

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خصوصیات بتن حاوی الیاف فولادی و سنگ‌دانه مگنتیت

محمد حج فروش

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

رحمت مدن دوست*

استاد گروه سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

صابر دیلمی

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

چکیده

هدف از ارائه مقاله حاضر بررسی اثر اعمال مستقیم میدان مغناطیسی با شدت ۰/۵ تسلا به بتن تازه حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی و سنگ‌دانه مگنتیت با مقادیر ۵۰ و ۱۰۰ درصد به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه معمولی در بتن است. خواص مقاومتی بتن توسط آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری و خمشی در سن ۲۸ روز و مشخصه ریزساختار بتن به کمک تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی ارزیابی شد. همچنین به منظور بررسی جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در بتن تحت میدان مغناطیسی از تصویربرداری با اشعه ایکس استفاده گردید. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی به بتن حاوی ۵۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت موجب افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی آن به ترتیب تا ۱۰/۷ و ۱۷/۷ درصد شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص نمود که اعمال میدان مغناطیسی به بتن موجب تراکم ریزساختار خمیر سیمان شده و میزان تخلخل بتن را کاهش می‌دهد. نتایج تصویربرداری با اشعه ایکس از نمونه‌های بتن الیافی نیز نشان داد که الیاف‌های فولادی در بتن تحت میدان مغناطیسی می‌توانند به نحو مطلوبی در راستای شار مغناطیسی جهت‌گیری شوند.

واژه‌های کلیدی: میدان مغناطیسی، بتن، الیاف فولادی، سنگ‌دانه مگنتیت، میکروسکوپ الکترونی، اشعه ایکس.

* نویسنده مسئول: rmadandoust@yahoo.com

۱- مقدمه

تغییرات حجمی، استفاده از الیاف فولادی در بتن می‌تواند در افزایش یکپارچگی آن موثر باشد. از جمله راهکارهای مناسب جهت افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری بتن استفاده از الیاف‌های فولادی به دلیل دارا بودن نسبت مقاومت به وزن بالا می‌باشد [۵]. به کارگیری الیاف فولادی در بتن موجب افزایش مقاومت کششی، افزایش جذب انرژی، افزایش مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای، افزایش مقاومت خستگی و همچنین ایجاد قابلیت باربری پس از ترک خوردگی بتن می‌شود [۹-۶]. توزیع پراکنده الیاف‌های فولادی در بتن بهره‌وری آن‌ها را در برابر افزایش مقاومت کششی بتن کاهش می‌دهد [۱۰]. از طرفی با جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در راستای تنش‌های کششی و یا عمود بر صفحه ترک خوردگی می‌توان جذب انرژی بتن را نسبت به توزیع تصادفی افزایش داد [۱۱]. محققان مختلف نشان داده‌اند که میدان مغناطیسی می‌تواند گزینه مناسبی برای جهت‌دهی الیاف‌های فولادی در راستای مورد نظر در بتن باشد تا از این طریق مقاومت مورد انتظار بتن تغییر یابد [۱۳ و ۱۲].

از راهکارهای نوین جهت افزایش تراکم ریزساختار بتن و متعاقباً ارتقای خواص مکانیکی بتن اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به آن در حالت تازه بلافاصله پس از قالب‌گیری می‌باشد [۲۰-۱۴]. سنگ‌دانه‌های مگنتیت و الیاف‌های فولادی دارای خاصیت فرومغناطیسی هستند و می‌توانند اثرپذیری بتن تحت میدان مغناطیسی را افزایش دهند.

حج فروش و همکاران [۲۱] خواص مکانیکی نمونه‌های بتن حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی را تحت میدان مغناطیسی یکنواخت ۰/۵ تسلا با استفاده از آزمون‌های مقاومت فشاری و مدول گسیختگی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که اعمال میدان مغناطیسی به بتن مقاومت‌های فشاری و خمشی آن را به ترتیب تا حدود ۱۸ و ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. آن‌ها گزارش کردند که میدان مغناطیسی می‌تواند بر ساختار و تراکم ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده^۱ 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 و میزان مشارکت الیاف‌های فولادی در باربری کششی بتن افزایش یابد.

از بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های با وزن مخصوص بالا مانند مگنتیت در ساخت سپرهای محافظتی در برابر تشعشع‌های موجود در محیط‌های نیروگاهی، صنعتی، پزشکی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مهم‌ترین مشخصه این گونه بتن‌ها نفوذناپذیری آن و ارتقای خواص مقاومتی و ریزساختاری فاز خمیرسیمان در بتن می‌باشد. از طرف دیگر با وجود سنگ‌دانه‌های سنگین با مقاومت بالا در بتن، علت افت مقاومت در این گونه بتن‌ها می‌تواند ضعف در خمیرسیمان و پیوستگی آن با سنگ‌دانه باشد. سنگ‌دانه‌های مگنتیت از ساختارهای طبیعی هستند که از ذرات معدنی به صورت کانی اکسید آهن تشکیل می‌گردند. یکی از ویژگی‌های برجسته سنگ‌دانه‌های مگنتیت رفتار مغناطیسی قوی آن‌ها است؛ به طوری که مغناطیسی‌ترین ماده معدنی طبیعی روی زمین است [۱]. سنگ‌دانه‌های مگنتیت دارای خاصیت فرومغناطیسی هستند. به این معنی که این سنگ‌دانه‌ها تحت میدان مغناطیسی می‌توانند از خود خاصیت مغناطیسی نشان دهند [۲]. در سال ۲۰۱۵ خصوصیات مکانیکی بتن حاوی سنگ‌دانه مگنتیت در معرض دماهای بالا توسط هرسزاروک و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۳]. آن‌ها دریافتند که استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان ۳۵ درصد در مقایسه با بتن معمولی می‌شود. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که نرخ کاهش مقاومت کششی بتن به دلیل افزایش دما در بتن‌های حاوی سنگ‌دانه مگنتیت تا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. ولی زاده و همکاران [۴] در مطالعه خود به بررسی اثر سنگ‌دانه مگنتیت بر خواص بتن خودتراکم و بتن ژئوپلیمر پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که نمونه‌های بتن حاوی سنگ‌دانه مگنتیت دارای مقاومت فشاری، کششی و خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی می‌باشد. همچنین استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت باعث کاهش جریان پذیری بتن می‌گردد؛ به طوری که با جایگزینی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه معمولی با سنگ‌دانه مگنتیت جریان اسلامپ به ترتیب تا ۲/۲، ۴/۷ و ۵ درصد کاهش یافت.

با توجه به اهمیت مقاومت کششی بتن حاوی سنگ‌دانه مگنتیت و متعاقباً به جهت جلوگیری از ریزترک‌های ناشی از بارگذاری و

^۱C-S-H gel

مغناطیسی بر خواص بتن حاوی مصالح مختلف انجام شده است. لیکن هیچگونه پژوهشی در خصوص بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن حاوی سنگ‌دانه‌های فرومغناطیسی مانند مگنتیت در حضور الیاف فولادی انجام پذیرفته است. مشاهده تأثیرات اندرکنش مصالح فرومغناطیس بکار رفته در بتن و میدان مغناطیسی و همچنین انجام مطالعات تکمیلی جهت بررسی مکانیزم این اثرات در بتن از نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌باشد. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۰/۵ تسلا بر خواص مکانیکی، ریزساختاری و پراکندگی توزیع الیاف‌های فولادی با درصد حجمی ۱ درصد در بتن می‌باشد. آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری و خمشی در سن ۲۸ روز صورت می‌گیرد. همچنین مشخصه ریزساختار بتن به کمک تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی بررسی می‌گردد. به منظور بررسی جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در نمونه‌های خمشی بتن تحت میدان مغناطیسی، نمونه‌ها قبل از آزمون خمش توسط اشعه ایکس تصویربرداری شدند و پس از آزمون با شکست نمونه‌ها جهت‌گیری الیاف‌ها داخل بتن مورد بررسی قرار گرفت.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش برای ساخت مخلوط‌های بتن الیافی از سیمان پرتلند تیپ ۲ با مشخصات فیزیکی و شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ استفاده شد. سنگ‌دانه‌های مصرفی بر اساس استاندارد ASTM C33 [۲۶] دانه‌بندی شدند. ماسه طبیعی رودخانه‌ای با حداکثر اندازه ۶ میلی‌متر و شن گوشه‌دار با حداکثر اندازه ۱۵ میلی‌متر به ترتیب به‌عنوان ریزدانه و درشت‌دانه مصرف شدند. از سنگ‌دانه مگنتیت با وزن مخصوص ظاهری ۴۱۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و با حداکثر اندازه ۱۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین نیمی و یا تمام شن مصرفی بر حسب حجم بتن استفاده گردید. این مقادیر بر اساس نتایج مطالعات پیشین [۴] انتخاب شده است. شکل ۱ تصویر سنگ‌دانه مگنتیت مصرفی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. فوق روان‌کننده مطابق با استاندارد ASTM C494 [۲۷] و بر پایه کربوکسیلات به میزان ۱ درصد وزنی سیمان استفاده شد که چگالی و PH آن به ترتیب ۱۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و ۷/۰۵

احمد و منار [۲۲] اثر میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌تسلا را بر خصوصیات بتن تازه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سن ۲۸ روز تا ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. همچنین اعمال شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی به بتن مقاومت کششی بتن را تا ۱۴ درصد و مدول گسیختگی را تا ۲۹ درصد افزایش می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که بیشترین افزایش مقاومت فشاری با استفاده از اعمال میدان مغناطیسی با شدت ۵۰۰ میلی‌تسلا به دست آمد. حج فروش و همکاران [۲۳] در پژوهش دیگری با استفاده از آزمون بیرون کشیدگی میلگرد تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی الیاف فولادی را بررسی نمودند. در این پژوهش نمونه‌های بتن حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی در حالت تازه به مدت ۲ دقیقه تحت میدان مغناطیسی قرار گرفتند. طبق نتایج آزمایش گسیختگی تمامی نمونه‌های بتن از نوع لغزش میلگرد بود و اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن مقاومت پیوستگی میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر را به ترتیب تا ۸۳ و ۵۱ درصد افزایش داد. در راستای اثر اعمال میدان مغناطیسی بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن، طاهری و همکاران [۲۴] این پدیده را در بتن حاوی سنگ‌دانه‌های کوارتز با کمک آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد بررسی نمودند و دریافتند که اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن مقاومت پیوستگی را تا حدود ۷۳ درصد افزایش می‌دهد. همچنین اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۲۳ درصد افزایش داد. علاوه بر این نسبت تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی سنگ‌دانه کوارتز تا حدود ۵۷ درصد افزایش یافت.

رضائی‌فر و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۴ به بررسی تأثیر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت به خواص مکانیکی بتن حاوی ۱۰ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که میدان مغناطیسی مقاومت فشاری بتن حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی را به ترتیب تا حدود ۱۵۲ و ۱۱۴ درصد در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه افزایش می‌دهد.

۲- اهمیت تحقیق

در مطالعات پیشین تحقیقات مختلفی در ارتباط با اثر میدان

می باشد. فوق روان کننده مصرفی فاقد یون های کلراید است و ارائه گردیده است. مقدار الیاف مصرفی در مخلوط بتن بر اساس خواص نهایی بتن الیافی را تغییر نمی دهد. الیاف های فولادی از دو نوع دو انتها قلاب دار و ساده بوده که مشخصات آن ها در جدول ۲ مطالعات پیشین [۲۸] انتخاب گردید.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

مشخصات فیزیکی							
چگالی (g/cm ³)	سطح مخصوص بلین (cm ² /g)	زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)				
۳/۱۵	۳۰۵۵	۱۶۵	۲۲۵				
مشخصات شیمیایی							
Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۰/۲۵	۰/۵۱	۰/۸۵	۰/۸	۶۴/۸۶	۳/۹۵	۴/۸۵	۲۲/۴۵

جدول ۳ ارائه شده است. نسبت آب به سیمان مؤثر برای مخلوط های بتن الیافی برابر با ۰/۳۵ انتخاب گردید. روش ساخت و عمل آوری نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM C192 [۲۹] انجام شد. بر این اساس در ابتدا یک سوم ریزدانه و درشت دانه با یک سوم آب اختلاط به میکسر اضافه شد. سیمان و آب باقی مانده به تدریج به مخلوط بتن اضافه شد. در انتها فوق روان کننده و الیاف فولادی 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، نمونه های بتن در قالب های پلاستیکی نمونه گیری شدند. نمونه های بتن بلافاصله پس از قالب گیری به مدت ۲ دقیقه تحت میدان مغناطیسی با شدت ۰/۵ تسلا قرار گرفتند. طبق مطالعات پیشین جواهرشناس و همکاران [۳۰] مدت زمان ۲ دقیقه و رضایی فر و همکاران [۲۰] شدت میدان ۰/۵ تسلا را پیشنهاد دادند. نمونه های بتن در دمای ۲۲-۲۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت به وسیله گونی خیس پوشانده شدند و سپس از قالب ها خارج شده و تحت شرایط مرطوب تا سن آزمایش (۲۸ روز) نگهداری شدند.



شکل ۱- سنگ دانه مگنتیت مصرفی

جدول ۲- مشخصات الیاف فولادی مصرفی در پژوهش

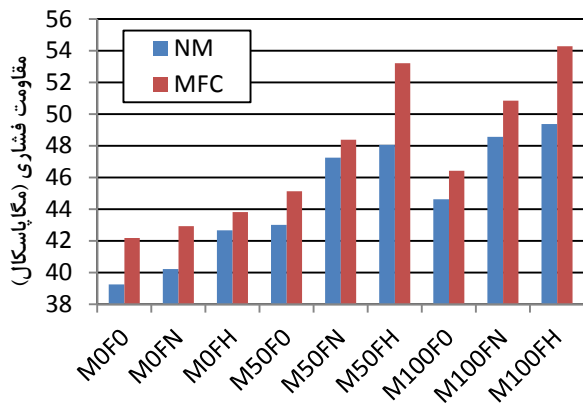
طول (mm)	قطر (mm)	نسبت ابعادی (l/d)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (g/cm ³)
۳۵	۰/۸	۴۳/۷۵	۲۱۰	۱۳۵۰	۷/۸۵

۳-۲- طرح اختلاط بتن و آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش مخلوط های بتن الیافی برای مقاومت فشاری هدف ۳۵ مگاپاسکال طرح شدند که جزئیات طرح اختلاط آن ها در

جدول ۳- طرح اختلاط بتن بر حسب (kg/m³)

الیاف فولادی	فوق روان کننده	ریزدانه	درشت دانه		آب	سیمان
			معمولی	مگنتیت		
۱۱۷/۷۵	۴/۵	۸۰۲	۸۹۰	۰	۱۵۷/۵	۴۵۰
			۴۴۵	۶۹۰		
			۰	۱۳۸۰		



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روز

۴-۲- مقاومت خمشی بتن

مقاومت خمشی نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روز حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی و ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت در دو حالت بدون مغناطیس و تحت میدان مغناطیسی با شدت ۰/۵ تسلا در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است، نمونه‌های بتن تازه مغناطیسی شده دارای مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون مغناطیس هستند. بر این اساس مقاومت خمشی بتن مغناطیسی با سنگ‌دانه معمولی ۴/۵ درصد افزایش یافته است. به علاوه اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن حاوی الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت خمشی تا ۴ درصد می‌گردد. این نرخ افزایش هنگام استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت به عنوان جایگزین سنگ‌دانه معمولی در بتن به ترتیب ۱۷/۷ و ۹/۷ درصد نتیجه شده است. حضور سنگ‌دانه مگنتیت در بتن سبب تاثیرپذیری بیشتر نمونه تحت میدان مغناطیسی شده که در نتیجه سبب می‌شود بتن مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان دهد. به علاوه نتایج تصویربرداری اشعه ایکس از نمونه‌های بتن الیافی نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی سبب جهت‌گیری مطلوب الیاف‌ها در بتن می‌گردد که این امر سبب می‌شود الیاف‌ها در باربری کششی بتن مشارکت بیشتری داشته باشند و در نتیجه مقاومت خمشی بتن افزایش یابد. نتایج تصویربرداری با اشعه ایکس و جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در نمونه‌های خمشی بتن تحت میدان مغناطیسی و همچنین موقعیت الیاف‌ها پس از شکست نمونه بتن به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است که انطباق خوبی با نتایج آزمایش مو و همکاران [13] نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل ۶ مشخص می‌گردد، اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های

مغناطیسی به میزان ۷/۵ درصد افزایش یافت. همچنین مقاومت فشاری بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی نسبت به بتن الیافی بدون مغناطیس ۶/۷ درصد افزایش می‌یابد.



الف) نمونه مکعبی بتن تحت میدان مغناطیسی



ب) نمونه منشوری بتن تحت میدان مغناطیسی

شکل ۳- فرایند مغناطیسی کردن نمونه‌های مکعبی و منشوری

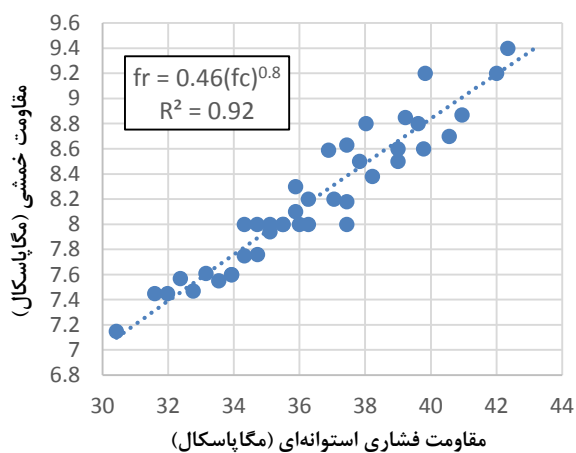
استفاده از الیاف دو انتها قلاب‌دار در بتن موجب افزایش پیوستگی و در نتیجه مقاومت فشاری بیشتر بتن می‌گردد. این نرخ افزایش مقاومت فشاری تحت میدان مغناطیسی برای نمونه‌های بتن حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت به ترتیب ۱۰/۷ و ۹/۹ درصد نتیجه شد. میدان مغناطیسی موجب می‌شود که ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد که این موضوع سبب ارتقای مقاومت مکانیکی بتن تحت میدان مغناطیسی می‌شود. تفسیری که با توجه به نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی ارائه شده در بخش ۴-۳ مقاله حاضر و بر اساس مطالعات رضایی فر و همکاران [۲۵] قابل استنتاج می‌باشد. به علاوه استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت در بتن سبب می‌شود که تاثیرپذیری نمونه تحت میدان مغناطیسی افزایش یابد چرا که سنگ‌دانه مگنتیت دارای خاصیت فرومغناطیسی می‌باشد که تحت میدان مغناطیسی می‌تواند خاصیت مغناطیسی نشان دهد و سبب پیوستگی و تراکم بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن گردد. در شکل ۴ حرف N نماد الیاف ساده و حرف H نماد الیاف دو انتها قلاب‌دار می‌باشد. همچنین حرف M نشان‌دهنده سنگ‌دانه مگنتیت می‌باشد.

نتایج مقاومت فشاری بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی با مقاومت خمشی آن‌ها برقرار می‌باشد.



الف) بتن غیرمغناطیسی ب) بتن مغناطیسی

شکل ۷- جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در بتن‌های غیرمغناطیسی و مغناطیسی پس از شکست نمونه

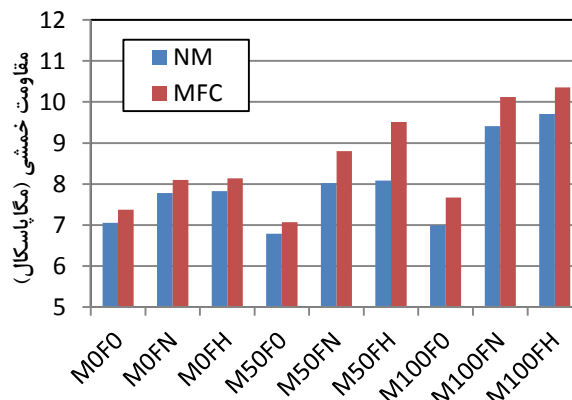


شکل ۸- نمودار مقاومت خمشی بر حسب مقاومت فشاری نمونه‌های بتن تحت میدان مغناطیسی

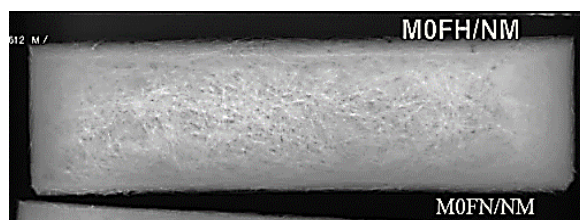
۴-۳- ریزساختار بتن

شکل ۹ وضعیت ریزساختار بتن‌های غیرمغناطیسی و مغناطیسی را توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب می‌گردد که ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد. به نحوی که میزان حفرات در ساختار بتن کاهش می‌یابد. نتیجه‌ای که توسط سوتورنال و همکاران [۱۸] بر روی خمیر

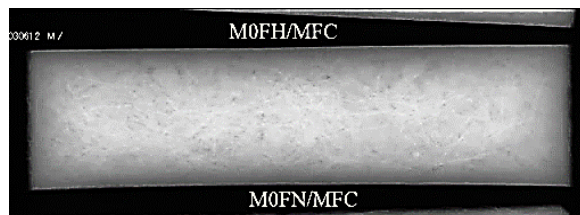
بتن تازه موجب می‌شود از توزیع پراکنده و تصادفی الیاف‌های فولادی در بتن کاسته شده و جهت‌گیری الیاف‌ها در راستای شار مغناطیسی رفتار بتن را به حالت ارتوتروپیک تغییر دهد. لذا انتظار می‌رود مقاومت مورد نیاز بتن در راستاهای مختلف متفاوت باشد. این موضوع می‌تواند بهره‌وری حضور الیاف در بتن را افزایش دهد و مخصوصاً برای بتن‌های پیش‌ساخته از اهمیت بالایی برخوردار باشد.



شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روز



الف) بتن غیرمغناطیسی



ب) بتن مغناطیسی

شکل ۶- تصاویر اشعه ایکس نمونه‌های خمشی بتن الیافی

شکل ۸ میزان تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های بتن تحت میدان مغناطیسی را بر حسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری مکعبی نمونه‌های بتن ابتدا توسط ضرائب مناسب طبق آیین نامه ACI [۳۳] به مقاومت مشخصه آن‌ها روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد تبدیل شدند و سپس میزان تغییرات مقاومت خمشی بر اساس آن‌ها سنجیده شده است. همان گونه که از شکل ۸ مشاهده می‌گردد، ارتباط خوبی بین

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر به بررسی اثرات میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۰/۵ تسلا بر مقاومت‌های فشاری و خمشی و همچنین ریزساختار بتن حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به همراه ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه معمولی پرداخته شد که نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد:

- اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب گردید که مقاومت‌های فشاری و خمشی آن در سن ۲۸ روز به ترتیب تا حدود ۴/۵ و ۷/۵ درصد افزایش یابد.

- مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌های بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی به ترتیب تا ۶/۷ و ۴ درصد بیشتر از نمونه‌های مشابه بدون مغناطیس گردید.

- اعمال میدان مغناطیسی به بتن حاوی ۵۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت موجب گردید که مقاومت‌های فشاری و خمشی آن در سن ۲۸ روز به ترتیب تا حدود ۱۰/۷ و ۱۷/۷ درصد افزایش یابد.

- مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت تحت میدان مغناطیسی به ترتیب تا ۹/۹ و ۹/۷ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون مغناطیس است.

- تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی مشخص کرد که اعمال میدان مغناطیسی به بتن موجب تراکم ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده می‌گردد و میزان تخلخل بتن را کاهش می‌دهد.

- نتایج تصویربرداری با اشعه ایکس از نمونه‌های بتن الیافی نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی سبب جهت‌گیری الیاف‌های فولادی در بتن می‌گردد که این امر سبب می‌شود الیاف‌ها در جهت شار مغناطیسی به خط شده و مشارکت بالاتری در کنترل تنش‌های کششی بتن ایجاد نمایند.

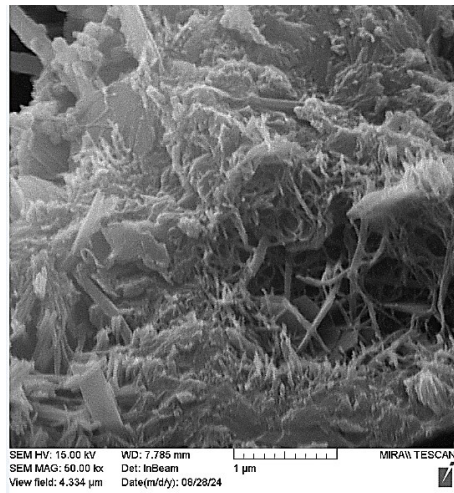
تقدیر و تشکر

نویسندگان از مجموعه مدیریت و پرسنل محترم شرکت بتن نوین شعاع شرق ارم در خصوص همکاری‌ها و حمایت‌های انجام شده و همچنین کارمندان آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشکده فنی دانشگاه گیلان جهت اجرای کار تحقیقاتی حاضر تشکر و قدردانی می‌نمایند.

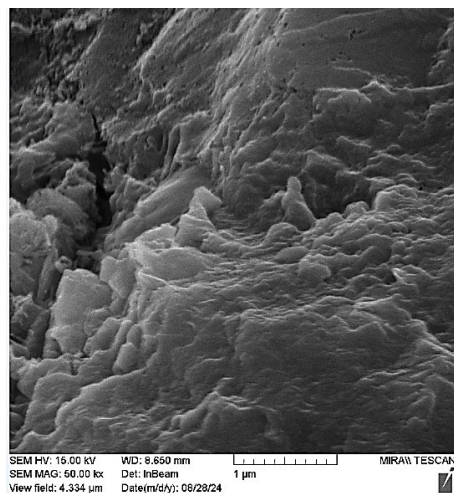
۶- مراجع

[1] de Lacheisserie, E.D.T., Gignoux, D.,

سیمان نیز گزارش شده بود. به دنبال این موضوع مقاومت مکانیکی بتن تحت میدان مغناطیسی ارتقا می‌یابد. میدان مغناطیسی با افزایش فازهای کریستالی موجب می‌گردد که فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان افزایش یابد. با اعمال میدان مغناطیسی به نمونه بتن از میزان کلسیم هیدروکسید تولیدی در فرایند هیدراتاسیون سیمان کاسته شده و بر میزان ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده افزوده می‌شود. بنابراین مقدار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده در ساختار سیمان افزایش می‌یابد. همانگونه که در شکل ۹ مشخص است برای نمونه بتن غیرمغناطیسی حضور کریستال‌های فعال نشده موجب می‌گردد که فضای خالی در میان ذرات سیمان ایجاد گردد. در صورتی که برای نمونه بتن مغناطیسی فضای ریزساختاری تراکم‌تری دیده می‌شود.



الف) بتن غیرمغناطیسی



ب) بتن مغناطیسی

شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی بتن‌های غیرمغناطیسی و مغناطیسی شده

- Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field. *Constr. Build. Mater.* 2017; 131: 309-316.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., Rezaifar, O., Kazemi, M., Magnetic field effect on bond performance between reinforcement and concrete containing steel fibers. *Journal of Building Engineering.* 98, 2024; 111215.
- [18] 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.
- [19] Abavisani, I., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A., Magneto-electric control of scaled-down reinforced concrete beams. *ACI Struct. J.* 2017; 114: 233-244.
- [20] Rezaifar, O., Abavisani, I., & Kheyroddin, A., Magneto-electric active control of scaled down reinforced concrete columns. *ACI Struct. J.* 2017; 114: 1351-1362.
- [21] Hajforoush, M., Kheyroddin, A., & Rezaifar, O., Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field, *Construction and Building Materials* 252 (2020).
- [22] Ahmed, S.M., & Manar, D.F., Effect of static magnetic field treatment on fresh concrete and water reduction potential, *Case Studies in Construction Materials* 14 (2021) e00535.
- [۲۳] حج فروش، محمد، خیرالدین، علی، رضائی فر، امید، اثر میدان مغناطیسی بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی الیاف فولادی با استفاده از آزمون بیرون کشیدگی میلگرد، *مجله علمی پژوهشی تحقیقات بتن، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۹.*
- [۲۴] طاهری، مجید، رضایی فر، امید، خیرالدین، علی، تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی سنگ‌دانه‌های کوارتز با بهره‌گیری از آزمایش Pullout، *مجله علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت* ۱۹ (۱۴۰۱) ۱۷۴-
- Schlenker, & M., *Magnetism*, Springer Science & Business Media 2005.
- [2] Harrison, R.J., Dunin-Borkowski, R.E., & Putnis, A., Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(26) (2002) 16556-16561.
- [3] Horszczaruk, E., Sikora, P., & Zaporowski, P., Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature, *Procedia Engineering* 108 (2015) 39-46.
- [4] Valizadeh, A., Aslani, F., Asif, Z., Roso, M., Development of heavyweight self-compacting concrete and ambient-cured heavyweight geopolymer concrete using magnetite aggregates, *Materials* 12(7) (2019) 1035.
- [5] Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Ghavidel, R., & Shahabi, S. F. (2015). Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials & Design*, 83, 284-294.
- [6] Sadrmohtazi, A., & Tahmouresi, B. (2017). Effect of fiber on mechanical properties and toughness of self-compacting concrete exposed to high temperatures. *AUT Journal of Civil Engineering*, 1(2), 153-166.
- [7] Sadrmohtazi, A., & Rad, S. K. (2024). Investigating the fracture parameters of lightweight geopolymer concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 129, 104223.
- [8] Mousavinejad, S. H. G., & Gashti, M. F. (2021). Effects of alkaline solution to binder ratio on fracture parameters of steel fiber reinforced heavy weight geopolymer concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 113, 102967.
- [9] Mousavinejad, S. H. G., & Sammak, M. (2022). An assessment of the fracture parameters of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete (UHPFRGC): The application of work of fracture and size effect methods. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117, 103157.
- [10] Du, J., Tang, C., Jia, B., Zhang, D., & Miao, Q., Preparation and long-term stability study of steel fiber/graphite conductive concrete. *Key Eng. Mater.* 2016; 680: 361-364.
- [11] Shahir Liew, M., Nguyen-Tri, P., Nguyen, T.A., & Kakooei, S., *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier, 2019; 215-239.
- [12] Wijffels, M.J.H., Wolfs, R.J.M., Suiker, A.S.J., & Salet, T.A.M., Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behavior. *Cem. Concr. Compos.* 2017; 80: 342-355.
- [13] Mu, R., Li, H., Qing, L., Lin, J., & Zhao, Q.,

- [25] Rezaifar, O., Ghanepour, M., & Amini, M.M., "A novel magnetic approach to improve compressive strength and magnetization of concrete containing nano silica and steel fibers." *Journal of Building Engineering* 91 (2024): 109342.
- [26] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [27] 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.
- [28] Song, PS., Hwang, S., Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 2004; 18(9): 669-673.
- [29] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken. PA, USA, 2018.
- [30] Javahershenas, F., Sohrabi Gilani, M., Hajforoush, M., Effect of magnetic field exposure time on mechanical and microstructure properties of steel fiber-reinforced concrete (SFRC), *Journal of Building Engineering* 35 (2021) 101975.
- [31] B.S. EN, Testing hardened concrete–Part 3: compressive strength of test specimens, British Standard Institution, London, UK (2009).
- [32] C. ASTM, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), American Society for Testing Materials, ASTM Michigan, United States, 2016.
- [33] ACI Committee 318-19., (2019), Building code requirements for structural concrete, USA: American Concrete Institute.

The effect of magnetic field on the properties of concrete containing steel fiber and magnetite aggregate

Mohammad Hajforoush

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

Rahmat Madandoust *

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

Saber Deilami

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

Abstract

The aim of the present paper was to evaluate the effect of applying a magnetic field of 0.5 Tesla directly to fresh concrete specimens with a steel fiber volume fraction of 1% and magnetite aggregates (50% and 100% by volume of conventional coarse aggregate) on the mechanical and microstructural properties of the concrete. For this purpose, compressive and flexural strengths tests were carried out on the concrete specimens at an age of 28-day. In addition, microstructure of concrete exposed to magnetic field was assessed via scanning electron microscopy (SEM) images. Following this, the distribution of steel fibers in concrete subjected to magnetic field was recognized by X-ray images. The results showed that the applying magnetic field to concrete specimens with 50% magnetite aggregate increased their compressive and flexural strengths up to 10.7% and 17.7%, respectively. The SEM analysis demonstrated that the structure of C-S-H gel in concrete exposed to magnetic field becomes denser and less porous. Furthermore, the X-ray images confirmed the uniformity of steel fiber distribution in the direction of magnetic flux, applied to concrete specimens.

Keywords: Magnetic field, Concrete, Steel fiber, Magnetite aggregate, SEM, X-ray image.

* Corresponding Author: rmadandoust@yahoo.com

