

## Investigation of the effect of uniform magnetic field on the bond strength of rebar in concrete containing quartz aggregates using pull-out test

Majid Taheri <sup>1</sup>, Omid Rezaifar <sup>2\*</sup>, Ali Kheyroddin <sup>3</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University

2- Assoc. Prof., Department of Civil Engineering, Semnan University

3- Prof., Department of Civil Engineering, Semnan University

### ABSTRACT

The present study was an attempt to investigate the effect of direct and uniform magnetic field on concrete-steel rebar bond strength in fresh and hardened concrete specimens containing quartz aggregates using pull-out test. Moreover, compressive strength test was performed on all magnetic and non-magnetic specimens at 28 days of concrete age in order to investigate the effect of compressive strength of concrete on bond strength. In the present study, a concrete mixture containing smart quartz aggregate was designed for a compressive strength of 30 MPa. The water to cement ratio was selected to be 0.4 for concrete mixes. The method of fabrication and processing of samples was performed according to ASTM C192. Accordingly, first one-third of the fine-grained and one-third of the mixing water were added to the mixer with one-third. The remaining cement and water were gradually added to the concrete mix. At the end, superplasticizer was gradually added to the concrete mix for 1 to 2 minutes and then the concrete mixing process was continued for 3 minutes. In order to prevent the magnetic field from being absorbed by the concrete mold, concrete samples were sampled in plastic molds. Concrete samples were covered with a wet sack at a temperature of 20–22 ° C for 24 hours and then removed from the formwork and stored under moist conditions until the experimental age. The device used in this study is able to convert electricity into a uniform magnetic field with an intensity of 0.5 Tesla. According to the results, the failures in all specimens are of slip type with no fissure cracks. The results also showed that applying a magnetic field to the concrete can lead to enhancement of bond strength by about 55% and 73%, in 14 and 20 mm rebar respectively.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 26 July 2021

Revise Date: 06 September 2021

Accept Date: 17 September 2021

**Keywords:** Uniform magnetic field  
Alternating current  
Bond strength  
Quartz sandstone coarse aggregate  
Pull-out test

doi: 10.22065/JSCE.2021.294936.2502

\*Corresponding author: Omid Rezaifar  
Email address: orezayfar@semnan.ac.ir

## تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی سنگدانه‌های کوارتز با بهره‌گیری از آزمایش Pullout

مجید طاهری<sup>۱</sup>، امید رضایی فر<sup>۲\*</sup>، علی خیرالدین<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی اثر اعمال مستقیم میدان مغناطیسی یکنواخت با چگالی شار ۰/۵ تسلا به نمونه‌های تازه و سخت‌شده بتن حاوی سنگدانه‌های کوارتز روی مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد فولادی با بهره‌گیری از آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد می‌باشد. همچنین به منظور بررسی اثر مقاومت فشاری بتن بر مقاومت پیوستگی، آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز بر روی تمامی نمونه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی انجام گردید. تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی نیز به جهت بررسی ریزساختاری نمونه‌های بتن انجام شد. در این تحقیق از نمونه‌های استوانه‌ای بتن و میلگرد در دو قطر مختلف استفاده شد. سنگدانه‌های کوارتز در دو بیشینه اندازه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که گسیختگی همه نمونه‌ها از نوع لغزش در میلگرد بدون ترک‌های شکافت بود. همچنین اعمال میدان مغناطیسی به بتن موجب افزایش مقاومت پیوستگی تا حدود ۵۵ و ۷۳ درصد متناظر با میلگردهای مختلف گردید. از طرفی میدان مغناطیسی در افزایش مقاومت فشاری بتن نیز موثر است. بر این اساس مقاومت فشاری بتن تحت میدان مغناطیسی به بیش از ۲۳ درصد افزایش یافت. نسبت تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه‌های کوارتز تحت تأثیر میدان مغناطیسی تا حدود ۳۹ و ۵۷ درصد افزایش یافت. تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی مشخص کرد که اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب تراکم بیشتر ساختار هیدراتاسیون سیمان می‌گردد.

کلمات کلیدی: میدان مغناطیسی یکنواخت، مقاومت پیوستگی، آزمایش بیرون‌کشیدن میلگرد، سنگدانه کوارتز، ریزساختار بتن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.294936.2502">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.294936.2502</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.294936.2502	۱۴۰۱/۰۱/۳۱	۱۴۰۰/۰۶/۲۶	۱۴۰۰/۰۶/۲۶	۱۴۰۰/۰۶/۱۵	۱۴۰۰/۰۵/۰۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				امید رضایی فر		
				orezayfar@semnan.ac.ir		

## ۱- مقدمه

پیوستگی کامل میان بتن و میلگرد از جمله فرض‌های اساسی در طراحی سازه‌های بتن مسلح بشمار می‌رود. بگونه‌ای که در صورت عدم چسبندگی کافی میان بتن و میلگرد و همچنین عدم تأمین طول مهاری مورد نیاز، تمامی روابط آیین‌نامه‌ای اعتبار خود را از دست می‌دهند. بنابراین انتقال نیرو از طریق چسبندگی میان سطح میلگرد و بتن نقش اساسی در تعیین رفتار اعضای بتن مسلح دارد. بر اساس دستورالعمل ACI 408R-03 [۱] گسیختگی پیوستگی بتن در دو به دو صورت رخ می‌دهد: بیرون‌کشیدگی میلگرد<sup>۱</sup> و شکافت بتن<sup>۲</sup>. بر اساس مطالعات پیشین افزایش قطر میلگرد باعث افزایش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن می‌شود [۲-۴]. این نتایج با مطالب ارائه شده در ACI 408R-03 [۱] که در آن برای طول مهاری آبیستر باید افزایش قطر میلگرد را اضافه نمود، در تعامل است و همچنین در معادله ارائه شده توسط آیین‌نامه ACI 318-14 [۵] نیز در خصوص افزایش طول مهاری میلگرد تحت کشش در بتن با افزایش قطر آن همخوانی دارد.

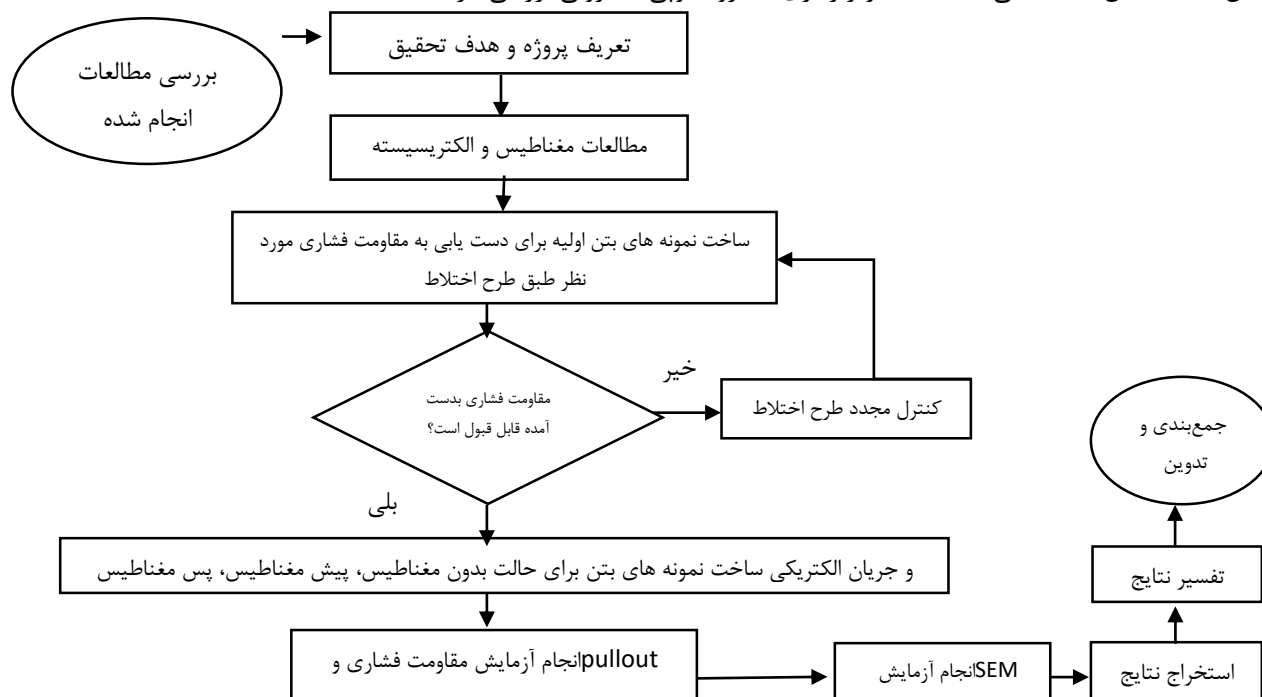
امروزه با توجه به ضرورت استفاده از بتن‌های با مقاومت و دوام بالاتر، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که فناوری مغناطیسی از جمله این روش‌هاست. در ابتدای مسیر مطالعات، فرضیات بگونه‌ای بود که جهت بررسی اثر میدان‌های مغناطیسی روی خواص بتن می‌بایست اثر مغناطیس بر مواد تشکیل دهنده بتن دیده شود. در این میان، آب اختلاط بتن با توجه به دارا بودن مولکول‌های دو قطبی و همچنین اثر پذیری در یک میدان مغناطیسی مورد ارزیابی قرار گرفت [۶ و ۷]. اعمال میدان مغناطیسی به آب موجب کاهش کشش سطحی آن می‌شود که در صورت بکارگیری در اختلاط بتن می‌تواند فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان را افزایش دهد که نتیجه چنین امری افزایش مقاومت مکانیکی بتن می‌باشد [۸].

اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به مصالح بتنی دارای تاریخچه کمتری نسبت به دانش آب مغناطیسی است. همچنین اثر میدان مغناطیسی روی بتن‌های حاوی مصالح هوشمند تقریباً محدود به اثر میدان مغناطیسی روی خواص مواد سیمانی تازه می‌باشد. تأثیر میدان مغناطیسی روی مخلوط آماده بتن حاوی پودر آهن نشان داد که استفاده از این روش مقاومت برشی بتن را تغییر می‌دهد اما روی مقاومت فشاری بتن تأثیری ندارد [۹]. همچنین تعداد محدودی از مطالعات پیشین نشان دادند که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد [۱۰-۱۶]. حج‌فروش و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰ اثر میدان مغناطیسی یکنواخت را بر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن حاوی الیاف فولادی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اعمال میدان مغناطیسی به بتن مقاومت‌های فشاری و خمشی آن را به ترتیب تا حدود ۱۸ و ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. آن‌ها دریافتند که میدان مغناطیسی می‌تواند بر ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده<sup>۴</sup> تأثیر داشته باشد. همچنین جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در راستای تنش کششی موجب شد تا بتن بتواند رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به نمونه غیرمغناطیسی از خود نشان دهد. اثر میدان مغناطیسی بر مقاومت خمشی ملات بازیافتی حاوی الیاف فولادی توسط فراندز و همکاران در سال ۲۰۱۹ بررسی شد [۱۱]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اعمال میدان مغناطیسی به ملات تازه می‌تواند مقاومت خمشی آن را تا ۱۰ درصد افزایش دهد. ابویسانی و همکاران [۱۲] در پژوهش خود در سال ۲۰۱۸ به بررسی مقاومت فشاری بتن ریزدانه حاوی براده‌های آهن تحت میدان مغناطیسی متناوب پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن تازه موجب افزایش مقاومت فشاری آن تا ۱۷ درصد می‌گردد. سوتورنال و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ رفتار مکانیکی خمیر سیمان در معرض میدان‌های مغناطیسی ضعیف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که اعمال میدان مغناطیسی به خمیر مقاومت فشاری آن را تا ۱۳ درصد افزایش می‌دهد. ابویسانی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷ اثر اعمال میدان مغناطیسی را بر رفتار خمشی تیرهای مسلح با مقیاس کوچک بررسی کردند. آن‌ها از یک دستگاه مولد میدان استفاده کردند که میدان مغناطیسی متناوب را به طور مستقیم به نمونه‌های بتن اعمال می‌کرد. آن‌ها گزارش کردند که اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های تیر ظرفیت باربری آن‌ها را در نقطه تسلیم تا ۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های تازه بتن موجب افزایش شاخص شکل‌پذیری

<sup>۱</sup>Pull out<sup>۲</sup>Splitting<sup>۳</sup>Development length<sup>۴</sup>C-S-H gel

آن‌ها تا ۱۵ درصد گردید. رضائی‌فر و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ رفتار فشاری ستون‌های مسلح را تحت تأثیر میدان مغناطیسی ارزیابی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن ظرفیت باربری آن‌ها را تا ۱۱ درصد افزایش می‌دهد. مطالعات مختلفی نشان دادند که حضور مصالح پیزوالکتریک از جمله سنگدانه‌های کوارتز می‌تواند بر خواص مکانیکی بتن تحت تأثیر میدان مغناطیسی اثر نماید [۱۹-۱۷]. کومار و همکاران [۲۰] نشان دادند که سنگدانه‌های کوارتز دارای این ویژگی هستند که تحت یک بار فشاری می‌توانند اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد نمایند. همچنین این مصالح بر اساس خاصیت پیزوالکتریک خودشان قادر هستند که تحت یک میدان الکتریکی تغییرشکل‌های مکانیکی از خودشان نشان دهند [۲۱ و ۲۲]. بنابراین زمانی که سنگدانه‌های کوارتز تحت یک بار فشاری قرار می‌گیرند، یک دو قطبی الکتریکی در راستای بار وارده از خود نشان می‌دهند که اختلاف پتانسیل این بارهای وارده با شدت بار وارده متناسب می‌باشد [۲۳ و ۲۴]. در ادامه این تحقیقات، ایوفورت و همکاران [۲۵] اثبات کردند که تخلخل سنگدانه‌های کوارتز بر میزان شدت میدان الکتریکی موثر است. بر این اساس هرچه میزان تخلخل در سنگدانه‌های کوارتز بیشتر باشد، پاسخ مکانیکی به میدان الکتریکی وارده بیشتر می‌گردد. همچنین مطالعاتی در خصوص اثرات حرارت بر بتن‌های غیرمغناطیسی نیز توسط پاچیده و همکاران [۲۶ و ۲۷] نیز انجام شده که در ادامه تحقیقات بتن مغناطیسی، اثرات حرارت نیز قابلیت مطالعات آزمایشگاهی را دارا می‌باشد.

اگرچه در مطالعات پیشین تحقیقات بسیاری در خصوص بکارگیری از آب مغناطیسی در اختلاط بتن انجام شده است، لذا تحقیقات انجام شده در زمینه اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن بسیار محدود هستند. از طرفی قسمت عمده این مطالعات نیز به بررسی خواص مکانیکی بتن در معرض میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. بر این اساس هیچگونه تحقیقی در خصوص عملکرد پیوستگی بین میلگرد و بتن حاوی سنگدانه‌های هوشمند مانند کوارتز تحت میدان مغناطیسی یکنواخت انجام پذیرفته است. امروزه با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه فناوری بتن و نیاز روزافزون به طراحی‌های دقیق‌تر بر مبنای انواع نو ظهور بتن، لزوم بررسی مقاومت چسبندگی میان سطح میلگرد و بتن دو چندان شده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۰/۵ تسلا بر مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن حاوی سنگدانه‌های کوارتز در دو بیشینه اندازه ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر و به نسبت ۴۰ به ۶۰ درصد حجم کل بتن می‌باشد. بدین منظور میلگرد کشش در دو قطر مختلف شامل ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های بتن در دو حالت تازه و سخت شده تحت میدان مغناطیسی قرار گرفتند. همچنین آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های بتنی مغناطیسی و غیرمغناطیسی انجام گرفت. ریزساختار بتن تحت میدان مغناطیسی با کمک تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی بررسی گردید.



## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مصرفی

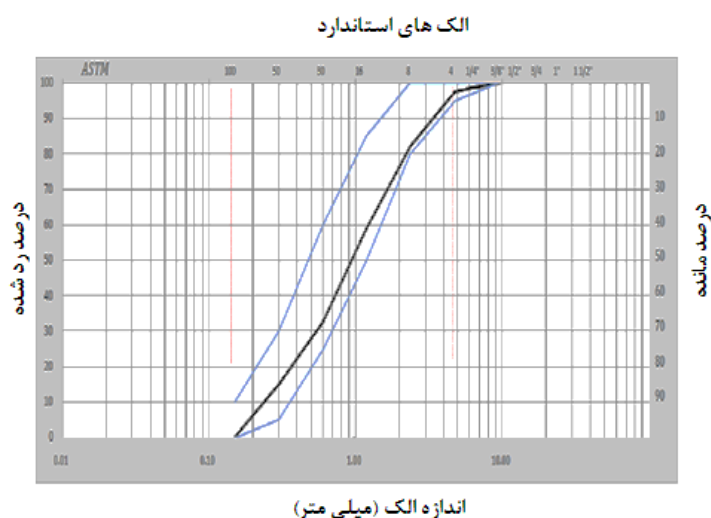
در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتن از سیمان پرتلند تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. درشت دانه مصرفی از نوع سنگدانه کوارتز با وزن مخصوص ۲/۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب و در دو بیشینه اندازه ۱۰ و ۲۵ میلی متر استفاده شد. به منظور دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری برای نمونه های بتن و بر اساس مطالعات کومار و همکاران [۲۰] سنگدانه های کوارتز در یک نسبت حجمی ۴۰ به ۶۰ درصد متناظر با سنگدانه های ۱۰ و ۲۵ میلی متر استفاده شدند. در تحقیق حاضر، ریزدانه مصرفی از نوع ماسه رودخانه‌ای با بیشینه اندازه ۶ میلی متر و وزن مخصوص ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب مطابق با استاندارد ASTM C33 [۲۸] استفاده شد که خطوط آبی رنگ محدوده مجاز این استاندارد را مشخص میکند. (شکل ۱). افزودنی فوق روان کننده مطابق با استاندارد ASTM C494 [۲۷] و بر پایه کربوکسیلات استفاده شد که چگالی و PH آن به ترتیب ۱/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب و ۷/۰۵ بود. فوق روان کننده به میزان ۰/۹ درصد وزنی سیمان استفاده شد. میلگردهای مصرفی برای آزمایش بیرون کشیدگی بر اساس استاندارد ASTM A615 [۳۰] و با مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شدند. در این تحقیق از میلگردهای آج‌دار با دو قطر مختلف شامل ۱۴ و ۲۰ میلی متر استفاده گردید.

جدول ۱- خواص شیمیایی سیمان پرتلند

properties	Percentage(%)
SiO <sub>2</sub>	22.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95
MgO	0.8
CaO	64.86
SO <sub>3</sub>	0.85
K <sub>2</sub> O	0.51
Na <sub>2</sub> O	0.25

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن و آماده سازی نمونه‌ها

در تحقیق حاضر مخلوط بتن حاوی سنگدانه هوشمند کوارتز برای مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگاپاسکال طرح شد که جزئیات طرح اختلاط آن در جدول ۲ ارائه شده است. نسبت آب به سیمان برای مخلوط‌های بتن برابر با ۰/۴ انتخاب گردید. روش ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C192 [۳۱] انجام شد. بر این اساس در ابتدا یک سوم ریزدانه و درشت‌دانه با یک سوم آب اختلاط به مخلوط‌کن اضافه شدند. سیمان و آب باقی‌مانده به تدریج به مخلوط بتن اضافه شد. در انتها فوق روان کننده به تدریج و در طی مدت ۱ تا ۲ دقیقه به مخلوط بتن اضافه شد و سپس فرایند مخلوط کردن بتن به مدت ۳ دقیقه ادامه یافت. به منظور جلوگیری از جذب میدان مغناطیسی توسط قالب بتن، نمونه‌های بتن در قالب‌های پلاستیکی نمونه‌گیری شدند. نمونه‌های بتن در دمای ۲۲-۲۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت توسط گونی خیس پوشانده شدند و سپس از قالب‌ها خارج شده و تحت شرایط مرطوب تا سن آزمایش (۲۸ روز) نگهداری شدند.



شکل ۱- نمودار دانه بندی ماسه [۲۸]

### ۲-۳- دستگاه مغناطیسی مورد استفاده

دستگاه تولید میدان مغناطیسی این تحقیق دارای یک مدار مغناطیسی حامل جریان و یک منبع تغذیه است که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. مقدار چگالی شار مغناطیسی بر حسب تسلا و در مرکز مدار توسط رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۳۲]:

$$B = \frac{\mu NI}{2R} \quad (1)$$

در رابطه (۱) منظور از  $B$ ، چگالی شار مغناطیسی بر حسب تسلا،  $\mu$  ضریب تراوایی مغناطیسی هسته بر مبنای آمپر/تسلا متر،  $N$  تعداد دورهای پیچ،  $I$  جریان الکتریکی بر حسب آمپر و  $R$  شعاع پیچ بر حسب متر می‌باشد.

این دستگاه قادر به تولید میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۰/۵ تسلا از جریان برق شهری است. برای این منظور از یک منبع تغذیه با توان ۵۰۰ ولت آمپر استفاده شد. مطابق شکل ۲، شدت میدان مغناطیسی تولیدی دستگاه به وسیله یک تسلا متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- دستگاه الکترومغناطیس مورد استفاده

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط بتن (kg)

Ingredients per $kg/m^3$	Cement	Water	W/C	Quartz	Quartz	Fine	Superplasticizer	
				sandstone aggregate 25 mm	sandstone aggregate 10 mm		% by cement	$Kg/m^3$
Quantity	405	162	0.4	696.5	464.3	645	0.9	3.65

## ۲-۴- روند انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق اثرات اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت پیوستگی میلگرد به بتن حاوی سنگدانه های کوارتز در دو بیشینه اندازه مختلف شامل ۱۰ و ۲۵ میلی متر بر اساس استاندارد RILEM 7-II-128 RC6 [۳۳] و در سن ۲۸ روز توسط آزمایش Pullout مورد ارزیابی قرار گرفت. اعمال بار کششی در این آزمایش به صورت مستقیم بر انتهای میلگرد بوده تا گسیختگی در ناحیه پیوستگی بتن و میلگرد ایجاد شود. نمونه بتن به صورت استوانه استاندارد با ابعاد ۱۵×۳۰ انتخاب شد. در این تحقیق میلگردهای آجدار با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر و با طول ۶۰ سانتی متر بکار گرفته شد که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد.



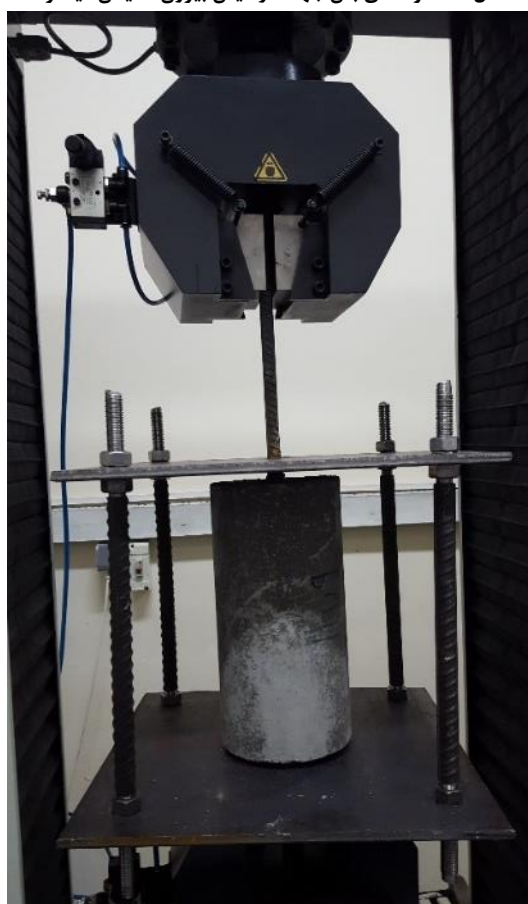
شکل ۳- تصویر میلگردهای کشش

طبق استاندارد RILEM 7-II-128 RC6 [۳۳] طول پیوستگی میلگرد در بتن ۵ برابر قطر میلگرد در نظر گرفته شده و مابقی طول میلگرد توسط یک پوشش پلاستیکی<sup>۵</sup> با بتن اطراف فاصله گرفته است. بنابراین طول مهاری میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۷ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. میلگردها در وسط نمونه بتن به دقت قرار گرفتند. نمونه‌های بتن برای آزمایش Pullout در شکل ۴ نشان داده شده است. در حین آزمایش، لغزش میلگرد در انتهای ناحیه پیوستگی و در طول ۱۰ میلی‌متری انتهایی میلگرد توسط یک ترانسفورماتور تفاضلی متغیر خطی<sup>۶</sup> اندازه‌گیری شد که این وسیله قادر است به صورت یکطرفه جابجایی را تا میزان ۱۰۰ میلی‌متر محاسبه کند. ترانسفورماتور بر اساس ولتاژ کار کرده که پس از انتقال به یک دستگاه جمع‌آوری اطلاعات<sup>۷</sup> میزان تغییر مکان را نشان می‌دهد. در این تحقیق از یک دستگاه کشش با ظرفیت ۴۰۰ کیلونیوتن برای آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل استوانه بتن استفاده شد. به منظور ثابت نگه داشتن نمونه بتن داخل دستگاه کشش میلگرد، از دو فک فلزی و صفحات لاستیکی استفاده شد تا توزیع بار به سطح بتن به صورت یکنواخت باشد. صفحات فلزی به وسیله چهار بولت ۲۰ میلی‌متر که در دو انتها رزوه شده بودند به یکدیگر متصل گردیدند. صفحه زیرین توسط گیره تحتانی دستگاه ثابت نگه داشته شد و میلگرد کشش توسط گیره فوقانی کشیده شد. نحوه انجام آزمایش کشش میلگرد در شکل ۵ مشاهده می‌گردد.

<sup>۵</sup>PVC tube  
<sup>۶</sup>VDT  
<sup>۷</sup>Data logger



شکل ۴- نمونه‌های بتن جهت آزمایش بیرون کشیدن میلگرد

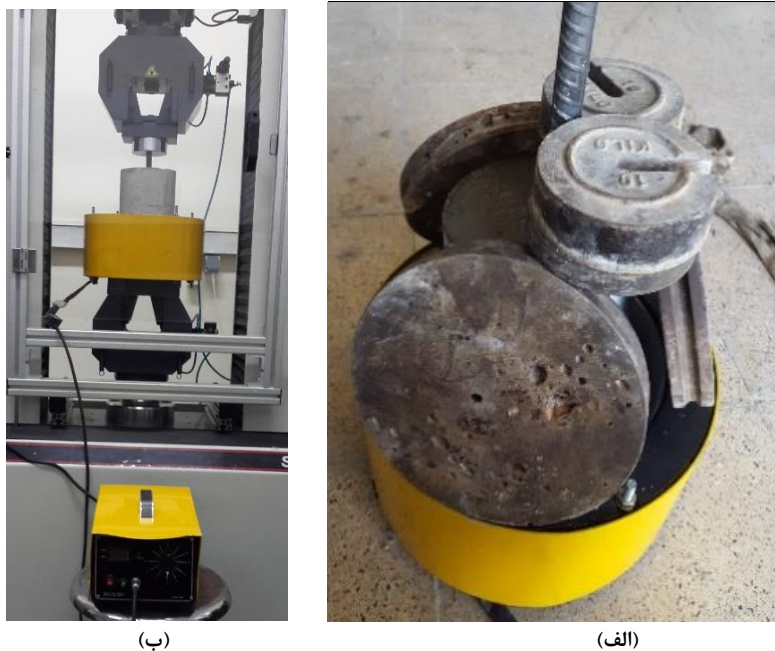


شکل ۵- دستگاه آزمایش کشش میلگرد

از تقسیم حداکثر نیروی تحمل شده توسط بتن به سطح جانبی میلگرد، بیشینه تنش پیوستگی محاسبه شد و نمودار تنش پیوستگی- لغزش برای نمونه‌های آزمایشگاهی رسم شد. همچنین در این تحقیق برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر استفاده شده است. نمونه‌های بتن به دو رده مغناطیسی شده و غیرمغناطیسی (شاهد) تفکیک شدند که و اعمال میدان در دو حالت بتن تازه و سخت شده همزمان با انجام آزمایش صورت گرفت. بدین منظور و برای اعمال میدان مغناطیسی به نمونه های تازه بتن، میدان بلافاصله پس از قالب‌گیری و به مدت ۲ دقیقه به بتن تازه اعمال شد. همچنین برای اعمال بتن به نمونه های سخت شده، میدان در شرایطی که نمونه اعمال گردید که نمونه همزمان تحت آزمایش و باربری قرار داشت.



در این شرایط میدان مغناطیسی تا زمان گسیختگی بتن به آن اعمال شد. شکل ۶ فرایند مغناطیسی کردن نمونه‌های بتن را برای آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که جهت متمرکز نمودن چگالی شار مغناطیسی به داخل نمونه بتن از صفحات فولادی در بالا و پایین نمونه استفاده شد. مغناطیسی کردن نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۷ ارائه شده است. در آخر تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی با نمونه‌های شاهد غیرمغناطیسی، مقایسه شدند.



شکل ۶- مغناطیسی کردن نمونه بتن جهت آزمایش کشش میلگرد، (الف) پیش مغناطیس، (ب) پس مغناطیس



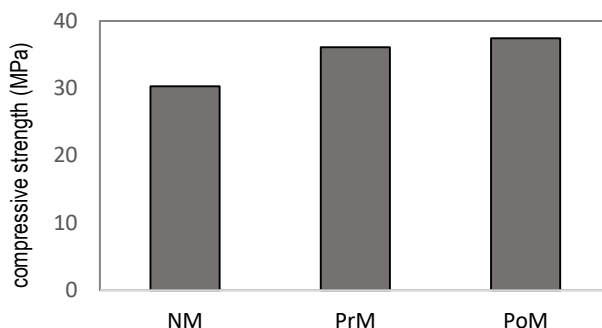
شکل ۷- مغناطیسی کردن جهت آزمایش مقاومت فشاری، (الف) پیش مغناطیس، (ب) پس مغناطیس

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

#### ۳-۱- مقاومت فشاری بتن

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ۲۸ روزه حاوی سنگدانه های هوشمند کوارتز تحت میدان مغناطیسی در شکل ۸ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مغناطیسی کردن نمونه بتن باعث افزایش مقاومت فشاری آن خواهد شد. بر این اساس، اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب افزایش مقاومت فشاری آن به میزان ۱۹/۱ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه مشاهده می‌گردد تراکم ریزساختار بتن و به خصوص ژل کلسیم سیلیکات هیدراته بیشتر شده و می‌تواند موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شود. مشابه این نتیجه در تحقیقات حج‌فروش و همکاران [۱۰] نیز در مورد بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی اشاره شده بود. با اعمال میدان مغناطیسی به نمونه سخت شده بتن، مقاومت فشاری به میزان ۲۳/۴۹ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل

وجود ذرات باردار از جمله سیلیس در بتن حاوی سنگدانه کوارتز باشد که تحت میدان مغناطیسی به سمت آن جذب می‌شوند و می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. مشابه این نتیجه در مطالعه ابویسانی و همکاران [۱۲] نیز ارائه شده بود.

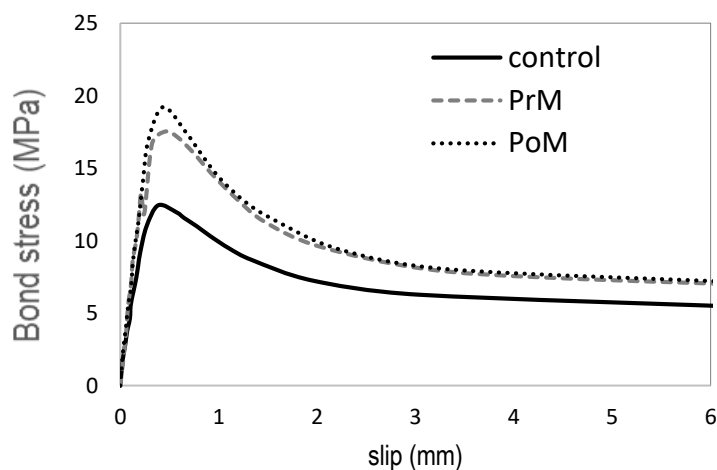


شکل ۸- نتایج مقاومت فشاری بتن تحت میدان مغناطیسی

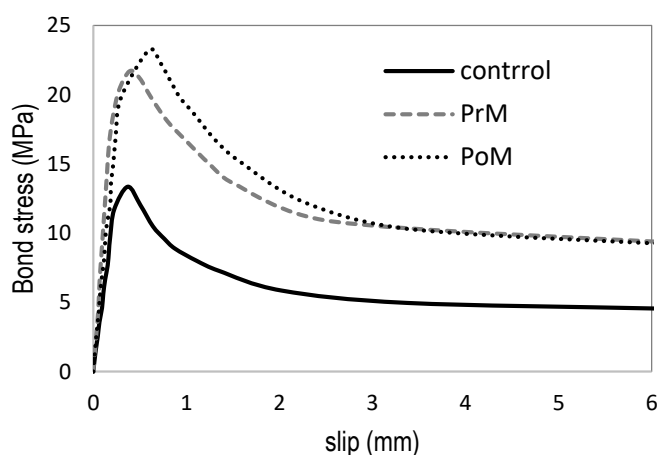
### ۲-۲- مقاومت پیوستگی بتن

در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های آرماتور و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه در محل تماس آج آرماتور و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف آرماتور تنش‌های حلقوی کششی و در کلیدهای بتن بین آج‌ها تنش برشی تولید می‌شود. با توجه به این میدان تنش، دو نوع مود شکست پیوستگی قابل پیش‌بینی است. اگر تنش برشی موجود در کلیدهای بتنی بین آج‌های آرماتور از حد مقاومت برشی بتن بگذرد، آرماتور به سمت خارج حرکت می‌کند و شکست از نوع بیرون کشیده شدن آرماتور از بتن خواهد بود. اگر تنش‌های حلقوی کششی، پیش از آنکه کلید بتن بین دو آج مجاور به صورت برشی کنده شود، از حد مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک‌های شعاعی در بتن اطراف آرماتور ایجاد و نهایتاً موجب خردشدگی پوشش بتنی اطراف آرماتور و گسیختگی و شکافت بتن می‌شود. در این مرحله از رفتار پیوستگی بتن و آرماتور آجدار، تاثیر اصطکاک در ظرفیت نیروی پیوستگی نهایی ناچیز است که در نتیجه شکست ترد و ناگهانی است. این نوع شکست پیوستگی با نام شکافت خوانده می‌شود. نمودار تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه‌های هوشمند کوارتز تحت میدان مغناطیسی متناظر با میلگردهای کششی با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب در تصاویر ۹ و ۱۰ ارائه شده است. روند این نمودارها به گونه‌ای است که تا حدود ۵۹ درصد نیروی نهایی به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. سپس با یک روند کاهشی به صورت نمایی در نیرو همراه با افزایش قابل توجه در لغزش ادامه می‌یابد. در آزمایش کشش میلگرد از روش کنترل تغییر مکان<sup>۱</sup> استفاده گردید. پس از انجام آزمایش‌ها مشخص گردید که تمامی نمونه‌های بتن تحت نیروی کشش دچار گسیختگی از نوع لغزش میلگرد در بتن بدون شکافت شدند. اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن موجب گردید که مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن افزایش یابد. بر این اساس، بیشینه تنش پیوستگی متوسط برای نمونه‌های پیش مغناطیسی به میزان ۴۱ درصد و ۶۲/۵۵ درصد مرتبط به میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن سخت شده تحت بارگذاری بیشینه تنش پیوستگی متوسط به میزان ۵۵ درصد و ۷۳ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت. همانگونه که از اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد، با افزایش قطر میلگرد مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد. نتیجه‌ای که توسط گارسیا نیز [۳۴] گزارش شده است. میلگردهای با قطر بالاتر دارای آج‌های بزرگتری هستند که موجب می‌گردد تا گسیختگی برشی دیرتر رخ دهد. مطابق با دستورالعمل ACI 408R-03 [۱] و آیین‌نامه ACI 318-14 [۵] و به منظور حذف وابستگی مقاومت پیوستگی نمونه‌ها به مقاومت فشاری آن‌ها، مقدار نسبت تنش پیوستگی به مجذور مقاومت فشاری  $\left(\frac{\tau_{max}}{\sqrt{f_c}}\right)$  در

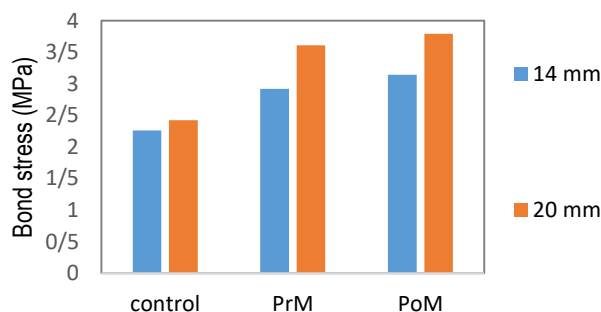
نمودار ۱۱ ارائه شده است. بر این اساس، نمونه‌های مغناطیسی برای نسبت ارائه شده دارای مقدار بیشتری نسبت به بتن شاهد بودند. این میزان افزایش برای میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب حدود ۳۸/۹۴ و ۵۶/۶۱ درصد نتیجه شده است.



شکل ۹- نمودار تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن برای میلگرد با قطر ۱۴ میلی‌متر

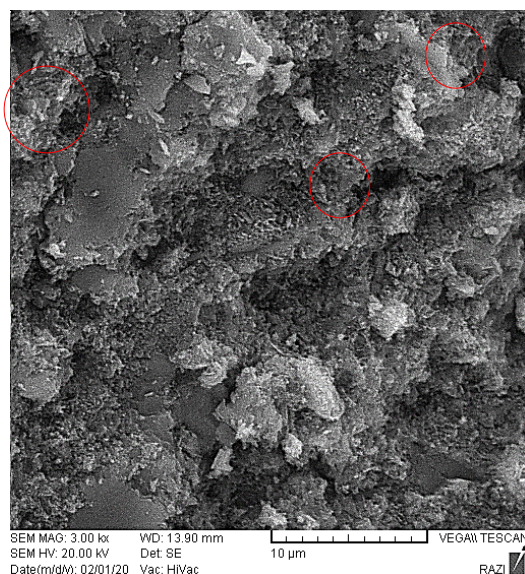


شکل ۱۰- نمودار تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن برای میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر

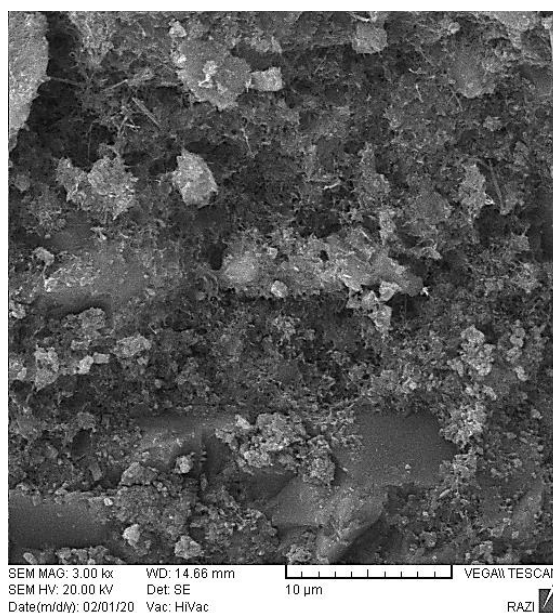


شکل ۱۱- نسبت بیشینه تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن تحت میدان مغناطیسی

وضعیت ریزساختار بتن غیرمغناطیسی و مغناطیسی توسط میکروسکوپ الکترونی در تصاویر ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب می‌گردد تا ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد. بنحویکه میزان حفرات در ساختار بتن کاهش می‌یابد. نتیجه‌ای که توسط سوتوپرنال و همکاران [۱۴] بر روی خمیر سیمان نیز گزارش شده بود. به دنبال این موضوع، مقاومت‌های مکانیکی و پیوستگی بتن تحت میدان مغناطیسی ارتقا می‌یابد. میدان مغناطیسی با افزایش فازهای کریستالی موجب می‌گردد که فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان افزایش یابد.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی بتن غیرمغناطیسی



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی بتن مغناطیسی

## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با چگالی شار ۰/۵ تسلا بر مقاومت‌های فشاری و پیوستگی و همچنین ریزساختار بتن حاوی سنگدانه های کوارتز بررسی شد که نتایج زیر قابل استخراج می‌باشند:

(۱) اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه و سخت شده موجب گردید که مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روز به ترتیب تا حدود ۱۹ و ۲۳/۵ درصد افزایش یابد.

(۲) با اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد تا حدود ۴۱ و ۶۳ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت. این میزان در خصوص نمونه های سخت شده تحت همزمان میدان مغناطیسی و کشش میلگرد به ترتیب تا ۵۵ و ۷۳ درصد نتیجه شد.

(۳) نسبت تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه های هوشمند کوارتز تحت تأثیر میدان مغناطیسی به ترتیب تا حدود ۳۹ و ۵۷ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت.

(۴) با اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن حاوی سنگدانه های کوارتز ساختار کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردید. این موضوع در اثر تکمیل فرایند هیدراتاسیون سیمان در حضور میدان مغناطیسی انجام گرفت.

## مراجع

- [1] American Concrete Institute, ACI 408. Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. (ACI 408R-03) Farmington Hills, MI, USA, (2003).
- [2] Arezoumandi, M., Steele, A.R., Volz, J.S. "Evaluation of the bond strengths between concrete and reinforcement as a function of recycled concrete aggregate replacement level," Structures (2018); 16: 73-81.
- [3] Alhawati, M., Ashour, A. "Bond strength between corroded steel reinforcement and recycled aggregate concrete," Structures (2019); 19: 369-385.
- [4] Saleh, N., Ashour, A., Sheehan, T. "Bond between glass fibre reinforced polymer bars and high-strength concrete," Structures (2019); 22: 139-153.
- [5] ACI (American Concrete Institute), Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI 318-14, Farmington Hills, MI, USA, (2014).
- [6] Gholhaki, M., Kheyroddin, A., Hajforoush, M., Kazemi, M. "An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials," Constr. Build. Mater. (2018); 158: 173-180.
- [7] Ghorbani, S., Sharifi, S., Rokhsarpour, H., Shoja, S., Gholizadeh, M., Rahmatabad, M. A. D., & de Brito, J. "Effect of magnetized mixing water on the fresh and hardened state properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete," Constr. Build. Mater. (2020); 248: 118660.
- [8] Hajforoush, M., Madandoust, R., Kazemi, M. "Effects of simultaneous utilization of natural zeolite and magnetic water on engineering properties of self-compacting concrete," Asian J. Civ. Eng. (2019); 20: 289-300.
- [9] Kciuk, M., Turczyn, R., Properties and application of magneto rheological fluids, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. (2006); 18 (1-2): 127-130.
- [10] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., Rezaifar, O. "Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field," Constr. Build. Mater. (2020); 252: 119064.
- [11] Ferrández, D., Saiz, P., Morón, C., Dorado, M.G., Morón, A. "Inductive method for the orientation of steel fibers in recycled mortars," Constr. Build. Mater. (2019); 222: 243-253.
- [12] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A. "Alternating magnetic field effect on fine aggregate steel chip-reinforced concrete properties," J. Mater. Civ. Eng. (2018); 30: 04018087.

- [13] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A. "Alternating magnetic field effect on fine aggregate concrete compressive strength," *Constr. Build. Mater.* (2017); 134: 83-90.
- [14] Soto Bernal, J.J., Gonzalez Mota, R., Rosales Candelas, I., Ortiz Lozano, J.A. "Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes," *Adv. Mater. Sci. Eng.* (2015); 1-9.
- [15] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A. "Magneto-electric control of scaled-down reinforced concrete beams," *ACI Struct. J.* (2017); 114: 233-244.
- [16] Rezaifar, O., Abavisani, I., Kheyroddin, A. "Magneto-electric active control of scaled down reinforced concrete columns," *ACI Struct. J.* (2017); 114: 1351-1362.
- [17] Ballato, A. "Piezoelectricity: History and New Thrusts," *IEEE Ultrasonics Symposium*, (1996); 575-583.
- [18] Bishop, J. R., "Piezoelectric Effects in Quartz-Rich Rocks," *Tectonophysics*, (1981); 77: 297-321.
- [19] Ikeda, T., "Fundamentals of Piezoelectricity," Oxford University Press., (1996).
- [20] Kumar, S., Gupta, R. C., & Shrivastava, S. Strength, abrasion and permeability studies on cement concrete containing quartz sandstone coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, (2016); 125: 884-891.
- [21] Kumar, S., Gupta, R. C., & Shrivastava, S. Effective utilisation of quartz sandstone mining wastes: A technical note on its thermal resistance. *Journal of cleaner production*, (2017); 140: 1129-1135.
- [22] Kumar, S., Sharma, A. K., Sherawat, D., Dutt, M., & Gupta, R. C. Technical note on sorption and permeability of concrete containing rubber and quartz sandstone aggregates. *Construction and Building Materials*, (2017); 145: 311-317.
- [23] Kumar, S., Gupta, R. C., Shrivastava, S., Csetenyi, L., & Thomas, B. S. 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*, (2016); 107: 103-108.
- [24] Kumar, S., Thomas, B. S., Gupta, V., Basu, P., & Shrivastava, S. Sandstone wastes as aggregate and its usefulness in cement concrete—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2018); 81: 1147-1153.
- [25] Aufort, J., Aktas, O., Carpenter, M. A., & Salje, E. K. Effect of pores and grain size on the elastic and piezoelectric properties of quartz-based materials. *American Mineralogist*, (2015); 100(5-6): 1165-1171.
- [26] Pachideh, Gh., Gholhaki, M., Moshtagh, A. On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of Building Engineering* 24, 100757.
- [27] Pachideh, Gh., Gholhaki, M. an experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures, *Journal of Testing and Evaluation* 47 (2), 1606-1620
- [28] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
- [29] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, (2004).
- [30] ASTM A615. Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. (ASTM A615/615M-16), ASTM International, West Conshohocken PA. (2016).
- [31] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken. PA, USA, (2018).
- [32] Grant, I.S., Phillips, W.R. Electromagnetism. John Wiley & Sons, (2013).
- [33] RILEM 7-II-128. RC6: Bond Test for Reinforcing Steel. 1. Pull-Out Test. RILEM technical recommendations for the testing and use of construction materials, E & FN Spon, U.K., (1994); 102-105.
- [34] Garcia Taengua, E., Martí Vargas, J.R., Serna, P. "Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.* 2016; 105: 275-8