

تأثیر شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر میزان خوردگی آرماتور در بتن حاوی میکروسیلیس در محیط خورنده

فخری جواهرشناس

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

ملک محمد رنجبر *

استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مرتضی سهرابی گیلانی

دکتری سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

محمد حج فروش

پسادکتری سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

با توجه به آن که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن در حالت تازه موجب بهبود خواص مهندسی آن می‌شود، انتظار می‌رود پدیده مغناطیس بتواند بر دوام بتن در محیط‌های خورنده نیز تأثیرگذار باشد. از آنجا که مطالعات مؤثری در خصوص میزان خوردگی آرماتور در بتن تحت میدان مغناطیسی انجام نشده است، پژوهش حاضر به بررسی اثرات اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی شامل ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا به بتن حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام آن می‌پردازد. همچنین ریزساختار بتن تحت میدان مغناطیسی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارزیابی گردید. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی با شدت ۱ تسلا به بتن حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس می‌تواند میزان خوردگی آرماتور مدفون در آن را تا ۱۷ درصد کاهش دهد. همچنین عملکرد فشاری بتن تحت میدان مغناطیسی تا حدود ۲۴ درصد بهبود می‌یابد. از طرفی میزان جذب آب نهایی و تخلخل بتن تحت میدان مغناطیسی به ترتیب تا ۱۴ و ۱۸ درصد کاهش یافت. تحلیل SEM نمونه‌های بتن نیز نشان داد که القای مغناطیسی بتن با اثرگذاری بر فرایند هیدراتاسیون مواد سیمانی بر میزان ژل کلسیم سیلیکات هیدراته می‌افزاید.

واژه‌های کلیدی: میدان مغناطیسی، بتن، میکروسیلیس، خوردگی آرماتور، SEM

* نویسنده مسئول: ranjbar@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش مقاومت فشاری تا ۱۳ درصد و کاهش جذب آب بتن تا ۱۰ درصد می‌گردد. در مطالعاتی که توسط سو و همکاران [۱۹]-۲۰ انجام شد، محققان نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی در بتن سبب کاهش ۵ درصدی مصرف سیمان نیز می‌گردد. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی نشان داده است که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن سبب بهبود خواص مکانیکی آن می‌گردد [۲۱-۳۸]. در مطالعه‌ای که توسط حج فروش و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۴ انجام شد، محققان به این نتیجه رسیدند که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن سبب افزایش مقاومت فشاری آن تا ۲۱ درصد می‌گردد. امینی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۲۴ خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ماسه سیلیسی را تحت میدان مغناطیس با شدت تا ۱ تسلا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اعمال ۱ تسلا میدان مغناطیسی به بتن حاوی ۱۰ درصد ماسه سیلیسی سبب افزایش مقاومت فشاری تا ۴۸ درصد می‌گردد. رضایی فر و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۴ نتایج مشابهی برای بتن حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت میدان مغناطیسی گرفتند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد اعمال میدان مغناطیسی با شدت ۱ تسلا به بتن حاوی ۱ درصد الیاف فولادی و ۱۰ درصد نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری آن تا حدود ۴۳ درصد می‌گردد. جواهرشناس و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۱ اثر مدت زمان اعمال میدان مغناطیسی بر خصوصیات بتن حاوی الیاف فولادی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اعمال میدان مغناطیسی به مدت ۲ دقیقه به نمونه‌های بتن موجب بیشترین افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی به ترتیب تا حدود ۲۰ و ۲۷ درصد می‌گردد. احمد و منار [۲۶] در سال ۲۰۲۱ تأثیر اعمال میدان مغناطیسی با شدت تا ۰/۵ تسلا را بر خصوصیات بتن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اعمال میدان مغناطیسی به بتن مقاومت‌های فشاری و کششی آن را به ترتیب تا ۲۹ و ۲۷ درصد بهبود می‌بخشد. در مطالعه دیگری حج فروش و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۰ اثر اعمال میدان مغناطیسی به بتن حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی را بررسی کردند. نتایج نشان داد اعمال میدان مغناطیسی به بتن مقاومت‌های فشاری و خمشی آن را به ترتیب تا ۱۸ و ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. صفری تربزاق و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۰ نیز نشان دادند که اعمال ۰/۵ تسلا میدان مغناطیسی به بتن حاوی ۰/۰۴ درصد نانو لوله کربنی مقاومت فشاری آن را تا ۱۱ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود

امروزه با توجه به گسترش بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، نیاز به بتن‌هایی با خواص مکانیکی و دوام بالاتر و مشخصات ریزساختاری بهتر بیش از پیش احساس می‌شود. در طی دهه‌های گذشته پژوهش‌های مختلفی در زمینه توسعه توانمندی بتن انجام شده و از افزودنی‌ها و پوزولان‌های مختلفی چون میکروسیلیس در بتن استفاده گردیده است [۱-۴]. حضور میکروسیلیس در بتن موجب ارتقای خواص مکانیکی آن می‌گردد؛ چرا که ذرات بسیار ریز میکروسیلیس فضاهای خالی بتن را پر کرده و همچنین به دلیل مشارکت در فرایند هیدراتاسیون سیمان موجب بهبود عملکرد بتن می‌شود [۵-۷]. در سال ۲۰۲۳ مطالعه جامع‌ای توسط کلیک و همکاران [۸] روی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس انجام شد. آن‌ها دریافتند که استفاده از ۵ درصد میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن به ترتیب تا حدود ۱۱، ۶ و ۸ درصد می‌گردد. در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۲۲ توسط احمد و همکاران [۹] انجام شد، گزارش گردید که افزودن ۵ درصد میکروسیلیس به بتن میزان جذب آب و خوردگی آرماتور داخل آن را به ترتیب تا حدود ۵۸ و ۶۶ درصد کاهش می‌دهد. جرج و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۱ نیز تأثیر افزودن میکروسیلیس بر خصوصیات بتن را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که افزودن ۱۲ درصد میکروسیلیس به بتن مقاومت فشاری را تا حدود ۱۸ درصد افزایش و خوردگی آرماتور مدفون در بتن را تا حدود ۳۲ درصد کاهش می‌دهد. در سال‌های گذشته مطالعاتی در زمینه اثر میدان‌های مغناطیسی بر خواص مهندسی بتن انجام شده است که از دو جنبه قابل بررسی است. اعمال میدان مغناطیسی بر آب مخلوط بتن که به طور قابل توجهی کارایی، خصوصیات مکانیکی، دوام و نفوذپذیری بتن را بهبود می‌بخشد [۱۱-۱۳]. آب یک مایع قطبی است که مولکول‌های آن می‌توانند در یک محیط مغناطیسی قطبیده شوند. بنابراین میدان مغناطیسی می‌تواند بر خصوصیات فیزیکی آب مانند کشش سطحی، ویسکوزیته، دما، هدایت الکتریکی، pH، حلالیت، وزن مخصوص و فشار نفوذپذیری تأثیر بگذارد [۱۴-۱۷]. حج فروش و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۸ تأثیر آب مغناطیسی بر خصوصیات بتن خودتراکم را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی موجب

میکروسیلیس، ریزدانه و درشت‌دانه، آب و فوق روان کننده استفاده شد.

۳-۱-۱- سیمان پرتلند

سیمان پرتلند تیپ ۲ بر اساس مشخصات [39] ASTM C150 مورد استفاده قرار گرفت که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۱-۲- میکروسیلیس

میکروسیلیس به عنوان جایگزین ۵ و ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی استفاده شد که خصوصیات شیمیایی آن نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس		
سیمان	میکروسیلیس	
۲۲/۴۵	۹۴/۴	SiO ₂
۴/۸۵	۰/۷۳	Al ₂ O ₃
۳/۹۵	۰/۲۱	Fe ₂ O ₃
۶۴/۸۶	۰/۲۸	CaO
۰/۸	۰/۱۷	MgO
۰/۸۵	۰/۴۵	SO ₃
۰/۵۱	۰/۲۴	K ₂ O
۰/۲۵	۰/۱۱	Na ₂ O

۳-۱-۳- ریزدانه و درشت‌دانه

ماسه رودخانه‌ای در محدوده استاندارد الک نمره ۲۰۰ تا الک نمره ۴ به عنوان ریزدانه و شن شکسته در محدوده استاندارد الک نمره ۴ تا الک $\frac{1}{2}$ اینچ به عنوان درشت‌دانه مطابق با استاندارد ASTM [40] C33 استفاده شده است که خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز و درشت در شکل ۱ ارائه شده است.

۳-۱-۴- آب

کیفیت آب اختلاط مورد استفاده در این پژوهش مطابق با الزامات استاندارد [41] ASTM D1129 در نظر گرفته شد.

۳-۱-۵- فوق روان کننده

در مطالعه حاضر، از یک فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات

می‌بخشد. ابویسانی و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۸ اثر اعمال میدان مغناطیسی بر خصوصیات بتن حاوی براده‌های آهن را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد اعمال ۰/۵ تسلا میدان مغناطیسی به بتن مقاومت فشاری آن را تا حدود ۱۷ درصد افزایش می‌دهد. سوتورنال و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۱۵ خصوصیات مکانیکی خمیر سیمان تحت میدان مغناطیسی را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی به خمیر سیمان مقاومت فشاری آن را تا حدود ۱۳ درصد افزایش می‌دهد.

۲- اهمیت پژوهش

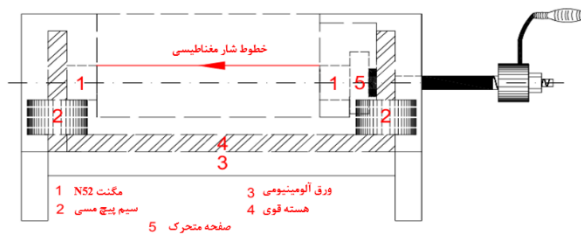
بر اساس دانش نویسندگان، از آنجا که تاکنون هیچ مطالعه‌ای در خصوص بررسی اثر میدان مغناطیسی بر میزان خوردگی آرماتور داخل بتن در محیط خورنده انجام نشده است، لذا هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی نرخ خوردگی آرماتور مدفون در بتن حاوی میکروسیلیس تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی می‌باشد. این موضوع از آنجا که میدان مغناطیسی می‌تواند ضمن اثرگذاری بر مصالح بتن بر میلگرد فولادی داخل آن نیز اثر داشته باشد حائز اهمیت است. همچنین مشخصه دوام بتن تحت میدان مغناطیسی توسط آزمایش‌های جذب آب و تخلخل بتن نیز بررسی شد. خواص مکانیکی بتن تحت میدان مغناطیسی توسط آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز ارزیابی گردید. همچنین مشخصات ریزساختاری بتن تحت میدان مغناطیسی با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر از شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی شامل ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا جهت اعمال به نمونه‌های بتن استفاده گردید تا میزان اثربخشی شدت میدان بر نتایج آزمایشگاهی نیز مشخص گردد. همچنین از پوزولان میکروسیلیس در مقادیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان به عنوان جایگزین بخشی از مواد سیمانی استفاده شد تا اثر مقدار پوزولان بر نتایج نیز آشکار گردد. به منظور تولید شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی تا ۱ تسلا از یک دستگاه الکترومغناطیسی به همراه مگنت‌های دائمی استفاده شده است.

۳- آزمایش‌ها و روش انجام آزمون‌ها

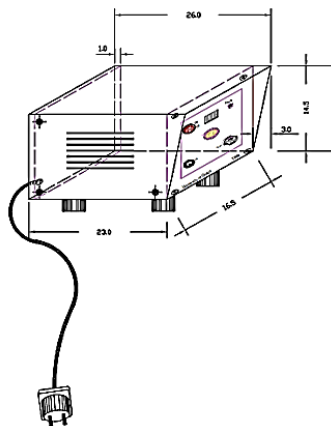
۳-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های بتن از سیمان پرتلند،

ساخته شده با یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۱/۵ میلی متر پوشانده شده است. جریان الکتریکی مورد استفاده برای تولید شار مغناطیسی مورد نظر در محدوده ۱ تا ۶ آمپر بوده که توسط یک منبع تغذیه با اختلاف پتانسیل الکتریکی حداکثر ۲۲ ولت تولید می شود. تصویر دستگاه ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- دستگاه الکترومغناطیسی ساخته شده جهت تولید میدان مغناطیسی و اعمال به بتن (الف) جزئیات هسته قوی (ب) منبع تغذیه

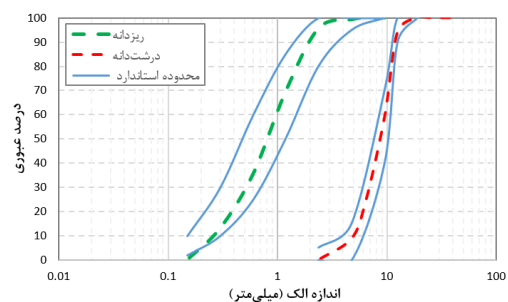
۳-۳- طرح اختلاط و روش انجام آزمایش ها

در این مطالعه، به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی نمونه های بتن حاوی ۰، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس، آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه انجام شد. جهت ارزیابی ویژگی های دوام نمونه های بتن، آزمایش های خوردگی تسریع شده میلگرد در بتن در معرض میدان مغناطیسی و جذب آب و تخلخل بتن انجام گردید. ریزساختار نمونه های بتن حاوی میکروسیلیس که در معرض شدت های مختلف میدان مغناطیسی قرار گرفته بودند نیز با استفاده از تصویربرداری SEM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این راستا، آزمایش های مقاومت فشاری، جذب آب و تخلخل

مطابق با مشخصات استاندارد [42] ASTM C494 استفاده شد. وزن مخصوص این ماده ۱/۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد و سطح pH آن ۷ تعیین گردید. این فوق روان کننده حاوی مقادیر مضر یون های کلرید نمی باشد. لذا بر خواص نهایی بتن حاوی میکروسیلیس تأثیر نمی گذارد.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی ریزدانه و درشت دانه

درشت دانه	ریزدانه	
65/2	6/2	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
05/1	28/2	جذب آب (درصد)
-	6/2	مدول نرمی
گوشه دار	گرد	شکل
خشن	صیقلی	سطح ظاهری



شکل ۱- نمودار دانه بندی سنگدانه ها

۳-۲- دستگاه میدان مغناطیسی

در این پژوهش، به منظور ایجاد میدان مغناطیسی با چگالی شار ۰/۵ تا ۱ تسلا و به حداقل رساندن تلفات حرارتی، سیم پیچ های الکترومغناطیسی به همراه مگنت های نئودیمیوم (N52) طراحی و ساخته شدند که شار مغناطیسی را در همان جهت تولید می کنند. برای این منظور، از یک هسته آهنی U شکل قوی و یک صفحه فلزی متحرک استفاده شده است تا امکان تنظیم جابه جایی در محدوده ۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر برای قرارگیری نمونه های بتن با ابعاد مختلف فراهم شود. این صفحه به راحتی توسط یک اهرم جابه جا می گردد. در دو طرف صفحه، آهنرباهای دائمی N52 قرار دارند که قادر به تولید شار مغناطیسی ۰/۵ تسلا هستند. علاوه بر این، دو بوبین مغناطیسی متشکل از ۶۰۰ دور سیم مسی با قطر ۱ میلی متر ساخته شده حول هسته آهنی پیچیده شده اند تا شدت میدان را هم راستا با میدان تولید شده توسط مگنت ها افزایش دهند. مجموعه

مطابق شکل ۳ قرار گرفتند.



(الف)



(ب)

شکل ۳- اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن (الف) نمونه مکعبی (ب) نمونه استوانه‌ای

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز طبق استاندارد ASTM C39 [44] انجام شد. در این آزمایش نمونه‌ها باید در امتداد مرکز صفحه‌ی بالایی اعمال نیروی دستگاه فشاری بتن قرار گیرند. سطح بالائی و پائینی نمونه‌ها باید صاف بوده و هر سطحی بر محور نمونه عمود باشد. فک دستگاه از ابعاد نمونه بتن باید بزرگ‌تر بوده و بارگذاری به صورت پیوسته با سرعت ۱/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌پذیرد.

۳-۴- دوام

بر اساس دانش نویسندگان، این پژوهش اولین تلاش تجربی برای بررسی تأثیر اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا بر دوام نمونه‌های بتن حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس می‌باشد. برای دستیابی به این هدف آزمایش‌های خوردگی تسریع شده میلگردهای مدفون در بتن، درصد جذب آب و تخلخل بتن انجام شده است.

۳-۴-۱- خوردگی تسریع شده میلگردهای فولادی مدفون در بتن در معرض میدان مغناطیسی

یکی از مهم‌ترین عوامل در دوام بتن، خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن در معرض محیط خورنده است. میلگرد

بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری و آزمایش خوردگی تسریع شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر صورت پذیرفت. به منظور جلوگیری از نشت مغناطیسی، تمام قالب‌های بتن از جنس پلاستیک (PVC) با ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شدند. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، طرح‌های اختلاط بتن مطابق با جدول ۳ آماده شدند. برای تهیه مخلوط‌ها، طرح اختلاط بر اساس استاندارد ASTM C192 [43] انجام شد که با افزودن ریزدانه و درشت‌دانه به همراه یک سوم آب اختلاط به داخل میکسر آغاز گردید. سپس سیمان، میکروسیلیس، آب اختلاط باقیمانده و فوق روان‌کننده در مدت ۲-۱ دقیقه به مخلوط اضافه شدند و اختلاط به مدت ۳ دقیقه دیگر ادامه یافت. تمام نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا ۲۸ روز تحت شرایط مرطوب عمل‌آور شدند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نمونه‌های بتن مغناطیسی به مدت ۲ دقیقه در معرض میدان مغناطیسی با شدت‌های مورد نظر قرار گرفتند که این موضوع در راستای مطالعات پیشین [29-21] بوده است.

جدول ۳- طرح اختلاط بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)

میکروسیلیس	سیمان	فوق روان‌کننده		آب	ماسه	شن
مقدار درصد	مقدار درصد	مقدار درصد	مقدار درصد			
۰	۰	۴۵۰	۰/۹	۲۰۲/۵	۸۰۱	۸۹۰
۲۲/۵	۵	۴۲۷/۵	۴/۰۵	۰/۹	۸۰۱	۸۹۰
۴۵	۱۰	۴۰۵	۴/۰۵	۰/۹	۸۰۱	۸۹۰

نمونه‌های بتن حاوی ۵، ۱۰ و ۱۰ درصد میکروسیلیس به چهار دسته تقسیم شدند: نمونه‌های غیرمغناطیسی بدون میکروسیلیس که در معرض میدان مغناطیسی نبودند، نمونه‌های مغناطیسی بدون میکروسیلیس که به مدت ۲ دقیقه در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفتند، نمونه‌های غیرمغناطیسی حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس که در معرض میدان مغناطیسی نبودند و نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس که به مدت ۲ دقیقه در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفتند. بدین منظور بتن ساخته شده در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای ریخته شده و پس از متراکم شدن توسط میز لرزاننده به مدت ۲ دقیقه تحت میدان مغناطیسی

مختلف میکروسلیس تحت تأثیر شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر روی نمونه‌های مکعبی بتن مطابق با استاندارد ASTM C642 [46] در سن ۲۸ روزه انجام پذیرفت. مقدار درصد جذب آب و تخلخل بتن به کمک روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه می‌باشد:

$$WA = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3)$$

$$PP = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_b} \times 100 \quad (4)$$

که در آن WA درصد جذب آب بتن، W_s جرم نمونه اشباع با سطح خشک شده در هوا، W_d جرم خشک شده نمونه بعد از گرمخانه، PP درصد تخلخل بتن و W_b جرم ظاهری نمونه در آب پس از غوطه‌وری می‌باشد.

براساس CEB-FIP [47] کیفیت بتن برحسب میزان درصد جذب آب مطابق جدول ۴ به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود.

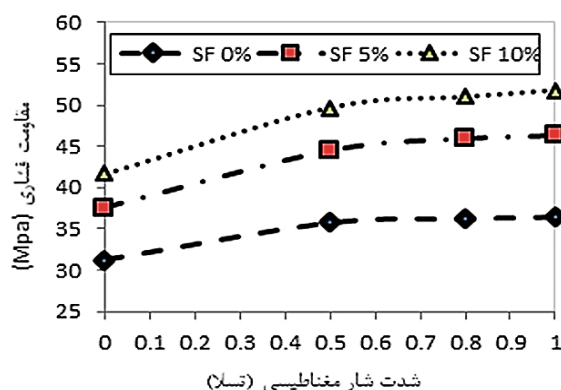
جدول ۴- کیفیت بتن بر حسب درصد جذب آب [46]

کیفیت بتن	درصد جذب آب
خوب	۳ و کمتر
متوسط	۳ تا ۵
ضعیف	۵ و بیشتر

۴- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

۴-۱- مقاومت فشاری بتن در معرض میدان مغناطیسی

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسلیس تحت تأثیر شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در معرض شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی

فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر در مرکز نمونه استوانه‌ای بتن قرار داده شد. نمونه‌های بتن در محلول ۵ درصد کلرید سدیم (NaCl) قرار گرفته و تحت خوردگی تسریع شده مطابق شکل ۴ قرار گرفتند. برای این آزمایش از ولتاژ ثابت ۶۰ ولت استفاده شد. منبع تغذیه دارای دو خروجی مثبت و منفی بود که به ترتیب به یک صفحه مسی در کف نمونه‌های بتن به عنوان کاتد و به میلگرد مدفون در نمونه‌های بتن به عنوان آنود متصل شدند. جریان از میلگرد فولادی به صفحه مسی که در محلول ۵ درصد NaCl غوطه‌ور بود جاری می‌شود. مطابق قانون فارادی [45]، کاهش جرمی نظری و واقعی میلگرد فولادی تحت خوردگی به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد:

$$(1) \quad \text{کاهش جرم نظری} = \frac{t \times I \times 55/847}{2 \times 96487}$$

که در آن t نماد زمان بر حسب ثانیه و I جریان الکتریکی بر حسب آمپر است. همچنین 55/847 جرم مولی آهن بر حسب گرم بر مول و 96487 ثابت فارادی بر حسب کلمب می‌باشد.

$$(2) \quad \text{کاهش جرم عملی} = CL = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100$$

که در آن G_0 وزن اولیه میلگرد قبل از خوردگی و G_1 وزن میلگرد پس از حذف اثرات خوردگی است.



شکل ۴- دستگاه مورد استفاده برای خوردگی تسریع شده میلگردهای فولادی مدفون در بتن

۴-۲- درصد جذب آب و تخلخل بتن

بررسی میزان جذب آب و تخلخل در بتن حاوی درصد‌های

گرفتند. مقدار واقعی خوردگی کمتر از مقدار نظری محاسبه شده با معادله (۱) بود. به عبارت دیگر، میدان مغناطیسی میزان خوردگی میلگردها در نمونه‌های بتنی را کاهش داد که بیشترین و کمترین اختلاف بین مقدار نظری و واقعی ۴۰ و ۶۰۲۵ درصد برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس تحت میدان مغناطیسی ۱ تسلا و نمونه‌های شاهد به ترتیب گزارش شد. با توجه به مقدار میکروسیلیس استفاده شده در نمونه‌های بتنی و افزایش شدت میدان مغناطیسی اعمال شده، میزان خوردگی واقعی در مقایسه با مقدار نظری کاهش یافت. افزایش اختلاف بین درصد خوردگی واقعی و نظری میلگردها ممکن است نشان دهنده نیاز به انرژی بیشتر برای افزایش سطح خوردگی باشد که نشان دهنده نفوذپذیری کمتر نمونه‌های بتنی مغناطیسی است. اعمال میدان مغناطیسی ۰/۵ تا ۱ تسلا به نمونه‌های بتن باعث کاهش ۱۰۶ تا ۱۳ درصد در سطح خوردگی شد. این محدوده برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به ۱۲۰۹ تا ۱۶۰۱ درصد و برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس به ۱۳۰۸ تا ۱۷۰۲ درصد رسید.



شکل ۶- الگوی شکست نمونه‌های بتن تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی

منافذ بتن حاوی مقادیر زیادی کلسیم، سدیم و پتاسیم هستند که در محیط قلایی با pH حدود ۱۲، لایه نازکی از $\text{Fe}(\text{OH})_2$ در اطراف میلگرد تشکیل می‌شود. این لایه باعث کاهش میزان خوردگی به کمترین حد ممکن می‌گردد. محصولات سیمانی به طور طبیعی یک لایه محافظ در اطراف میلگرد ایجاد می‌کنند که از خوردگی میلگرد در برابر یون‌های مضر مانند کلرید جلوگیری می‌کند. ساختار ضعیف بتن باعث کاهش pH لایه اطراف میلگرد شده و منجر به تخریب لایه محافظ و میلگرد می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی به بتن می‌تواند تراکم لایه را افزایش و تخلخل آن را کاهش دهد. بنابراین میدان مغناطیسی کیفیت لایه محافظ اطراف

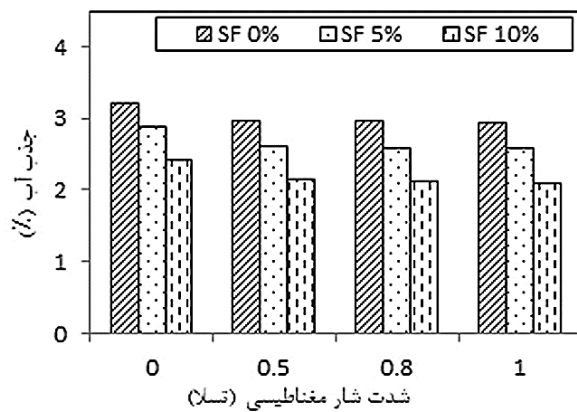
بر این اساس می‌توان استنباط نمود که اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن تازه، مقاومت فشاری آن‌ها را در سن ۲۸ روزه افزایش داد. مقاومت فشاری نمونه‌های مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی با شدت‌های ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا به ترتیب ۱۴/۷، ۱۶/۲ و ۱۷ درصد در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافت. به علاوه، مقدار میکروسیلیس در بتن می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری آن شود. این مقادیر برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به ترتیب تا ۱۸/۴، ۲۲/۲ و ۲۳/۲ درصد به دست آمد. همچنین اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا به نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری آن‌ها به ترتیب تا ۱۹/۲، ۲۲/۳ و ۲۴/۲ درصد شد. مطابق شکل ۵ و صرف نظر از مغناطیسی کردن نمونه‌ها، استفاده از ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس در بتن سبب افزایش مقاومت فشاری آن به ترتیب تا ۲۰/۷ و ۳۳/۷ درصد گردید.

وجود ذرات باردار در مواد سیمانی یعنی سیمان و میکروسیلیس و همچنین ماسه مصرفی سبب تأثیر پذیری بتن تحت میدان مغناطیسی می‌گردد. اعمال میدان مغناطیسی بر بتن باعث افزایش قابل توجه مقدار ژل C-S-H با ساختار متراکم‌تر و کم‌تخلخل‌تر در فرآیند هیدراتاسیون سیمان می‌شود، همانطور که پیش‌تر توسط سوتورنال و همکاران [۳۷] برای خمیر سیمان نیز گزارش شده بود. این مکانیزم منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت مکانیکی بتن تحت میدان مغناطیسی می‌گردد. نتایج مشابه‌ای نیز توسط ابویسانی و همکاران [۳۱ و ۳۳] و همچنین حج‌فروش و همکاران [۲۱ و ۲۵] مشاهده شده است.

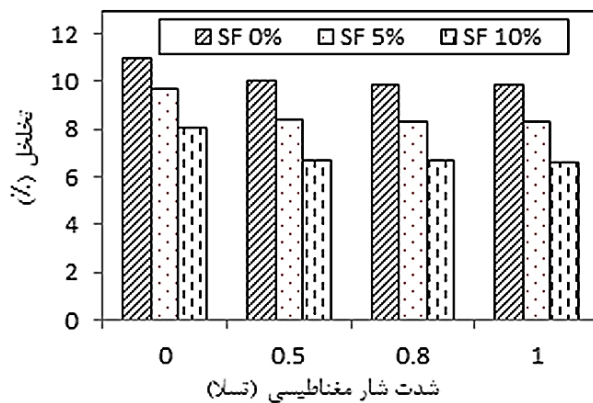
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، الگوی شکست نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس تحت تأثیر میدان مغناطیسی متفاوت است. افزایش شدت شار مغناطیسی منجر به رفتار تردتر نمونه‌ها تحت بار فشاری می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش شدت میدان مغناطیسی هم باعث بهبود مقاومت مکانیکی و هم کاهش تخلخل در نمونه‌های بتن حاوی میکروسیلیس می‌گردد.

۴-۲- خوردگی تسریع شده میلگردهای فولادی مدفون در بتن

نمونه‌های بتن حاوی میلگرد تحت خوردگی تسریع شونده قرار



شکل ۹- درصد جذب آب نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی



شکل ۱۰- درصد تخلخل نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی

بر اساس جدول ۴ نمونه‌های بتن معمولی بدون مغناطیس ساخته شده در این پژوهش دارای کیفیت متوسط و بقیه نمونه‌های بتنی دارای کیفیت خوب هستند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس سبب کاهش جذب آب و تخلخل نمونه‌ها گردید. با بررسی نتایج شکل ۹ مشاهده می‌شود که اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف ۰/۵، ۰/۸ و ۱ تسلا سبب کاهش جذب آب نمونه‌های مغناطیسی به مقدار به ترتیب ۷/۱، ۷/۷ و ۸/۳ درصد در مقایسه با نمونه‌های بتن شاهد گردید. این مقادیر برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به ترتیب ۹/۷، ۱۰/۳ و ۱۰/۶ درصد و نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس به ترتیب ۱۱/۴، ۱۲/۶ و ۱۳/۷ درصد بدست آمد. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که نمونه‌های مغناطیسی دارای ۱۰/۲ درصد تخلخل کمتر نسبت به نمونه‌های شاهد هستند.

میلگرد فولادی را بهبود بخشیده و منجر به کاهش آسیب به میلگرد و خوردگی بتن می‌شود. خوردگی میلگرد فولادی در نمونه‌های بتنی در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین شکل ۸ تأثیر اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر مقدار خوردگی نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس را نمایش می‌دهد.

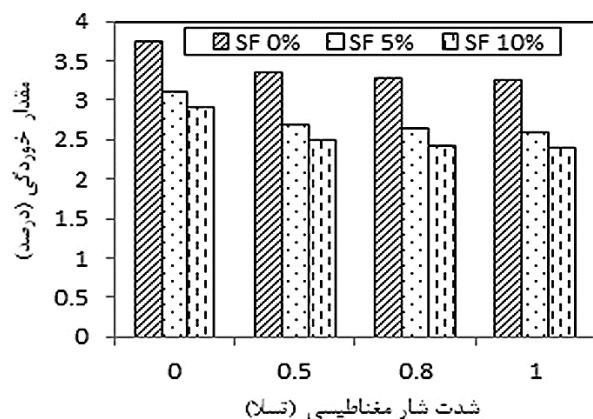


(الف)



(ب)

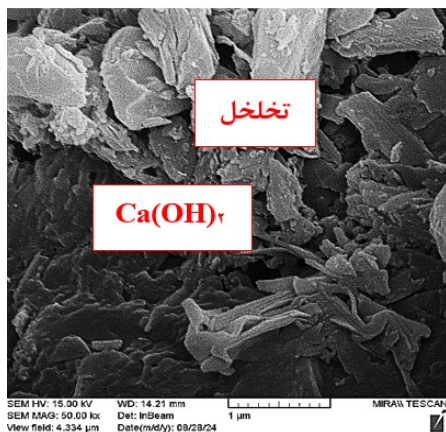
شکل ۷- خوردگی آرماتور مدفون در بتن (الف) نمونه بدون مغناطیس (ب) نمونه مغناطیس شده



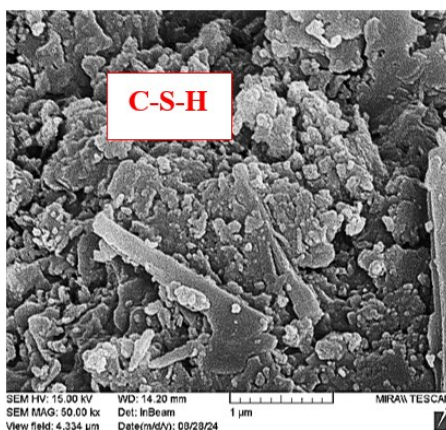
شکل ۸- اثر اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر مقدار خوردگی آرماتور مدفون در بتن

۴-۳- جذب آب و تخلخل بتن

نتایج آزمایش‌های درصد جذب آب و تخلخل نفوذپذیر نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی بتن‌های (الف) غیرمغناطیسی

(ب) مغناطیسی

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، خواص مکانیکی، دوام و ریزساختاری نمونه‌های بتن حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس که در معرض شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی ۰.۵ تا ۱ تسلا قرار گرفته بودند، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت نیل به این اهداف، آزمایش‌های مقاومت فشاری، خوردگی تسریع شده میلگرد فولادی مدفون در بتن در محیط کلریدی، جذب آب و تخلخل بتن انجام گردید. همچنین، از تصاویر SEM برای ارزیابی ریزساختار نمونه‌های بتن در معرض میدان مغناطیسی بهره گرفته شد. بر اساس این پژوهش، نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد:

- اعمال میدان مغناطیسی ۱ تسلا به نمونه‌های بتن حاوی ۵، ۱۰ و ۱۷ درصد میکروسیلیس مقاومت فشاری آن‌ها را به ترتیب تا حدود ۲۳، ۲۴ و درصد افزایش داد.

این درصد برای نمونه‌های مغناطیسی حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس به ترتیب ۱۴/۳ و ۱۷/۸ درصد حاصل گردید. اعمال میدان مغناطیسی بر نمونه‌های بتن موجب بازآرایی ساختار مولکولی در ذرات سیمان گردیده که این پدیده منجر به کاهش نفوذپذیری و در نتیجه ارتقای مشخصات دوام بتن می‌گردد. بنابراین این امر سبب کاهش فضای خالی بتن و تراکم بیشتر نمونه‌های بتن می‌گردد که در نتیجه جذب آب و تخلخل بتن کاهش می‌یابد. این یافته‌ها هم‌راستا با نتایج تحقیقات سوتورنال و همکاران [37] در بررسی‌های انجام شده بر روی خمیر سیمان نیز می‌باشد.

۴-۴- خصوصیات ریزساختاری بتن

تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه‌های غیرمغناطیسی و مغناطیسی با میکروسیلیس به ترتیب در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. به وضوح مشاهده می‌شود که تفاوت قابل توجهی در مقدار و ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) وجود دارد. در این رابطه، مقدار ژل C-S-H در حضور میدان مغناطیسی در بتن حاوی میکروسیلیس افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ساختار ژل در مقایسه با نمونه شاهد متراکم‌تر و کم‌تخلخل‌تر می‌باشد. رفتار مشابهی نیز توسط سوتورنال و همکاران [۳۷] برای خمیرهای سیمانی در معرض میدان مغناطیسی گزارش شده است. همچنین نمونه‌های مغناطیسی در مقایسه با نمونه‌های شاهد پیوستگی بهتری بین سنگدانه‌های ریز و خمیر سیمان نشان می‌دهند. این بهبود در پیوستگی و کاهش تخلخل می‌تواند به افزایش مقاومت مکانیکی بتن و کاهش احتمال خوردگی در بتن مسلح کمک کند.

طبق شکل ۱۱، واکنش‌های شیمیایی هیدراتاسیون مواد سیمانی با استفاده از میدان مغناطیسی افزایش یافته است. همچنین قرار دادن نمونه بتن تازه در معرض میدان مغناطیسی باعث کاهش هیدروکسید کلسیم که به عنوان عامل تضعیف مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی شناخته می‌شود، گردید. علاوه بر این، میدان مغناطیسی تبدیل هیدروکسید کلسیم به ژل C-S-H را در فرایند هیدراتاسیون مواد سیمانی تسهیل می‌کند.

این عوامل سهم قابل توجهی در بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن در معرض میدان مغناطیسی دارند.

Khoshkbijari, R. (۲۰۱۸). Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete. Magazine of Concrete Research, ۷۰(۱۰), ۵۳۲-۵۱۹

[۶] Tayeh, B. A., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Bakar, B. A. (۲۰۲۲). Influence of microsilica and polypropylene fibers on the fresh and mechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHP-GPC). Case Studies in Construction Materials, ۱۷, e.۱۳۶۷

[۷] Sadrmomtazi, A., Sobhani, J., Mirgozar, M. A., & Najimi, M. (۲۰۱۲). Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. Construction and Building Materials, ۳۵, ۲۱۹-۲۱۱

[۸] Çelik, A. İ., Özkılıç, Y. O., Bahrami, A., & Hakeem, I. Y. (۲۰۲۳). Mechanical performance of geopolymer concrete with micro silica fume and waste steel lathe scraps. Case Studies in Construction Materials, ۱۹, e.۰۲۵۴۸

[۹] Ahmad, S., Al-Amoudi, O. S. B., Khan, S. M., & Maslehuddin, M. (۲۰۲۲). Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. Case Studies in Construction Materials, ۱۷, e.۰۱۲۵۵

[۱۰] Garg, R., Garg, R., & Singla, S. (۲۰۲۱). Experimental investigation of electrochemical corrosion and chloride penetration of concrete incorporating colloidal nanosilica and silica fume. Journal of Electrochemical Science and Technology, ۱۲(۴), ۴۵۲-۴۴۰

[۱۱] Ghorbani S., Gholizadeh, M., & de Brito, J. (۲۰۱۸). Effect of magnetized water on the mechanical and durability properties of concrete block pavers. Materials, ۱۱(۹), ۱۶۴۷

[۱۲] Esfahani, A. R., Reisi, M., & Mohr, B. (۲۰۱۸). Magnetized water effect on compressive strength and dosage of superplasticizers and water in self-compacting concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, ۳۰(۳), ۰۴۰۱۸۰۰۸

[۱۳] Abdel-Magid, T. I. M., Hamdan, R. M.,

- با افزایش شدت میدان مغناطیسی تا ۱ تسلا، مقدار خوردگی آرماتور در نمونه‌های بتن حاوی ۰، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس به ترتیب ۱۳، ۱۶ و ۱۷ درصد کاهش یافت.

- اعمال ۱ تسلا میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن حاوی ۰، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس سبب کاهش درصد جذب آب آن‌ها به ترتیب تا ۸، ۱۱ و ۱۴ درصد گردید.

- اعمال ۱ تسلا میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن حاوی ۰، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس سبب کاهش تخلخل نمونه‌ها به ترتیب به میزان ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد شد.

- آنالیز SEM نشان داد که حضور میدان مغناطیسی منجر به افزایش مقدار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده می‌شود. همچنین ساختار ژل در نمونه‌های بتن تحت تأثیر میدان مغناطیسی متراکم‌تر و کم‌تخلخل‌تر می‌گردد. در نتیجه، واکنش‌های شیمیایی مربوط به هیدراسیون سیمان با اعمال میدان مغناطیسی بهبود می‌یابد.

۶- مراجع

[۱] Momtazi, A. S., Tahmouresi, B., & Khoshkbijari, R. K. (۲۰۱۶). An investigation on mechanical properties and durability of concrete containing silica fume and fly ash. Civil Engineering Journal, ۲(۵), ۱۹۶-۱۸۹

[۲] Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H., & Shemshad Sara, Y. G. (۲۰۱۹). Experimental study effect of silica fume and hybrid fiber on mechanical properties lightweight concrete. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, ۴۳, ۲۷۱-۲۶۳

[۳] Pratap, B. (۲۰۲۴). Analysis of the Synergistic Effects of Micro Silica on the mechanical and Durability Properties of Geopolymer Concrete Incorporating Phosphogypsum. Journal of Building Engineering, ۱۰۹۸۳۱

[۴] Raza, S. S., Amir, M. T., Azab, M., Ali, B., Abdallah, M., El Ouni, M. H., & Elhag, A. B. (۲۰۲۲). Effect of micro-silica on the physical, tensile, and load-deflection characteristics of micro fiber-reinforced high-performance concrete (HPC). Case Studies in Construction Materials, ۱۷, e.۰۱۳۸۰

[۵] Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., & Kohani

Engineering, ۱۱۱۲۱۵

[۲۲] Amini, M. M., Ghanepour, M., & Rezaifar, O. (۲۰۲۴). Experimental analysis of the impact of alternating magnetic fields on the compressive strength of concrete with various silica sand and microsilica compositions. *Case Studies in Construction Materials*, ۲۱, e.۰۳۴۸۷

[۲۳] Rezaifar, O., Ghanepour, M., & Amini, M. M. (۲۰۲۴). A novel magnetic approach to improve compressive strength and magnetization of concrete containing nano silica and steel fibers. *Journal of Building Engineering*, ۹۱, ۱۰۹۳۴۲

[۲۴] Javahershenas, F., Gilani, M. S., & Hajforoush, M. (۲۰۲۱). Effect of magnetic field exposure time on mechanical and microstructure properties of steel fiber-reinforced concrete (SFRC). *Journal of Building Engineering*, ۳۵, ۱۰۱۹۷۵

[۲۵] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., Rezaifar, O., & Kioumars, M. (۲۰۲۱). The effects of uniform magnetic field on the mechanical and microstructural properties of concrete incorporating steel fibers. *Scientia Iranica*, ۲۸(۵), ۲۵۶۷-۲۵۵۷

[۲۶] Ahmed, S. M., & Manar, D. F. (۲۰۲۱). Effect of static magnetic field treatment on fresh concrete and water reduction potential. *Case Studies in Construction Materials*, ۱۴, e.۰۰۵۳۵

[۲۷] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., & Rezaifar, O. (۲۰۲۰). Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field. *Construction and Building Materials*, ۲۵۲, ۱۱۹۰۶۴

[۲۸] Tarbozagh, A. S., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (۲۰۲۰). Electromagnetism in taking concrete behavior on demand. In *Structures*, Elsevier, ۲۷, ۱۰۶۵-۱۰۵۷

[۲۹] Tarbozagh, A. S., Rezaifar, O., Gholhaki, M., & Abavisani, I. (۲۰۲۰). Magnetic enhancement of carbon nanotube concrete compressive behavior. *Construction and Building Materials*, ۲۶۲, ۱۲۰۷۷۲

[۳۰] Ferrández, D., Saiz, P., Morón, C., Dorado, M.

Abdelgader, A. A. B., & Omer, M. E. A. (۲۰۱۷), "Effect of magnetized water on workability and compressive strength of concrete", *Procedia engineering*, ۱۹۳, ۵۰۰-۴۹۴

[۱۴] Ghorbani, S., Ghorbani, S., Tao, Z., De Brito, J., & Tavakkolizadeh, M. (۲۰۱۹). Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete. *Construction and Building materials*, ۱۹۷, ۲۹۰-۲۸۰

[۱۵] Ghorbani, S., Sharifi, S., De Brito, J., Ghorbani, S., Jalayer, M. A., & Tavakkolizadeh, M. (۲۰۱۹). Using statistical analysis and laboratory testing to evaluate the effect of magnetized water on the stability of foaming agents and foam concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۰۷, ۴۰-۲۸

[۱۶] Wei, H., Wang, Y., & Luo, J. (۲۰۱۷), Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete, *Construction and Building Materials*, ۱۴۷, ۱۰۰-۹۱

[۱۷] Gholhaki, M., Hajforoush, M., & Kazemi, M. (۲۰۱۸). An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, ۱۵۸, ۱۸۰-۱۷۳

[۱۸] Hajforoush, M., Madandoust, R., & Kazemi, M. (۲۰۱۹). Effects of simultaneous utilization of natural zeolite and magnetic water on engineering properties of self-compacting concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, ۲۰, ۳۰۰-۲۸۹

[۱۹] Su, N., Wu, Y. H., & Mar, C. Y. (۲۰۰۰). Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and concrete research*, ۳۰(۴), ۶۰۵-۵۹۹

[۲۰] Su, N., & Wu, C. F. (۲۰۰۳). Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. *Cement and concrete composites*, ۲۵(۷), ۶۸۸-۶۸۱

[۲۱] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., Rezaifar, O., & Kazemi, M. (۲۰۲۴). Magnetic field effect on bond performance between reinforcement and concrete containing steel fibers. *Journal of Building*

International, West Conshohocken, PA .

[۴۱] ASTM D۱۳-۱۱۲۹. (۲۰۱۳). Standard Terminology Relating to Water, ASTM International, West Conshohocken, PA .

[۴۲] ASTM C۴۹۴. (۲۰۰۴). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA

[۴۳] ASTM C۱۹۲. (۲۰۱۸). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken. PA, USA

[۴۴] ASTM C ۳۹/ C۳۹M-۱۸., (۲۰۱۸), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocke.

[۴۵] Yalciner, H., Eren, O., & Sensoy, S. (۲۰۱۲). An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level. Cement and Concrete Research, ۴۲(۵), ۶۵۵-۶۶۳

[۴۶] ASTM C۲۱-۶۴۲: ASTM International (۲۰۲۱). Standard test method for density absorption and voids in hardened concrete. ASTM International

[۴۷] FIB. The International Federation for Structural Concrete, (۲۰۰۰). FIB Bulletin No. ۱۰: Bond of reinforcement in concrete. Lausanne, Switzerland, ۴۳۴.

G., & Morón, A. (۲۰۱۹). Inductive method for the orientation of steel fibers in recycled mortars. Construction and building materials, ۲۲۲, ۲۵۳-۲۶۳

[۳۱] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (۲۰۱۸). Alternating magnetic field effect on fine-aggregate steel chip-reinforced concrete properties. J. Mater. Civ. Eng, ۳۰(۶), ۰۴۰۱۸۰۸۷

[۳۲] Xue, W., Chen, J., Xie, F., & Feng, B. (۲۰۱۸). Orientation of steel fibers in magnetically driven concrete and mortar. Materials, ۱۱(۱), ۱۷۰

[۳۳] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (۲۰۱۷). Alternating magnetic field effect on fine-aggregate concrete compressive strength. Construction and Building Materials, ۱۳۴, ۹۰-۸۳

[۳۴] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (۲۰۱۷). Magneto-electric control of scaled-down reinforced concrete beams. ACI Structural Journal, ۱۱۴(۱), ۲۴۴-۲۳۳

[۳۵] Rezaifar, O., Abavisani, I., & Kheyroddin, A. (۲۰۱۷). Magneto-electric active control of scaled-down reinforced concrete columns. ACI Struct J, ۱۱۴(۵), ۱۳۶۲-۱۳۵۱

[۳۶] Chen, J., Wang, J., & Jin, W. L. (۲۰۱۶). Study of magnetically driven concrete. Construction and Building Materials, ۱۲۱, ۵۹-۵۳

[۳۷] Soto-Bernal, J. J., Gonzalez-Mota, R., Rosales-Candelas, I., & Ortiz-Lozano, J. A. (۲۰۱۵). Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes. Advances in Materials Science and Engineering, (۱), ۹۳۴۱۹۵

[۳۸] Zieliński, M. (۲۰۱۵). Influence of constant magnetic field on the properties of waste phosphogypsum and fly ash composites. Construction and Building Materials, ۸۹, ۲۴-۱۳

[۳۹] ASTM C ۱۵۰/ C۱۵۰M-۱۹a. (۲۰۱۹). Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[۴۰] ASTM C ۳۳/ C۳۳M-۱۸. (۲۰۱۸). Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM

Effect of different magnetic field intensities on the corrosion of steel rebar embedded in concrete incorporating silica fume, exposed to corrosive environment

Fakhri Javahershenas

Ph.D. Student in Structural Eng., Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Malek Mohammad Ranjbar *

Prof. in Structural Eng., Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Morteza Sohrabi Gilani

Ph.D., Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Mohammad Hajforoush

Postdoctoral in Structural Eng., Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

Since direct application of a magnetic field to fresh concrete improves its engineering properties, magnetic treatment is also expected to enhance the durability of concrete in a corrosive environment. Given the limited research on steel rebar corrosion rates in magnetically treated concrete, this study investigates the effects of different magnetic field intensities (0.5, 0.8, and 1 T) on the mechanical properties and durability of concrete containing 5% and 10% silica fume. Furthermore, the microstructure of magnetically treated concrete was evaluated using Scanning Electron Microscopy (SEM) images. The results demonstrated that applying a 1 T magnetic field to concrete incorporating 10% silica fume reduced embedded steel rebar corrosion by up to 17%. In addition, compressive strength of concrete exposed to magnetic field of 1 T increased by about 24%. Additionally, final water absorption and porosity of the concrete decreased by up to 14% and 18%, respectively. The SEM analysis revealed that magnetic field exposure affects the hydration process of cement materials, increasing the amount of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel.

Keywords: Magnetic field, Concrete, Silica fume, Rebar corrosion, SEM.

* Corresponding Author: ranjbar@guilan.ac.ir

