



Examining the Impact of Magnetic Field on Compressive Strength of Cement Paste with Quartz Aggregate and Zeolite

Amirhossein Moharrer¹, Majid Gholhaki^{2*}, Omid Rezaeifar³, Ali Kheyroddin⁴

¹PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

²Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

⁴Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 06.18.2021

Revised: 06.27.2021

Accepted: 06.29.2021

Keyword:

Magnetic field
Quartz
Compressive strength
Cement paste, zeolite
Piezoelectric

*Corresponding Author:

Majid Gholhaki

Email: mgholhaki@semnan.ac.ir

ABSTRACT

The use of intelligent or adaptable materials and structures for the optimal use of materials and space is one of the new technologies that has recently become very popular in the construction industry of concrete structures. In this research, one of these technologies in the concrete industry was investigated. Samples containing piezoelectric aggregate (quartz) cause internal reactions by receiving a magnetic field during load application, which were studied in this study. The magnetic field affects the cement mortar containing piezoelectric aggregate. The compressive strength of mortar containing quartz aggregate and zeolite powder under magnetic field was significantly increased compared to the control sample which did not contain quartz aggregate and zeolite and without magnetic field. Compressive strength under magnetic field increased by 100% in some samples. The researchers also found that the interaction effect of increasing the replacement percentage of quartz and zeolite and applying a magnetic field had an optimal point. In most samples in this research, increasing the percentage of Quartz and zeolite or magnetic field, resulted in increase in compressive strength up to a point, however, after that optimum point it started to decrease.





بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی سنگ‌دانه کوارتز و پودر زئولیت

امیرحسین محرر^۱، مجید قلهکی^{۲*} ID، امید رضایی‌فر^۳، علی خیرالدین^۴

- ۱- دانشجوی دکترای، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- ۲- استاد، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- ۴- استاد ممتاز، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

استفاده از مواد و سازه‌های هوشمند یا انطباق‌پذیر به‌منظور استفاده بهینه از مصالح و فضا از جمله تکنولوژی‌های نوینی محسوب می‌گردد که این اواخر در صنعت ساخت‌وسازهای سازه‌های بتنی بسیار پرطرفدار بوده است. در این پژوهش به بررسی یکی از این تکنولوژی‌ها در صنعت بتن پرداخته شده است. نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه پیزوالکتریک^۱ (کوارتز) با دریافت میدان مغناطیسی در زمان اعمال بار، باعث واکنش‌های داخلی می‌شوند که در این پژوهش مورد بررسی و توجه قرار گرفتند. میدان مغناطیسی بر ملات سیمان حاوی سنگ‌دانه پیزوالکتریک تأثیر می‌گذارد. مقاومت فشاری ملات حاوی سنگ‌دانه کوارتز و پودر زئولیت^۲ تحت میدان مغناطیسی نسبت به نمونه شاهد که فاقد سنگ‌دانه کوارتز و زئولیت می‌باشد و همچنین میدان مغناطیسی بر آن‌ها القا نشده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در برخی نمونه‌ها و در حضور میدان مغناطیسی اعمالی تا ۱۰۰ درصد گزارش شده است. همچنین محققان در این پژوهش دریافتند که تأثیر اندرکنش افزودن درصد جایگزینی کوارتز و زئولیت و اعمال میدان مغناطیسی، نقطه بهینه‌ای دارد. در بیشتر نمودارهای این پژوهش ابتدا با افزایش میزان کوارتز و زئولیت یا شدت میدان مغناطیسی، افزایش مقاومت تجربه شد و در ادامه، کاهش مقاومت ملاحظه گردید.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

کلید واژگان:

میدان مغناطیسی
سنگ‌دانه کوارتز
مقاومت فشاری
ملات سیمان
پودر زئولیت
پیزوالکتریک

*نویسنده مسئول: مجید قلهکی

پست الکترونیکی:

mgholhaki@semnan.ac.ir

¹ Piezoelectric

² Zeolite



مقدمه

با توجه به روند صعودی تقاضای صنعت ساختمان به استفاده از بتن در ساخت‌وسازهای پروژه‌های عمرانی و طبق آمارهای ارائه شده، بتن به‌عنوان دومین ماده مصرفی پس از آب، یکی از تأثیرگذارترین مواد در زندگی جوامع انسانی است که از دو قرن گذشته تاکنون همواره دست‌خوش تغییرات و به‌روزرسانی به‌منظور افزایش کاربری و بهبود مشخصات مکانیکی و همچنین اقتصادی‌تر شدن مصرف آن شده است. بنا بر تخمین سازمان بازار جهانی سیمان، کل بتنی که در سال ۲۰۲۱ میلادی در جهان مصرف خواهد شد بیش از ۴.۵ میلیارد تن یعنی نزدیک به ۶۰۰ کیلوگرم به‌ازای هر نفر در جهان اعلام شده است [۱]؛ بنابراین تحقیق و پژوهش در رابطه با به‌کارگیری فناوری‌ها و مصالح نوین برای ساخت بتن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور اقتصادی شدن بتن، راه‌های بسیاری از گذشته پیشنهاد شده است؛ از جمله پژوهش بهرامی و همکاران (۲۰۲۱) [۲] که به بررسی استفاده از بتن الیافی در ساخت جداول بتنی پرداخته است.

استفاده از میدان‌های مغناطیسی و جریان‌های الکتریکی در صنعت ساختمان، در ابتدای راه خود می‌باشد؛ در حالی که کاربرد پدیده‌های مغناطیس و الکتریسیته در سایر علوم، سرچشمه اغلب اکتشافات و فناوری‌ها در دو قرن اخیر بوده است. استفاده از پودر ژئولیت و سنگدانه‌های پیزوالکتریک در نقاطی از سازه تحت اثر دستگاه‌های الکتریکی-مکانیکی، اولین گام در زمینه هوشمندسازی و کنترل سازه‌ها در برابر نیروهای دینامیکی نظیر زلزله و باد است. امروزه با توجه به ضرورت استفاده از بتن‌های با مقاومت، بادوام و کارایی بالاتر، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که تکنولوژی میدان مغناطیسی از جمله این روش‌هاست. میدان مغناطیسی، پارامتری است که به‌واسطه حضور آهن‌ربا در اطراف آن ایجاد می‌شود و مجاور دو جسم که خاصیت آهن‌ربایی داشته باشند تشکیل می‌گردد. همان‌طور که مشخص است آهن‌ربا دارای دو قطب می‌باشد که جریان میدان مغناطیسی همواره در خارج از آهن‌ربا از قطب مثبت به قطب منفی است و در داخل آهن‌ربا از قطب منفی به قطب مثبت در جریان خواهد بود و همواره به‌صورت پایدار این میدان به شکل یک مدار بسته وجود دارد [۳].

واحد اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در سیستم بین‌المللی تسلا^۱ معرفی گردیده است که به دلیل اینکه این شدت بسیار قوی است واحد کوچک‌تری به نام گaus^۲ نیز در مجامع علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر تسلا معادل ۱۰۰۰۰ گaus می‌باشد [۴].

برای تعیین و تشخیص میزان شدت میدان مغناطیسی به‌منظور طراحی دستگاه مولد مناسب در راستای اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌ها می‌توان از رابطه ۱ قانون آمپر استفاده کرد.

$$\beta = \mu NI / 2a \quad (1)$$

مطابق فرمول بالا شدت میدان مغناطیسی به بتن به عواملی همچون شدت میدان مغناطیسی، ضریب تروایی میدان، تعداد دورهای سیم‌پیچ و شعاع حلقه و فاصله نمونه بتنی تا محل القای بستگی دارد [۳]. مواد در زمان القای یک میدان مغناطیسی از سوی سیم‌لوله‌ها به آنها به چند گروه تقسیم می‌شوند: مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و دیامغناطیس. مواد فرومغناطیس در زمان القای میدان مغناطیسی، مغناطیس می‌شوند و پس از قطع میدان مغناطیسی اثر مغناطیس شده باقی می‌ماند در صورتی که در مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس، اثر مغناطیس شدن

¹ Tesla² Gauss

مواد تا حد بسیار زیادی با قطع میدان مغناطیسه از بین می‌رود [۴]. اثر میدان مغناطیسی را اولین بار آنتون لورنتس^۱؛ فیزیکدان هلندی در سال ۱۹۰۲ کشف کرد و نقطه شروعی برای تحول در حوزه‌های مهندسی به‌ویژه رشته‌های صنعتی و کشاورزی گردید. در پژوهش‌های ابتدایی متوجه گردیدند که اعمال میدان مغناطیسی به آب باعث می‌شود که مولکول‌های دوقطبی آب از هم جدا شوند و آرایش مشخصی بگیرند و در نتیجه، ویسکوزیته آب کم گردد [۵].

در سایر پژوهش‌ها مشاهده گردید در صورتی که آب با یک سرعت ثابت از میدان مغناطیسی عبور کند مولکول‌های دو قطبی آن، جهت‌گیری خاصی را دنبال می‌کنند و برخی از خواص فیزیکی آن تغییر می‌کند. استفاده از آب مغناطیسه باعث کاهش مصرف سیمان تا ۱۰ درصد و افزایش مقاومت ملات سیمان تا ۲۰ درصد می‌شود [۶] و [۷] و [۸]. در سال ۲۰۱۷ عبدالمجید و همکاران [۹] اثر میدان مغناطیسی را بر کارایی و مقاومت بتن بررسی کردند و دریافتند با استفاده از آب مغناطیسه علاوه بر کاهش ۳ درصدی وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری آزمون‌ها به‌صورت میانگین ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و همچنین کارایی بتن تا ۴ برابر بهتر می‌شود. قلیه‌کی و همکاران [۱۰] نیز در سال ۲۰۱۸ تأثیر آب مغناطیسه بر بتن خودتراکم حاوی درصد‌های مختلف پوزولان را بررسی کردند و در این پژوهش دریافتند که استفاده از میدان مغناطیسه می‌تواند تا ۴۹ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه حاوی آب معمولی را نتیجه دهد. حج‌فروش و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر توأمان ژئولیت و آب مغناطیسی در خواص مکانیکی بتن خودتراکم پرداختند. نتیجه پژوهش آن‌ها این بود که استفاده از آب مغناطیسی در طرح اختلاط‌های مورد پژوهش می‌تواند به اندازه ۱۰ درصد جذب آب و ۴۵ درصد مصرف فوق‌روان‌کننده را کاهش دهد و همچنین در طرح اختلاط‌هایی که اثر اندرکنش مشترک استفاده از آب مغناطیسی و پودر ژئولیت در بتن موجود باشد، مقاومت فشاری بتن را در سن ۹۰ روزه به اندازه ۳۰ درصد بهبود می‌بخشد. ابویسانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۲] به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص بتن تازه و بتن سخت‌شده پرداختند و بهینه‌ترین شدت میدان مغناطیسه را برای اعمال میدان آزمودند. محققان در این پژوهش دریافتند که میزان تأثیر میدان بر بتن تازه بسیار ناچیز است در حالی که اعمال میدان مغناطیسی بر بتن سخت‌شده در زمان اعمال بار می‌تواند تا نزدیک به ۹ درصد، مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. همچنین در پژوهشی دیگر، ابویسانی و همکاران [۱۳] دریافتند که با اعمال میدان مغناطیسی به تیرهای بتن مسلح کوچک‌مقیاس در دو حالت بتن سخت‌شده و بتن تازه در قالب ریخته‌شده، مقاومت تیر در حالت اعمال میدان مغناطیسی به امان دارای بتن تازه، تغییری ایجاد نمی‌کند ولی در حالت سخت‌شده باعث افزایش ظرفیت باربری تا ۶/۹ درصد می‌شود و شکل‌پذیری بتن به میزان ۱۳۵ درصد افزایش می‌یابد و در نهایت دریافتند که تغییر شکل نهایی وسط تیر در لحظه گسیختگی در تیر بتنی که در زمان اعمال بار تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند ۲۶/۹ درصد افزایش می‌یابد. رضایی‌فر و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ستون بتن مسلح در حالت تازه و سخت‌شده پرداختند. در این پژوهش، نمونه‌های بتن تازه به مدت ۲ دقیقه و نمونه‌های سخت‌شده در طول مدت بارگذاری، تحت میدان مغناطیسی قرار گرفتند که نتایج نشان می‌دهد ظرفیت نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد ۱۱ درصد افزایش داشته است. در خصوص جهت اعمال میدان مغناطیسی ابویسانی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر نمونه‌های بتنی حاوی براده آهن در راستاهای متفاوت پرداختند. در این پژوهش، میزان شدت میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا تعیین گردید و در نتیجه این پژوهش آمده است که اعمال میدان مغناطیسی در بتن تازه در راستای موازی با اعمال نیرو بیش از ۱۱ درصد، کاهش مقاومت دارد و اگر در راستای عمود بر اعمال نیروی میدان اعمال گردد؛ مقاومت فشاری، بیش از ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. صفری تربوزاق و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ در بررسی تأثیر میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا به بتن تازه و سخت شده در

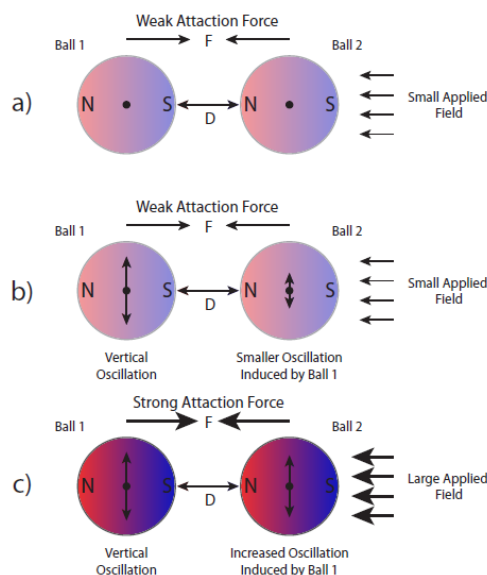
¹ Antoon Lorentz

مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه به تأثیر فزاینده این فرایند پی بردند و نتیجه آزمایش‌ها، رشد ۴ درصدی در مقاومت آزمون‌هایی که در حالت تازه، تحت میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند و همچنین رشد ۶ درصدی مقاومت در زمان اعمال میدان مغناطیسی در بتن سخت‌شده را نشان داده است. صفری تربوزاق و همکاران [۱۷] در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی پایدار به شدت ۰/۵ تسلا بر مقاومت فشاری بتن حاوی نانولوله‌های کربنی پرداختند و بررسی‌ها روی نمونه‌هایی که در زمان اعمال بار، تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گرفتند افزایش مقاومت ۱۶ درصد در سن ۷ روزه و ۱۳ درصد در سن ۲۸ روزه را نشان دادند. در این پژوهش همچنین تعیین گردید اعمال میدان مغناطیسی بر نانولوله‌ها باعث می‌شود که نانولوله‌های کربنی در راستای عمود بر بار فشاری، جهت‌گیری کنند و باعث استحکام بیشتر محل ایجاد ترک‌های ریز می‌شود.

فرضیه‌های واکنش پیزوالکتریک‌ها به میدان مغناطیسی

فرضیه اول: به‌واسطه ایجاد میدان مغناطیسی، ذرات تشکیل‌دهنده سنگدانه پیزوالکتریک کوارتز به همدیگر جذب می‌شوند و باعث ایجاد سختی بین ذرات سنگدانه می‌گردند.

فرضیه دوم: حرکت ذرات تشکیل‌دهنده به‌واسطه لرزش داخلی باعث ایجاد تنش داخلی می‌شود و این برهم‌خوردن نظم داخلی باعث ایجاد انسجام مولکولی و سختی بیشتر بین مولکولی مواد پیزوالکتریک می‌گردد. می‌توان مطابق شکل ۱ تأثیر شماتیک دو ماده تحت القای میدان مغناطیسی را مشاهده کرد [۱۸].



شکل ۱. تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر جسم در سه حالت (a) ماده جاذب میدان نیست و میدان ضعیف اعمال می‌گردد. (B) یکی از ماده‌ها جاذب میدان است و میدان ضعیف اعمال می‌گردد. (C) دو ماده جاذب و میدان مغناطیسی قوی به اجسام وارد گردد [۱۹].

کومار و همکاران^۱ [۲۰-۲۲] در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ در پژوهش خود به بررسی مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه کوارتز پرداختند. در این پژوهش با جایگزینی سنگدانه کوارتز در نسبت‌های ۰ و ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ به جای سنگدانه معمولی تحت شرایط و طرح اختلاط‌های ثابت پرداخته شده است. نتایج به‌دست‌آمده گویای آن است که با افزایش میزان نسبت جایگزینی کوارتز، مقاومت‌های خمشی و فشاری و آزمون بیرون کشیدگی کاهش می‌یابد و تخلخل بتن در یک رفتار دوگانه تا ۴۰ درصد جایگزینی تخلخل کاهش می‌یابد و پس از آن، تخلخل افزایش پیدا می‌کند. چن^۲ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر افزودن ژئولیت بر خواص رئولوژی و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۷ سانتی‌متری ملات سیمان در سن‌های ۷ و ۲۸ و ۷۰ روزه پرداختند. میزان افزودن ژئولیت در خمیر سیمان ۰-۵-۱۰ و ۲۰ درصد وزن کل نمونه انتخاب گردید و نسبت‌های آب به مواد سیمانی در این پژوهش بین ۰/۴۵ تا ۰/۷ انتخاب گردید. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر افزودن پودر ژئولیت به‌واسطه جاذب آب بودن در خواص رئولوژی ملات، مناسب نمی‌باشد و با افزایش نسبت ژئولیت کارپذیری ملات، کاهش می‌یابد و محققان در خصوص مقاومت به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان ژئولیت، مقاومت نمونه‌های بتنی در سن ۷ روزه کاهش مقاومت دارد ولی در سن ۲۸ و ۷۰ روزه با درصدهای جایگزینی ۱۰ درصد مقاومت فشاری می‌تواند بین ۵ تا ۱۴ درصد افزایش مقاومت داشته باشد و مجدداً با افزایش میزان ژئولیت به‌ویژه در سن ۲۸ روزگی، کاهش مقاومت نمونه‌های ملات سیمان مشاهده می‌گردد. در پژوهشی دیگر که ایلماز و همکاران^۳ [۲۴] در خصوص خواص ملات سیمان حاوی ژئولیت انجام دادند مشخص گردید که با افزایش میزان جایگزینی ژئولیت تا ۲۰ درصد، وزن سیمان مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات سیمان، ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. کن پولات^۴ و همکاران [۲۵] نیز در پژوهشی دیگر در مورد تأثیر استفاده از ژئولیت در خمیر سیمان اثبات کردند که با جایگزینی ژئولیت با سیمان تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری خمیر سیمان نسبت به نمونه شاهد ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش درصد پودر ژئولیت، بیشتر از ۲۰ درصد، مقاومت فشاری ملات سیمان، کاهش می‌یابد.

اهمیت تحقیق

در بیشتر علوم مهندسی، بررسی استفاده از میدان مغناطیسی انجام شده است و استفاده از این تکنولوژی در صنعت ساختمان و به‌ویژه بتن و ملات، بسیار نوپا می‌باشد. حضور میدان مغناطیسی می‌تواند در هوشمندسازی سازه‌های بتنی، نقش به‌سزایی داشته باشد. تاکنون مطالعاتی در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص ملات سیمان حاوی سنگدانه پیزوالکتریک انجام نشده است و این پژوهش می‌تواند باب تازه‌ای را در خصوص امکان ورود هم‌زمان مواد متأثر از میدان مغناطیسی همچون سنگدانه‌ها و مصالح پیزوالکتریک در صنعت بتن باز نماید. در این پژوهش به بررسی میدان‌های مغناطیسی متفاوت بر ملات بتن پرداخته شده است و با فرض اثربخشی بیشتر، ژئولیت و سنگدانه کوارتز را با درصدهای ۰ و ۱۰ و ۲۵ درصد جایگزینی با سنگدانه معمولی انجام گردید. در نهایت، در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری آزمونه‌ها تعیین شد.

¹ Kumar et al

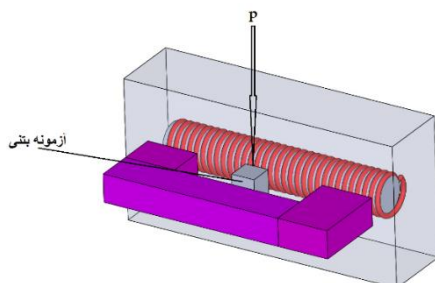
² Chen et al

³ Yilmaz et al

⁴ Canpolat et al

روش‌شناسی

در این پژوهش، نگارندگان پس از جمع‌آوری اطلاعات در خصوص میدان مغناطیسی، خواص سنگ‌دانه‌های پیزوالکتریک و بررسی طرح اختلاط‌های موجود، به طراحی و محاسبه دستگاه میدان مغناطیسی پرداختند و طرح اختلاط نمونه ملات سیمان شاهد را براساس استاندارد ASTM C 109 [۲۶] محاسبه کردند.



شکل ۲. شمای دستگاه مولد میدان در زمان بارگذاری آزمونه

برای طراحی دستگاه القای میدان مغناطیسی مطابق شکل ۲ از رابطه ۲ معادله آمپر که در گذشته بدان اشاره گردید استفاده شد تا بتوان براساس شدت میدان مغناطیسی لازم، تعداد دورهای پیچه و سایر مشخصات را احصا کرد. براساس معادله آمپر، شدت میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه بتنی به ضریب تراوایی مغناطیسی و تعداد دورهای پیچه سیم‌پیچ و شدت جریان و شعاع حلقه پیچه بستگی دارد. برای اطمینان از شدت میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه‌ها از دو مکانیزم استفاده گردید:

- ۱- به کمک دیمر می‌توان میزان آمپر ورودی به دستگاه را کم و زیاد کرد و به‌وسیله مولتی‌متر، میزان آمپر ورودی به دستگاه تعیین و بر روی دیمر مشخص می‌گردد.
 - ۲- سنسور اثر هال برای اطمینان و کالیبره دستگاه در نقاط مختلف میدان مغناطیسه القایی قرار داده می‌شود تا از شدت میدان مغناطیسی، اطمینان حاصل گردد.
- با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی کوارتز و زئولیت می‌باشد؛ از آزمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی ۵۰ میلی‌متری برای انجام آزمایش استفاده گردید. پس از شکست آزمونه‌ها و به‌دست آمدن نتایج، از نرم‌افزار تحلیلی SPSS^۱ استفاده گردید تا بتوان از نتایج به‌دست‌آمده تفسیر جامع و کاملی را ارائه کرد.

نحوه انجام آزمایش

مصالح مصرفی

در این تحقیق برای ساخت آزمونه‌های خمشی و فشاری ملات بتنی، از سیمان تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص بلین ۳۱۱۰ سانتی‌مترمربع بر گرم و همچنین با سطح ویژه و تخلخل ۱/۷ مترمربع بر گرم استفاده شد. آزمایش کاهش جرم حاصل از آتش گرفتن سیمان معادل ۰/۸۱ درصد می‌باشد و همچنین آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده مطابق جدول ۱ تعیین گردید.

¹ Statistical Package for the Social Sciences

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	SrO	ZnO	MnO	P ₂ O ₅
۲۱.۳	۳.۸۵	۵.۲۶	۶۳.۵	*	۲.۴	۱.۴۶	۰.۵۳	۰.۷۳	۰.۸۱	*	*	*	*

به‌منظور ساخت ملات سیمان مطابق استاندارد تعیین مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ملات سیمانی ASTM C 109 از دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های اشاره شده در این استاندارد، از شرکت آزمون تهیه و استفاده گردید. از سنگ‌دانه کوارتز به‌منظور جایگزینی با سنگ‌دانه معمولی با دانه‌بندی بین ۲ الی ۴ میلی‌متر استفاده گردید. سطح ویژه پودر زئولیت مورد استفاده در این پژوهش ۸۰۷۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد. آنالیز شیمیایی پودر زئولیت نیز مطابق جدول ۲ تعیین گردید.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی زئولیت

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	SrO	ZnO	MnO	P ₂ O ₅
۶۷.۸۰	۱.۴۴	۱۳.۷۰	۱.۷۰	*	۰.۵۰	۱.۲۰	۲.۰۵	۱.۴۲	۱۰.۲۳	*	*	*	*

طرح اختلاط ملات و آماده‌سازی نمونه‌ها

در روند ساخت و اختلاط نمونه‌ها ابتدا سنگ‌دانه‌ها در درون میکسر مخصوص ملات ریخته شد و با $\frac{1}{3}$ آب، طرح اختلاط به مدت ۱/۵ دقیقه اختلاط انجام گردید. سپس سیمان و بقیه آب در مخلوط‌کن ریخته شد و در دو زمان یک دقیقه‌ای مخلوط گردید.

نکته: در زمان اختلاط سنگ‌دانه معمولی، کوارتز و زئولیت، با فاصله زمانی ۱۵ ثانیه ابتدا سنگ‌دانه معمولی، سپس کوارتز و در آخر، زئولیت به مخلوط اضافه گردید. در این تحقیق همان‌طور که گفته شد طرح اختلاط شاهد، طبق استاندارد ASTM C 109 مطابق جدول ۳ طرح اختلاط محاسبه و ساخته شد. پس از اتمام اختلاط مصالح ملات تهیه شده، ملات درون قالب‌های مکعبی ریخته شد و به‌منظور تراکم بهتر، قالب‌های پر شده روی میز ویبره قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت، قالب نمونه‌ها باز شد و آزمون‌ها تا سن ۲۸ روزگی درون حوضچه‌های عمل‌آوری نگهداری گردید.

جدول ۳. طرح اختلاط بر اساس کیلوگرم در هر متر مکعب

شماره طرح	سیمان (کیلوگرم)	ماسه		زئولیت		کوارتز		آب (کیلوگرم)
		وزن (کیلوگرم)	درصد	وزن (کیلوگرم)	درصد	وزن (کیلوگرم)	درصد	
۱	۵۰۰	۱۳۶۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۰
۲	۵۰۰	۱۲۲۴	۹۰	۰	۰	۱۳۶	۱۰	۲۴۰
۳	۵۰۰	۱۰۲۰	۷۵	۰	۰	۳۵۳.۶	۲۵	۲۴۰
۴	۵۰۰	۱۲۲۴	۹۰	۱۳۶	۱۰	۰	۰	۲۴۰
۵	۵۰۰	۱۰۸۸	۸۰	۱۳۶	۱۰	۱۳۶	۱۰	۲۴۰
۶	۵۰۰	۸۸۵.۳	۶۵	۴۱۲.۵	۱۰	۳۵۳.۶	۲۵	۲۴۰
۷	۵۰۰	۱۰۲۰	۷۵	۳۵۳.۶	۲۵	۰	۰	۲۴۰
۸	۵۰۰	۸۸۵.۳	۶۵	۳۵۳.۶	۲۵	۴۱۲.۵	۱۰	۲۴۰
۹	۵۰۰	۶۸۱	۵۰	۳۵۳.۶	۲۵	۳۵۳.۶	۲۵	۲۴۰

برای کنترل هر طرح، اختلاط و شدت میدان مغناطیسه که شامل ۲۷ نمونه منحصربه‌فرد می‌شود ۳ آزمون مکعبی ۵۰ میلی‌متری ۲۸ روزه تهیه گردید که با این احتساب در مجموع، تعداد آزمون‌ها ۸۱ آزمون شد.

شکست آزمون‌ها

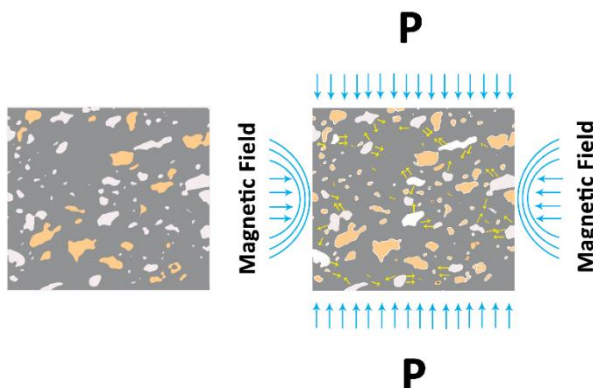
برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، آزمون‌ها ۳ الی ۴ ساعت پیش از شکست، از حوضچه عمل‌آوری بیرون آورده شدند تا آب موجود در هسته از آزمون‌ها خارج گردد. شدت‌های میدان مغناطیسی برای اعمال میدان مغناطیسی در این پژوهش ۰، ۰.۳ و ۰.۵ تسلا انتخاب گردید که بر آزمون‌های حاصل از ۹ طرح اختلاط که در جدول ۳ آمده است اعمال گردد.

دستگاه مولد و القاگر میدان مغناطیسی ساخته شده که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میدان مغناطیسی عمود بر راستای اعمال بار را اعمال کرد. در این پژوهش القای میدان مغناطیسی باید از شروع بارگذاری تا زمان گسیختگی اعمال گردد.



شکل ۳. دستگاه مولد میدان مغناطیسی

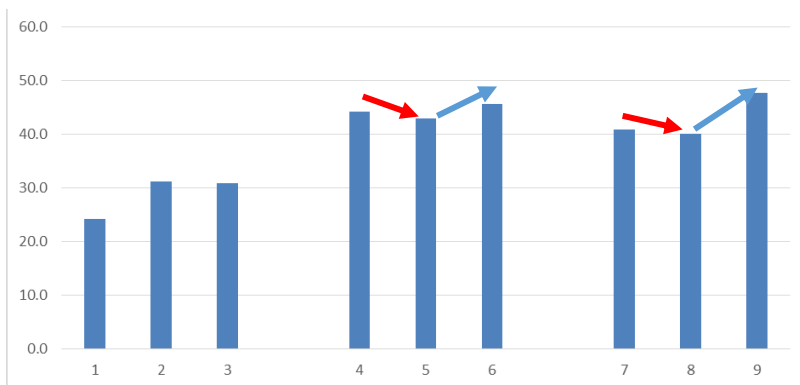
این پژوهش بر این فرض است که در زمان اعمال میدان مغناطیسی، سنگدانه‌های پیزوالکتریک نسبت به یکدیگر واکنش نشان می‌دهند و با ایجاد خاصیت جاذبه بین سنگدانه‌های کوارتزمانند، هسته بتنی منسجم‌تر و مقاوم‌تری را تشکیل دهد.



شکل ۴. اثر میدان مغناطیسی بر نمونه ملات حاوی کوارتز و ژئولیت

نتایج و تفسیرها

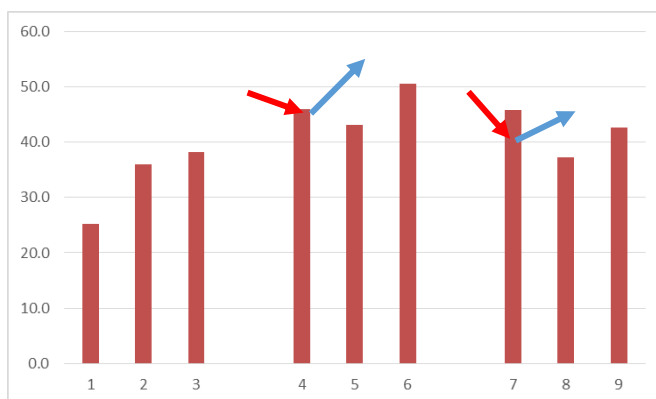
نمودار ۱ به بررسی مقاومت‌های فشاری طرح‌های اختلاط کنترلی فاقد میدان مغناطیسی که در آن‌ها سنگ‌دانه کوارتز و زئولیت با سنگ‌دانه عادی با درصد‌های مشخص جایگزین شده است پرداخته است. در نمونه ۲ مقاومت فشاری به‌ازای جایگزین کردن ۱۰ درصد سنگ‌دانه کوارتز نسبت به نمونه شاهد، افزایش مقاومت ۲۸/۵ درصدی تجربه شده است. همان‌طور که به‌وسیله نشانگرها نمایش داده شده است در طرح اختلاط ۴ و ۵ و ۶ که در میزان زئولیت موجود در آن‌ها ۱۰ درصد وزن سنگ‌دانه می‌باشد، ابتدا با جایگزینی ۱۰ درصد سنگ‌دانه کوارتز به جای سنگ‌دانه معمولی، کاهش مقاومت جزیی را تجربه می‌کند. در ادامه با جایگزینی ۲۵ درصدی کوارتز، مقاومت از ۴۲/۹ مگاپاسکال به ۴۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد که این به معنی افزایش مقاومت بیش از ۶ درصدی می‌باشد. همین روند در نمونه‌های شماره ۷ و ۸ و ۹ که میزان زئولیت آن‌ها ۲۵ درصد می‌باشد تکرار شده است و در ابتدا کاهش مقاومت جزیی در نمودار، تجربه شده است و در ادامه، با افزایش میزان جایگزینی سنگ‌دانه کوارتز افزایش ۱۹/۵ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه معادل ۷/۷ مگا پاسکال اتفاق افتاده است. نگارندگان بر این باورند که دلیل روند صعودی و نزولی شدن نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزودن زئولیت می‌تواند به علت این باشد که مقاومت فشاری خمیر سیمان با افزودن درصد مشخصی زئولیت، ابتدا افزایش می‌یابد و پس از آن، افزایش میزان زئولیت، باعث کاهش مقاومت فشاری ملات سیمان می‌شود که چنین نتیجه‌ای را ایلماز و همکاران [۲۴] نیز گزارش کردند. بالاترین میزان افزایش مقاومت بین نمونه‌های کنترلی نسبت به نمونه شاهد، مربوط به میانگین آزمونه‌های ۲۸ روزه شماره ۹ بود که با افزایش ۲۳/۵ مگاپاسکالی به مقاومت ۴۷/۷ مگاپاسکال رسیده‌اند. به نظر می‌رسد افزایش مقاومت فشاری نمونه شماره ۹ می‌تواند دو علت داشته باشد: ۱- با توجه به اینکه میزان آب در تمامی طرح اختلاط‌ها یکسان بوده است؛ نسبت آب به سیمان $\frac{W}{CM}$ در نمونه شماره ۹ به علت جایگزینی ۲۵ درصدی زئولیت می‌شود به عدد ۰/۲۸ می‌رسد. ۲- با افزایش میزان سنگ‌دانه کوارتز به علت سختی بالاتر سنگ‌دانه و مقاومت بالای آن، مقاومت ملات خمیر سیمان افزایش می‌یابد.



نمودار ۱. روند رشد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های کنترلی (میدان مغناطیسی ۰ تسلا)

نمودار ۲ به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی با شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا پرداخته است. در ابتدا با افزایش میزان جایگزینی سنگ‌دانه کوارتز، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه با رشد ۱۶/۵ درصدی به مقاومت فشاری ۳۸/۲ مگاپاسکال می‌رسد. در ادامه بررسی نمودار ۲ مشاهده می‌گردد که رویه تغییرات مقاومت، مشابه نمودار ۱ می‌باشد و با افزودن میزان سنگ‌دانه کوارتز از ۰ درصد به ۱۰ درصد، مقاومت اندکی کاهش و سپس با جایگزینی ۲۵ درصدی

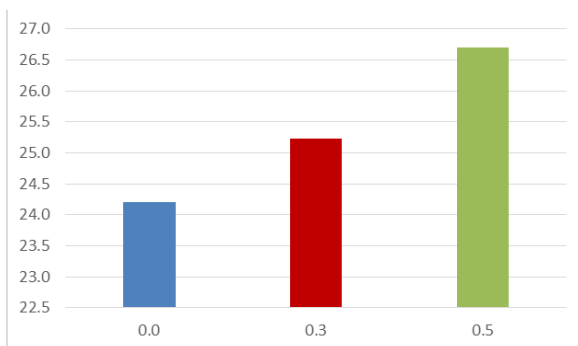
میزان سنگ‌دانه کوارتز، مقاومت فشاری، روبه افزایشی می‌گیرد که دلیل این تغییرات در تفسیر نمودار ۱ بیان گردید. بالاترین مقاومت در این نمودار مربوط به نمونه شماره ۶ بود که مقاومت ۵۰/۵ مگاپاسکال را نمایش می‌دهد که دلیل آن ممکن است استفاده از بهینه درصد زئولیت و سنگدانه کوارتز در طرح اختلاط باشد و همچنین با مشاهده نمودار می‌توان ملاحظه کرد که ۰/۳ تسلا مؤثرترین شدت میدان مغناطیسی در این پژوهش می‌باشد؛ زیرا با کاهش شدت میدان مغناطیسی، کارایی مواد پیزوالکتریک موجود در نمونه‌ها کافی نمی‌باشد و با افزودن این شدت میدان، به‌نظر می‌رسد به علت تکانه‌ها و تنش‌های داخلی که مواد پیزوالکتریک ایجاد می‌کنند کاهش مقاومت بتن را نسبت به حالت بهینه اعمال می‌کند. در مقایسه نتایج آزمون‌های شماره ۷ و ۸ و ۹ که همگی در میزان زئولیت ۲۵ درصد مشترک هستند می‌توان ملاحظه کرد که در ابتدا با کاهش ۲۲ درصدی روبه‌رو می‌شود و در ادامه، مقاومت فشاری نمونه در نمونه شماره ۹ معادل ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.



نمودار ۲. روند رشد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های کنترلی (میدان مغناطیسی ۰.۳ تسلا)

در بررسی تغییرات مقاومت فشاری در اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی در یک طرح اختلاط، پژوهشگران به نتایجی دست یافتند که در ادامه بدان اشاره می‌گردد.

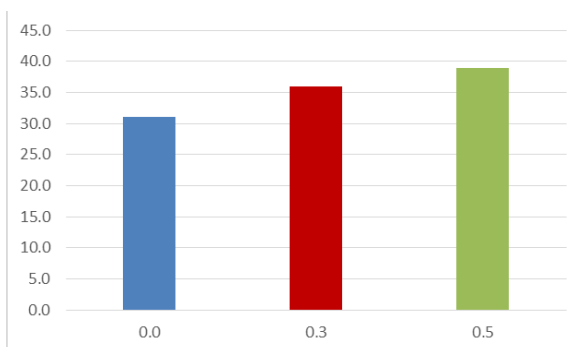
نمودار ۳ نشان‌دهنده تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه طرح اختلاط شاهد است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که اعمال میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری نمونه، تأثیرگذار بوده است و با افزایش ۲/۵ مگاپاسکالی مقاومت نمونه‌ها به ۲۶/۷ مگاپاسکال می‌رسد.



نمودار ۳. تغییرات میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر اثر اعمال میدان مغناطیسی در طرح اختلاط شماره ۱

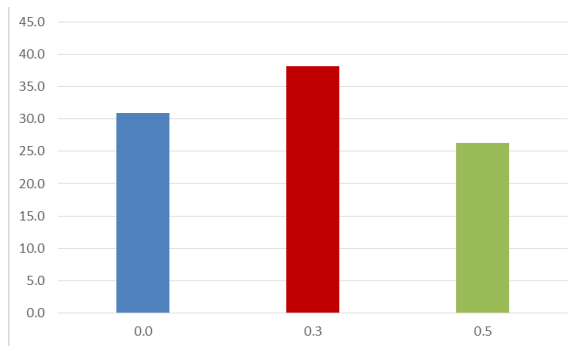
نمودار ۴ تغییرات مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره ۲ تحت شدت‌های میدان مغناطیسی متفاوت را نشان می‌دهد. تغییرات میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری، قابل ملاحظه و معنی‌دار می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با اعمال میدان مغناطیسی به شدت ۰/۳ تسلا مقاومت فشاری به میزان ۴/۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و در ادامه با افزایش میدان مغناطیسی به ۰/۵ تسلا، به میزان ۳/۱ مگاپاسکال مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند؛ این بدین معنی است که مقاومت فشاری به ۳۹ مگاپاسکال می‌رسد.

همان‌طور که اشاره شد اعمال میدان مغناطیسی در این طرح، اختلاط معنادار و اثر مثبت داشته است و برای شدت میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا ۲۵/۵ درصد افزایش مقاومت نسبت به حالت فقدان میدان مغناطیسی تجربه شده است. این روند افزایشی به این دلیل است که میزان ژئولیت و سنگ‌دانه کوارتز، در بازه بهینه قرار دارد و طبق فرضیه بیان شده در پژوهش یو و همکاران [۱۹] مصالح پیزوالکتریک در زمان اعمال میدان مغناطیسی نسبت به یکدیگر، نیروی جاذبه ایجاد می‌کنند و همین امر باعث افزایش پیوستگی هسته بتن می‌شود و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



نمودار ۴. تغییرات میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر اثر اعمال میدان مغناطیسی در طرح اختلاط شماره ۲

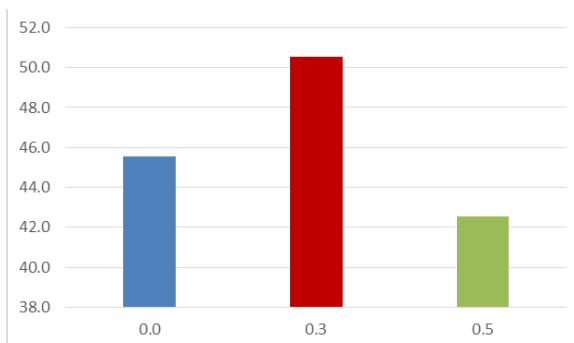
در نمودار ۵ طرح اختلاط شماره ۳ در ابتدای امر با القای میدان مغناطیسی میزان مقاومت فشاری از ۳۰/۹ مگاپاسکال به ۳۸/۲ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند و با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۰/۳ تسلا به ۰/۵ تسلا، مقاومت فشاری به میزان ۱۲ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این کاهش به دلیل اثر توأمان افزایش میزان سنگ‌دانه پیزوالکتریک کوارتز و افزایش شدت میدان مغناطیسی است که اثر کاهشی را بر مقاومت فشاری اعمال کرده است.



نمودار ۵. تغییرات میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر اثر اعمال میدان مغناطیسی در طرح اختلاط شماره ۳

همان‌طور که در نمودار ۵ ملاحظه می‌گردد طرح اختلاط شماره ۶ به‌عنوان تأثیرپذیرترین طرح اختلاط در شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ بیشترین مقاومت را نشان می‌دهد. میانگین آزمونه‌ها برای این شدت میدان مغناطیسی برابر ۵۰/۵ مگاپاسکال است که نشان‌دهنده افزایش مقاومت ۵ مگاپاسکالی نسبت به نمونه فاقد میدان مغناطیسی در این طرح اختلاط و بیش از ۳۱ مگاپاسکال نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

در ادامه بررسی‌ها می‌توان متوجه شد که با افزایش میدان مغناطیسی در این طرح اختلاط روند کاهشی را مانند نمودار ۵ طرح شماره ۳ نمایش داده شده است که عدد مقاومت فشاری به ۴۲/۵ مگاپاسکال می‌رسد.



نمودار ۶. تغییرات میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر اثر اعمال میدان مغناطیسی در طرح اختلاط شماره ۶

نتیجه‌گیری

- تحقیق حاضر به بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی ۰ و ۰.۳ و ۰.۵ تسلا بر مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات سیمان حاوی سنگ‌دانه کوارتز و پودر زئولیت پرداخته است و نتایج زیر، گزارش نهایی حاصل از پروژه می‌باشد:
- با توجه به نتایج حاصل از تحلیل آماری، دو متغیر طرح اختلاط و میدان مغناطیسی بر مقاومت فشاری، تأثیر معناداری دارند و بالعکس میزان تغییرات جرم مخصوص آزمونه‌ها بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها تأثیر معناداری ندارد.
 - در طرح اختلاط‌های ۶ و ۳ و ۲ تأثیر اعمال میدان مغناطیسی نسبت به سایر طرح اختلاط‌ها بیشتر بوده است.
 - بالاترین عدد و افزایش مقاومت مربوط به طرح اختلاط شماره ۶ با افزایش مقاومت ۱۰۰ درصدی نسبت به طرح اختلاط شاهد فاقد القای میدان مغناطیسی می‌باشد که این افزایش مقاومت بر اثر کاربرد درصد بهینه زئولیت در طرح اختلاط و همچنین استفاده از میزان مطلوب سنگ‌دانه کوارتز و شدت میدان مغناطیسی می‌باشد.
 - جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت با سنگ‌دانه معمولی باعث افزایش مقاومت چشمگیری می‌شود که به دو دلیل اتفاق می‌افتد: ۱- زئولیت، افزایش‌دهنده مقاومت خمیر سیمان است و هیدروکلسیم موجود در سیمان را به فاز اصلی مقاومت یعنی هیدروسیلیکات کلسیم تبدیل می‌کند. ۲- نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۸ به ۰/۲۸ کاهش می‌یابد و همین امر مقاومت فشاری خمیر ملات سیمان را افزایش می‌دهد.
 - یکی از اهداف محققان در این پژوهش، بررسی تأثیرات جایگزینی کوارتز و پودر زئولیت با سنگ‌دانه معمولی در ملات سیمان استاندارد بود که نتیجه آن در طرح اختلاط‌های ۵ و ۸ که به ترتیب میزان کاهش سنگ‌دانه معمولی ۲۰ و ۳۵ درصد وزن سنگ‌دانه است تحت دو حالت بدون القای میدان مغناطیسی و تحت اعمال میدان مغناطیسی به شدت ۰/۳ تسلا نسبت به آزمونه قبلی خود، کاهش مقاومت دارد و در ادامه با افزایش میزان سنگ‌دانه کوارتز، افزایش مقاومت فشاری را می‌توان ملاحظه کرد.
 - در زمان اعمال میدان مغناطیسی بر نمونه‌ها، مصالح پیزوالکتریک تحت تأثیر میدان مغناطیسی بهینه طرح اختلاطشان، نسبت به یکدیگر، نیروی جاذبه‌ای را ایجاد می‌کند که این اتفاق باعث همبستگی و پیوستگی بهتر هسته بتنی می‌شود و در نهایت، مقاومت فشاری، افزایش می‌یابد.
 - همان‌طور که انتظار می‌رفت اندرکنش افزایش میزان سنگ‌دانه کوارتز و زئولیت و هم‌زمان با القای شدت میدان مغناطیسی بالا باعث کاهش مقاومت در اغلب این گونه نمونه‌ها گردید.

References

- [1] Bartram, G., & Terry, S. (2010). *The Carbon Challenge*. Bridget Williams Books. <https://books.google.com/books?id=xUa6Ohd6SaIC>
- [2] Salimbahrami, S. R., Shakeri, R., & Habibi Hajikolaie, B. (2021). Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Network. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 209-230. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128404>
- [3] Kamangar, F. (2010). *Four-choice physics (3) math questions* (S. Javadi, Trans.). Mobtakeran.
- [4] Polonos, M. (1990). *Electromagnetic Engineering* (M. Dayani, Trans.).
- [5] Hajforoush, M. (2015). *Evaluation Of Properties Of Self-Compacting Concrete Containing Magnetic Water With Different Percentages Of Zeolite* Guilan].

- [6] Su, N., Wu, Y.-H., & Mar, C.-Y. (2000). Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 30, 599-605. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00215-5)
- [7] Su, N., & Wu, C.-F. (2003). Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 681-688. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00098-7)
- [8] Afshin, H., Gholizadeh, M., & Khorshidi, N. (2010). Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology. *Scientia Iranica*, 17(1), 74-79. http://scientiairanica.sharif.edu/article_3144_de021c6cb9fbd7cefd38fefb47b5fea0.pdf
- [9] Abdel-Magid, T. I. M., Hamdan, R. M., Abdelgader, A. A. B., Omer, M. E. A., & Ahmed, N. a. M. R.-A. (2017). Effect of Magnetized Water on Workability and Compressive Strength of Concrete. *Procedia Engineering*, 193, 494-500. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.242>
- [10] Gholhaki, M., Kheyroddin, A., Hajforoush, M., & Kazemi, M. (2018). An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 158, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.135>
- [11] Hajforoush, M., Madandoust, R., & Kazemi, M. (2019). Effects of simultaneous utilization of natural zeolite and magnetic water on engineering properties of self-compacting concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(2), 289-300. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-00106-w>
- [12] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (2017). Alternating Magnetic Field Effect on Fine-aggregate Concrete Compressive Strength. *Construction and Building Materials*, 134, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.109>
- [13] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (2017). Magneto-Electric Control of Scaled-Down Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 114(1), 233-244. <https://doi.org/10.14359/51689452>
- [14] Rezaifar, O., Abavisani, I., & Kheyroddin, A. (2017). Magneto-electric active control of scaled-down reinforced concrete columns. *ACI Struct J*, 114(5), 1351-1362. <https://doi.org/10.14359/51700790>
- [15] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (2018). Alternating magnetic field effect on fine-aggregate steel chip-reinforced concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018087-04018089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002267](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002267)
- [16] Safari Tarbozagh, A., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (2020). Electromagnetism in taking concrete behavior on demand. *Structures*, 27, 1057-1065. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.025>
- [17] Safari Tarbozagh, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., & Abavisani, I. (2020). Magnetic Enhancement of Carbon Nanotube Concrete Compressive Behavior. *Construction and Building Materials*, 262, 120772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120772>
- [18] Yu, G. Y., Hunt, W. D., Josowicz, M., & Janata, J. (2007). Development of a magnetic quartz crystal microbalance. *Review of scientific instruments*, 78(6), 065111. <https://doi.org/10.1063/1.2749448>
- [19] Yu, G. Y. (2008, June 11). *Magnetic quartz crystal microbalance* School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology].

- [20] Kumar, S., Gupta, R., & Shrivastava, S. (2016). Strength, abrasion and permeability studies on cement concrete containing quartz sandstone coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 125, 884-891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.106>
- [21] Kumar, S., Gupta, R., & Shrivastava, S. (2017). Long term studies on the utilisation of quartz sandstone wastes in cement concrete. *Journal of Cleaner Production*, 143, 634-642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.062>
- [22] Kumar, S., Gupta, R., Shrivastava, S., & Csetenyib, L. (2016). Preliminary study on the use of quartz sandstone as a partial replacement of coarse aggregate in concrete based on clay content, morphology and compressive strength of combined gradation. *Construction and Building Materials*, 107(15), 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.004>
- [23] Chen, J., Ng, P. L., & Kwan, A. (2017). Effects of superfine zeolite on strength, flowability and cohesiveness of cementitious paste. *Cement and Concrete Composites*, 83, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.010>
- [24] Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B., & Uz, V. (2007). Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment*, 42(11), 3808-3815. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.006>
- [25] Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M. M., Sümer, M., & Yurdusev, M. A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 731-735. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00063-2)
- [26] ASTM International. (2020, February 15). *ASTM International - ASTM C109/C109M-20A - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)* | Engineering360. ASTM International. <https://standards.globalspec.com/std/14137338/astm-c109-c109m-20a>