steel slag pozzolans with a water-cement based polymers. *Advances in concrete construction*. Pages 507-519.
- [16] Zandi Y, Öztürk N, Öztürk HT, Durmuş A. (2012). Study of utilization in cement of activated drinking water treatment sludge at various temperature. *Advances in Environmental Biology*. Pages 2958–2965.
- [17] Yan Cao, Yousef Zandi, Abouzar Rahimi, Yujia Wu, Leijie Fu, Qiangfeng Wang, Neboj`sa Deni`, Mohamed Amine Khadimallah, Momir Mili`, Marija Paunovi. (2021). A new intelligence fuzzy-based hybrid metaheuristic algorithm for analyzing the application of tea waste in concrete as natural fiber. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- [18] Zandi, Y., Burnaz, O., and Durmus, A. (2012). Determining the temperature distributions of fire exposed reinforced concrete cross sections with different methods. *Res. J. Env. Earth Sci.* Volume. 4, no. 8, Pages. 782–788.
- [19] Yan Cao, Yousef Zandi, Abouzar Rahimi, Dalibor Petkovi`c, Neboj`sa Deni`, Jelena Stojanovi`, Boban Spasi`c f, Vuk Vujovi`, Mohamed Amine Khadimallah Hamid Assilzadeh. (2021). Evaluation and monitoring of impact resistance of fiber reinforced concrete by adaptive neuro fuzzy algorithm. *Contents lists available at ScienceDirect Structures*. Pages 3750–3756.
- [20] Chia, K. S., Zhang, M. H. (2002). Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. Volume 32, Pages 639-645.
- [21] zandi, Y., and Akpinar, M. V. (2012). Evaluation of internal resistance in asphalt concretes. *Int. J. Concrete Struct. Mater.* Volume 6, Pages. 247–250.
- [22] Zandi, Y., and Alayi, M. (2019). Effect of comparison of Ardabil pozzuoli cement and type 2 Sufyan cement compressive strength viewpoints and improvement solutions. *Journal of Structural and Construction Engineering*. Volume 6, Pages 95–110.
- [22] Qiao Yanzhen, Yousef Zandi, Abouzar Rahimi, Sara Pourkhorshidi, Angel Roco-Videla, Mohamed Amin Khadimallah, Mohammed Jameel, Ehsan Kasehchi and Hamid Assilzadeh. (2021). Nano-SiO₂ for efficiency of geotechnical properties of fine soils in mining and civil engineering. *Advances in Nano Research*. Vol. 11, Pages 301-312.
- [23] MetinHusem. (2006). The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal* . Volume 41, Issue 2, Pages 155-163.

- [24] Biljana Petkovi', Alireza Sadighi Agdas, Yousef Zandi, Ivica Nikoli', Nebojša Deni', Sonja D. Radenkovic, Sattam Fahad Almojil, Angel Roco-Videla, Nenad Koji', Dragan Zlatkovi', Jelena Stojanovi'. (2021). Neuro fuzzy evaluation of circular economy based on waste generation, recycling. *Renewable energy, biomass and soil pollution*.
- [25] Mortazavi, M., and Majlessi, M. (2013). Evaluation of Silica Fume Effect on Compressive Strength of Structural Lightweight Concrete Containing LECA as Lightweight Aggregate. *Advanced Materials Research*. Pages 344 – 349
- [26] Guneyisi, E., and Gesoslu, M. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*. Volume 34.
- [27] Zandi, Y., and Abedi, M. (2020). Comparative evaluation of the effect of water / cement ratio (W / C), type and percentage of fly ash on concrete strength against chloride ion penetration and its porosity. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
- [28] Vahidi, A., MirAhmadi, M., Hassanzadeh, M., and Zabetiyan, F. (2011). Investigation of Effective Factors on Concrete impermeability Studies, Case Study of the First Iranian Concrete boat. *International Conference on Impermeability Concrete of Drinking Water Tanks*.
- [29] Shariati, M., Rafie, S., Mehrabi, P., Zandi, Y., Fooladvand, R., Gharehaghaj, B., Shariat, A., Trung, N. T., Salih, M. N. A., and Poi-Ngian, S. (2019). Experimental investigation on the effect of cementitious materials on fresh and mechanical properties of self-consolidating concrete. *Advances in Concrete Construction*, Volume 8. no. 3, Pages 225–237.
- [30] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M. D., Marto, A., Mu'azu, M. A., Ghanbari, E., Mahdizadeh, M. B., Shariati, M., and Khorami, M. (2018). Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart Struct. Syst.* Volume. 22, no. 4, Pages. 425–432.
- [31] Shariati, M., Heiati, A., Zandi, Y., Laka, H., Toghroli, A., Kianmehr, P., Safa, M., Salih, M. N. A., and Poi-Ngian, S. Application of waste tire rubber aggregate in porous concrete. (2019). *Smart Structures and Systems*. Volume. 24, no. 4, Pages. 553–5669.
- [32] Yousef Zandi, Afram Keivani. (2021). Analysis of Rectangular Reinforced Concrete Liquied Tanks by Using Yield Line Theory. *Civil and Sustainable Urban Engineering*. Vol 1, Pages 50-59.
- [33] Yadollah Sedghi, Yosef Zandi, Masoud Paknahad, Hamid Assilzadeh and Mohamed Amine Khadimallah. (2021). Optimization of shear connectors with high strength nano concrete using soft computing techniques. *Advances in Nano Research*. Volume 11, Number 6, Pages 595-605.
- [34] ASTM C 618-99a. (1999). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concret. *ASTM International, West onshohocken, PA*.
- [35] Yousef zandi; Abolfazl Rezaei. (2020). Evaluation of the effect of fly ash and zeolite powder and glass fiber on flexural behavior of structural lightweight beams made of Scoria. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. Volume 7, Special Issue 2.
- [36] Wang, Dezhi ; Zhou, Xiangming ; Meng, Yunfang ; Chen, Zhen. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction & building materials*. Vol.147, p.398-406.
- [37] Nagaratnam, Brabha H; Faheem, Ahmed; Rahman, Muhammad Ekhlatur; Mannan, Mohammad Abdul; Leblouba, Moussa. (2015). Mechanical and Durability Properties of Medium Strength Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Blended Aggregates. *Periodica polytechnica. Civil engineering. Bauingenieurwesen*. Vol.59 (2), p.155-164.
- [38] ASTM C150-05. (2005). Standard specification for Portland cement. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- [39] ASTM C494/C494M-19, Standard specification for chemical admixtures for concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [40] ASTM C33/C33M-18. (2018). Standard specification for concrete aggregates. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- [41] ACI 211.1-91. (2002). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. *American Concrete Institute, USA, reapproved*.
- [42] ASTM C 143. (2008). Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- [43] Yousef zandi; Majid Abedi. (2021). Evaluation of the effect of magnetic water on the durability of Concrete made of cast iron slag. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. Volume 8, Issue 7, 2021.
- [44] Arian Heirati, Yousef Zandi, Shahriar Tavousi Tafreshi and Manuchehr Behruyan. (2021). Analysis of the superplasticizer demand using computer simulation. *Advances in Nano Research*. Vol 11, Pages 565-57.
- [45] Cox, C., and Vennesland, V. (Eds.). (1997). Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete, Final report. European Commission. *Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN*.
- [46] ACI 222. (2002). Protection of metals in concrete against corrosion. *American Concrete Institute, USA*.