

اثر میدان مغناطیسی بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی الیاف فولادی با استفاده از آزمون بیرون کشیدن میلگرد

محمد حج فروش

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

علی خیرالدین *

استاد ممتاز گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

امید رضایی فر

دانشیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

در این پژوهش با بهره‌گیری از آزمون بیرون کشیدن میلگرد از داخل نمونه استوانه‌ای بتن حاوی ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن در شرایطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که نمونه‌های بتن در حالت تازه به مدت ۲ دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفتند. بدین منظور، یک دستگاه الکترومغناطیس با توانایی تولید میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۵۰۰۰ گوس طراحی و ساخته شد. در این پژوهش، نمونه استوانه‌ای استاندارد بتن با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و میلگرد با دو قطر مختلف شامل ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن بر مقاومت پیوستگی، آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری، کششی شکافت، خمشی و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی انجام شد. نتایج آزمون بیرون کشیدگی میلگرد نشان داد که گسیختگی همه نمونه‌ها از نوع لغزش میلگرد بود. اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب افزایش مقاومت پیوستگی تا بیش از ۸۳ و ۵۱ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر گردید. همچنین میزان طاقت نمونه‌های بتن تحت میدان مغناطیسی تا حدود ۸۲ و ۵۳ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت. میدان مغناطیسی در بهبود خواص مکانیکی بتن نیز موثر است. بر این اساس مقاومت فشاری بتن تحت میدان مغناطیسی به بیش از ۲۱ درصد افزایش یافت که این میزان در خصوص مقاومت‌های کششی و خمشی بتن به ترتیب تا حدود ۹ درصد و ۱۳ درصد تعیین گردید. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص کرد که اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن از طریق اثرگذاری بر فرایند هیدراتاسیون سیمان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت پیوستگی، آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد، میدان مغناطیسی یکنواخت، بتن الیافی، ریزساختار بتن.

۱- مقدمه

مصرفی در مخلوط بتن اثر نماید [۲۱-۲۰]. اعمال میدان مغناطیسی به آب موجب کاهش کشش سطحی آن می‌شود که در صورت به کارگیری در اختلاط بتن می‌تواند فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان را افزایش دهد که نتیجه چنین امری افزایش مقاومت مکانیکی بتن می‌باشد [۲۲].

تعداد محدودی از مطالعات پیشین نشان دادند که اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد [۲۹-۲۳]. حج فروش و همکاران [۲۳] 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^۴ تأثیر داشته باشد. همچنین جهت گیری الیاف‌های فولادی در راستای تنش کششی موجب شد تا بتن بتواند رفتار شکل پذیرتری 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 [۲۴]. 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 [۲۵] 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. سوتویرنال و همکاران [۲۷] 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.

تعداد محدودی از مطالعات در خصوص امکان‌سنجی استفاده از میدان مغناطیسی در بهبود رفتار سازه‌ای اعضای تیر و ستون بتن مسلح انجام گردید.

بر این اساس ابویسانی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۷ اثر اعمال میدان مغناطیسی را بر رفتار خمشی تیرهای مسلح با مقیاس کوچک

الیاف‌های فولادی به دلیل دارا بودن نسبت مقاومت کششی به وزن بالا به عنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب جهت افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بسیاری از محققان به این نتایج رسیدند که استفاده از الیاف فولادی در ساخت بتن موجب افزایش جذب انرژی، افزایش مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای، افزایش مقاومت خستگی و همچنین ایجاد قابلیت باربری پس از تر خوردگی بتن می‌شود [۷-۲]. از طرفی اضافه کردن الیاف فولادی به بتن می‌تواند موجب افزایش مقاومت پیوستگی میلگرد به بتن نیز شود که پیوستگی کافی از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۱۰-۸]. بر اساس دستورالعمل ACI 408R-03 [۱۱] گسیختگی پیوستگی بتن در دو حالت عمده رخ می‌دهد: بیرون کشیدگی میلگرد^۱ و شکافت بتن^۲ که این مدل‌های گسیختگی به شرایط محصورشدگی و نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد بستگی دارند. بر اساس مطالعات پیشین با افزایش قطر میلگرد، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن افزایش می‌یابد [۱۴-۱۲]. این نتیجه با مطالب ارائه شده در ACI 408R-03 [۱۱] که اشاره دارد با افزایش قطر میلگرد باید طول مهاری^۳ بیشتری برای آن تأمین نمود، در تعامل است. این موضوع همچنین در معادله ارائه شده توسط آیین‌نامه ACI 318-14 [۱۵] در خصوص افزایش طول مهاری میلگرد تحت کشش در بتن با افزایش قطر آن نیز اشاره شده است.

الیاف فولادی می‌تواند بر خواص بتن تازه و سخت شده تأثیرات فراوانی داشته باشد. توزیع پراکنده الیاف‌ها در بتن قابلیت آن‌ها را در برابر افزایش مقاومت کششی بتن کاهش می‌دهد [۱۶]. این در حالی است که با جهت گیری الیاف‌ها به موازات نیروی کششی و یا عمود بر صفحه ترک خوردگی می‌توان جذب انرژی بتن را نسبت به توزیع تصادفی افزایش داد [۱۷]. به عبارت دیگر الیاف‌های فولادی این قابلیت را دارند که با جهت گیری، رفتار بتن را در دو راستای مختلف تغییر دهند. بر این اساس تعدادی از مطالعات پیشین نشان دادند که میدان مغناطیسی می‌تواند برای جهت دهی الیاف‌های فولادی در فراورده‌های سیمانی گزینه مناسبی باشد [۱۸-۱۹]. میدان مغناطیسی همچنین می‌تواند بر آب

³ Development length

⁴ C-S-H gel

¹ Pull out

² Splitting

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 آن‌ها تا ۱۵ درصد گردید. رضائی‌فر و همکاران [۲۹] 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.

۲- اهمیت تحقیق

در مطالعات پیشین تحقیقات زیادی در رابطه با استفاده از آب مغناطیسی در اختلاط بتن گزارش شده است، لیکن تعداد پژوهش‌های انجام شده در خصوص اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن بسیار محدود است. به علاوه قسمت عمده این مطالعات نیز به بررسی خواص مکانیکی فرآورده‌های سیمانی در معرض میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. بر این اساس هیچ‌گونه پژوهشی در خصوص عملکرد پیوستگی بین میلگرد و بتن تحت میدان مغناطیسی انجام نپذیرفته است. پژوهش حاضر تلاشی است جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۵۰۰۰ گوس بر مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن حاوی ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی با در نظر گرفتن میلگرد در دو قطر مختلف شامل ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر. در ادامه این پژوهش، به منظور نتیجه‌گیری بهتر در مورد اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت پیوستگی بتن، مقاومت‌های فشاری، کششی شکافت و خمشی نمونه‌های بتن الیافی در سن ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین ریزساختار بتن تحت میدان مغناطیسی با کمک تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی بررسی گردید.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش برای ساخت مخلوط‌های بتن الیافی از سیمان پرتلند تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص بلین ۳۰۵۵ سانتی‌متر مربع بر گرم استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات الیاف فولادی

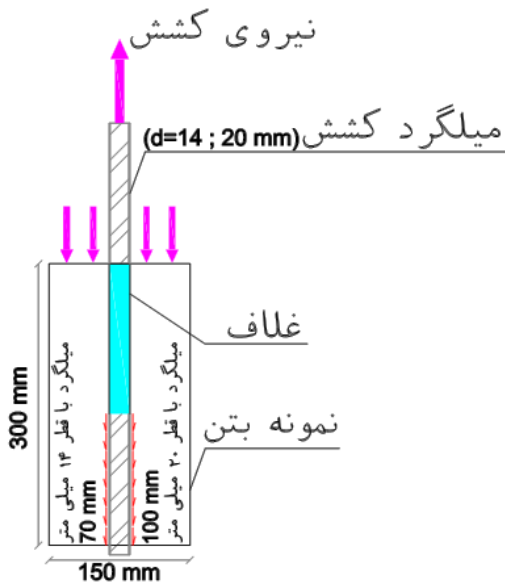
طول (mm)	قطر (mm)	نسب ابعادی (l/d)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m ³)
۵۰	۰/۸	۶۲/۵	۲۰۰	۹۵۰	۷۸۵۰

۳-۲- طرح اختلاط بتن و آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق مخلوط‌های بتن الیافی برای مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگاپاسکال طرح شدند که جزئیات طرح اختلاط آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نسبت آب به سیمان موثر برای مخلوط‌های بتن الیافی برابر با ۰/۴۵ انتخاب گردید. روش ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C192 [۳۴] 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 روان‌کننده 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، نمونه‌های بتن الیافی در قالب‌های پلاستیکی

۳-۴- روند انجام آزمایش‌ها

در این مطالعه اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت پیوستگی میلگرد به بتن حاوی ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی بر اساس استاندارد RILEM [۳۶] و در سن ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات نمونه بتن در آزمایش بیرون کشیدن میلگرد به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر شماتیک آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد

در این آزمایش بار کششی به طور مستقیم بر انتهای میلگرد وارد می شود تا گسیختگی برشی در ناحیه پیوستگی بتن و میلگرد ایجاد شود. نمونه بتن به صورت استوانه استاندارد با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی متر انتخاب شد. در این مطالعه میلگردهای آج دار با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی متر و با طول ۶۰۰ میلی متر برای آزمایش بیرون کشیدگی آماده شدند که در شکل ۳ مشاهده می گردد.



شکل ۳- تصویر میلگردهای کشش

طول پیوستگی میلگرد در بتن طبق استاندارد RILEM [۳۶] به میزان ۵ برابر قطر میلگرد در نظر گرفته شد و مابقی طول میلگرد

نمونه گیری شدند. نمونه های بتن در دمای ۲۰-۲۲ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت توسط گونی خیس پوشانده شدند و سپس از قالب ها خارج شده و تحت شرایط مرطوب تا سن آزمایش (۲۸ روز) نگهداری شدند.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط بتن الیافی (kg)

سیمان	آب	شن	ماسه	فوق الیاف	فولادی
۴۵۰	۲۰۲/۵	۸۹۰	۸۰۱	۴/۰۵	۱۱۷/۷۵

۳-۳- دستگاه الکترومغناطیس

تجهیزات الکترومغناطیس بکار رفته در این مطالعه شامل یک مدار مغناطیسی حامل جریان و یک منبع تغذیه جهت تولید جریان الکتریکی است که در شکل ۱ مشاهده می گردد. چگالی شار مغناطیسی در مرکز مدار توسط معادله (۱) محاسبه می گردد [۳۵]:

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

B = چگالی شار مغناطیسی (گوس)

μ = ضریب تراوایی مغناطیسی هسته (آمپر/گوس متر)

N = تعداد دورهای پیچ

I = جریان الکتریکی (آمپر)

R = شعاع پیچ (متر)

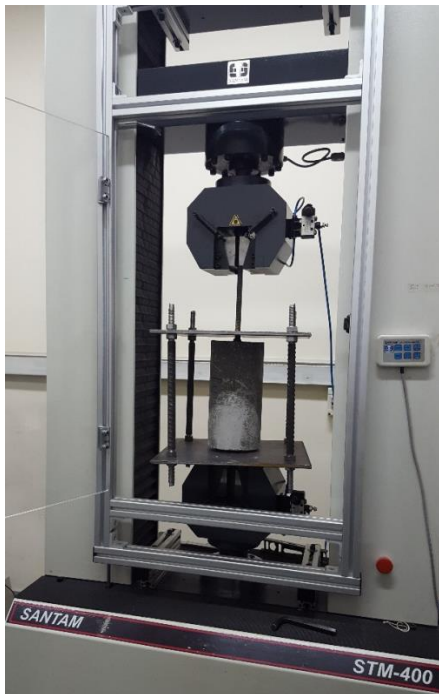
دستگاه مورد استفاده در این پژوهش قادر است تا جریان برق شهری را به میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۵۰۰۰ گوس تبدیل نماید. برای این منظور از یک منبع تغذیه با توان ۵۰۰ ولت آمپر استفاده شد. در نهایت، شدت میدان مغناطیسی تولیدی دستگاه به وسیله یک گوس متر دیجیتال اندازه گیری شد که در شکل ۱ مشاهده می گردد.



شکل ۱- دستگاه الکترومغناطیس مورد استفاده

¹ Bonded length

پیوستگی - لغزش برای نمونه‌های آزمایشگاهی ترسیم گردید. همچنین در این مطالعه اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت‌های فشاری، کششی شکافت و خمشی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز بررسی شد. برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. آزمایش مقاومت کششی شکافت روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و آزمایش مقاومت خمشی ۳ نقطه‌ای روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ۷۰×۷۰×۲۸۰ میلی‌متر و در یک دهانه ۲۵۰ میلی‌متری انجام شد. نمونه‌های بتن الیافی به دو دسته مغناطیسی شده و غیرمغناطیسی (شاهد) تفکیک شدند که برای نمونه‌های مغناطیسی، میدان بلافاصله پس از قالب‌گیری و به مدت ۲ دقیقه به بتن تازه اعمال شد.



شکل ۵- دستگاه آزمایش کشش میلگرد

شکل ۶ فرایند مغناطیسی کردن نمونه‌های بتن الیافی 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. فرایند مغناطیسی کردن نمونه‌ها برای آزمایش‌های مقاومت مکانیکی در شکل ۷ ارائه شده است. در انتها تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی با نمونه‌های شاهد که در معرض میدان مغناطیسی نبودند، مقایسه شدند.

توسط یک غلاف^۱ از بتن اطراف جدا گردید. بر این اساس طول مهار شده برای میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به ابعاد نمونه بتن و قطر میلگردهای تحت کشش، نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد برای میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۶۸ و ۶۵ محاسبه می‌گردد. میلگردها با دقت فراوان در وسط نمونه بتن جای‌گذاری شدند. تصویر نمونه‌های بتن برای آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه‌های بتن جهت آزمایش بیرون کشیدن میلگرد

در طول آزمایش، لغزش میلگرد در انتهای ناحیه پیوستگی و در طول ۱۰ میلی‌متری انتهایی میلگرد توسط یک ترانسفورماتور تفاضلی متغیر خطی^۲ 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^۳ میزان تغییر مکان را نشان می‌دهد. در این پژوهش 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 صفحه فلزی به همراه صفحات لاستیکی استفاده شد تا از توزیع یکنواخت بار به سطح بتن اطمینان حاصل شود. صفحات فلزی توسط چهار بولت با قطر 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.

از تقسیم بیشینه نیروی تحمل شده توسط بتن به سطح جانبی میلگرد، بیشینه تنش پیوستگی محاسبه شد و نمودار تنش

³ Data logger

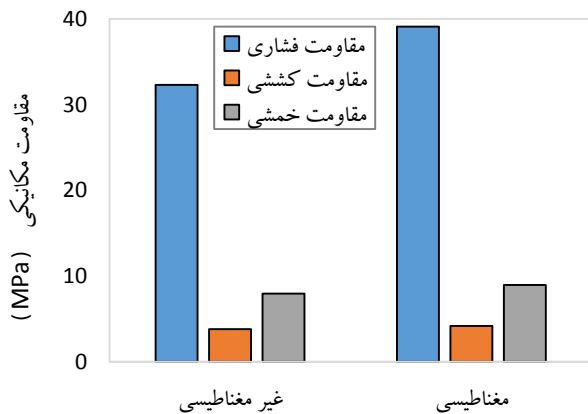
¹ PVC tube

² LVDT

۴- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

۴-۱- مقاومت مکانیکی بتن

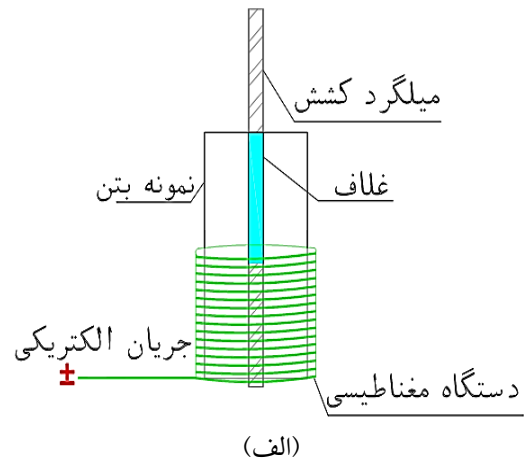
نتایج مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های بتن الیافی تحت تأثیر میدان مغناطیسی در سن ۲۸ روز در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مغناطیسه کردن نمونه‌های بتن تازه موجب بهبود خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود. بر این اساس، مقاومت فشاری بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی به میزان ۲۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین مقاومت کششی شکافت نمونه‌ها به میزان ۹/۵ درصد افزایش یافت. اعمال میدان مغناطیسی به مخلوط بتن تازه موجب شد که مقاومت خمشی نمونه‌های بتن الیافی به میزان ۱۲/۷ درصد افزایش یابد. نتیجه‌ای که توسط حج فروش و همکاران [۲۳] نیز گزارش شده بود. میدان مغناطیسی موجب می‌شود که ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد که این موضوع سبب می‌شود تا مقاومت مکانیکی بتن تحت میدان مغناطیسی ارتقا یابد. از طرفی جهت‌گیری الیاف‌های فولادی به موازات تنش کششی موجب بهبود عملکرد خمشی بتن می‌گردد.



شکل ۸- مقاومت‌های مکانیکی بتن الیافی در سن ۲۸ روز

۴-۲- مقاومت پیوستگی بتن

نمودارهای تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی متناظر با میلگردهای کشش با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب در اشکال ۹ و ۱۰ ارائه شده است که نتایج ارائه شده میانگین ۳ نمونه می‌باشد. روند این نمودارها به گونه‌ای است که تا حدود ۶۵ 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



(الف)



(ب)

شکل ۶- فرایند مغناطیسی کردن جهت آزمایش کشش میلگرد،

(الف) تصویر شماتیک، (ب) تصویر حقیقی



(الف)



(ب)

شکل ۷- فرایند مغناطیسی کردن جهت آزمایش خواص

مکانیکی، (الف) نمونه مکعبی، (ب) نمونه منشوری

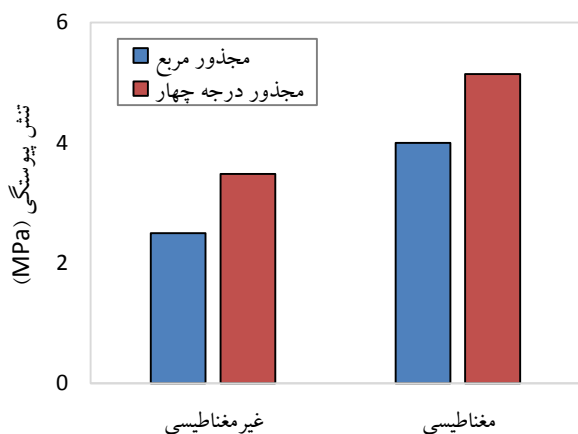
کنترل تغییر مکان^۱ استفاده گردید. بر این اساس در شاخه صعودی منحنی نیروی کششی مرتباً افزایش یافت و متناسب با آن میزان لغزش میلگرد اندازه‌گیری شد. همچنین در شاخه نزولی با افزایش تغییر مکان میزان نیرو قرائت گردید. پس از انجام آزمایش‌ها مشخص گردید که تمامی نمونه‌های بتن تحت نیروی کشش دچار گسیختگی از نوع لغزش میلگرد در بتن بدون شکافت شدند. اعمال میدان مغناطیسی به نمونه‌های بتن الیافی موجب گردید که مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن افزایش یابد. بر این اساس، بیشینه نیروی کششی برای نمونه‌های بتن مغناطیسی به میزان ۸۳/۱ درصد و ۵۰/۹ درصد مرتبط به میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت.

گارسیا نیز [۸] 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 [۱۱] و آیین‌نامه ACI 318-14 [۱۵] و به منظور حذف وابستگی مقاومت پیوستگی نمونه‌ها به مقاومت فشاری آن‌ها، مقدار نسبت تنش پیوستگی به مجذور مقاومت فشاری $(\frac{\tau_{max}}{\sqrt{f_c}})$ و همچنین نسبت تنش پیوستگی به مجذور مقاومت فشاری با فرجه چهار $(\frac{\tau_{max}}{\sqrt[4]{f_c}})$ به ترتیب در نمودارهای ۱۱ و ۱۲ متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر ارائه شده است. بر این اساس، نمونه‌های مغناطیسی برای هر دو 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 ۳۹ و ۲۸ درصد نتیجه شده است.

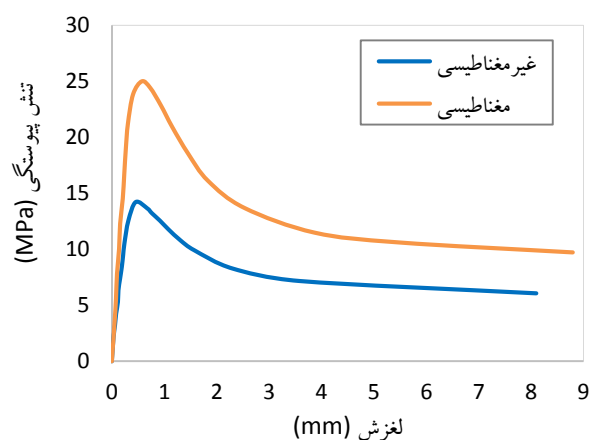
۴-۲-۱- محاسبه مقاومت پیوستگی بتن تحت میدان مغناطیسی بر اساس مقاومت فشاری و قطر میلگرد

رابطه ۲ میزان مقاومت پیوستگی بتن تحت میدان مغناطیسی را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و برازش آن‌ها ارائه می‌دهد. این رابطه سه متغیره، مقاومت پیوستگی بتن را بر اساس کیفیت بتن (مقاومت فشاری)، تنش کششی میلگرد (قطر میلگرد) و همچنین اثر محصورشوندگی (نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد) با یک ضریب همبستگی ۰/۹۳ تخمین می‌زند.

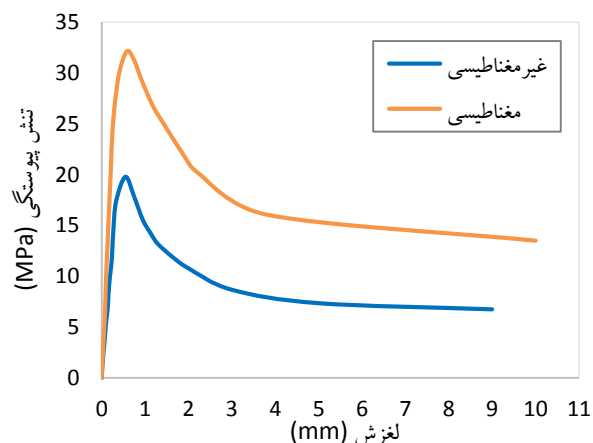
$$\tau_{max} = 45.51 - 3.62f_c + 0.074f_c^2 + 0.035d^2 + 0.23\frac{c}{d} \quad (2)$$



شکل ۱۱- نسبت بیشینه تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۱۴ میلی‌متر



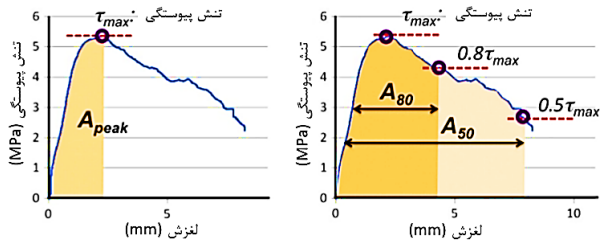
شکل ۹- نمودار تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۱۴ میلی‌متر



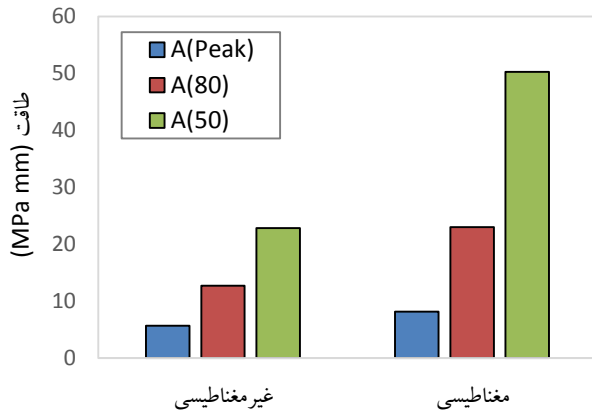
شکل ۱۰- نمودار تنش پیوستگی- لغزش نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر

همانگونه که از اشکال ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد، با افزایش قطر میلگرد مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد. نتیجه ای که توسط

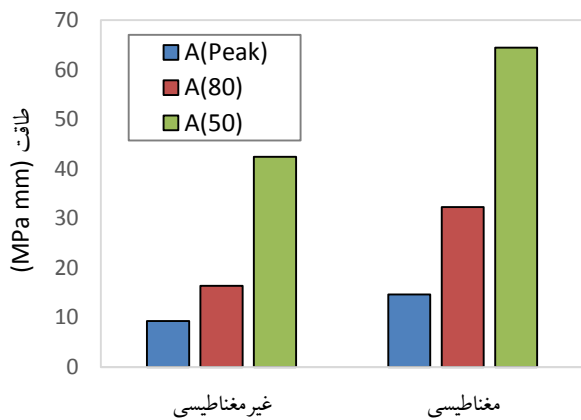
¹ Displacement control



شکل ۱۳- معرفی مولفه‌های طاقت [۸]



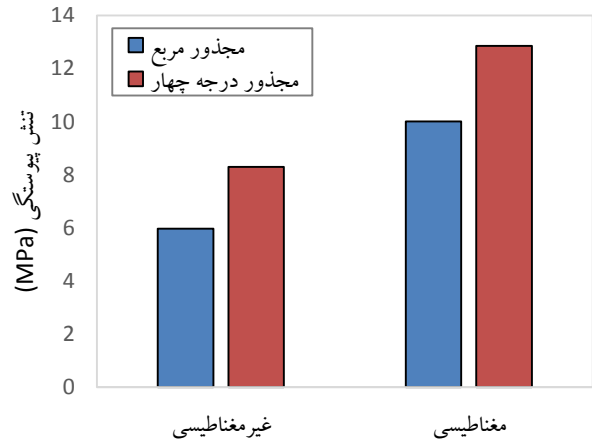
شکل ۱۴- مؤلفه‌های طاقت نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۱۴ میلی‌متر



شکل ۱۵- مؤلفه‌های طاقت نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر

۳-۴- ریزساختار بتن

تصاویر ۱۶ و ۱۷ به ترتیب وضعیت ریزساختار بتن غیرمغناطیسی و مغناطیسی را توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه موجب می‌گردد تا ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد. بنحویکه میزان حفرات در ساختار بتن کاهش



شکل ۱۲- نسبت بیشینه تنش پیوستگی به مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی برای میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر

بر این اساس، با افزایش قطر میلگرد و نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد. هرچه نسبت پوشش به قطر بیشتر شود، ترک‌های عرضی قابلیت گسترش نداشته و در نتیجه مقاومت پیوستگی ارتقا می‌یابد. از بین سه متغیر فوق‌الذکر، عامل مقاومت فشاری نمونه‌ها به عنوان اثرگذارترین عامل روی مقاومت پیوستگی بتن معرفی می‌گردد همان‌گونه که در مطالعات پیشین نیز ارائه شده است [۸]. در رابطه ۲، مقاومت‌های پیوستگی و فشاری بتن بر اساس مکاپاسکال و قطر میلگرد و میزان پوشش بتن بر اساس میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۲-۲- طاقت نمونه‌های بتن تحت نیروی بیرون کشیدگی

سطح زیر منحنی تنش پیوستگی- لغزش به‌عنوان مقدار طاقت سنجیده می‌شود. در پژوهش حاضر این مقدار توسط سه مولفه $A(Peak)$ ، $A(80)$ و $A(50)$ محاسبه گردید که به ترتیب نمایانگر سطح زیر منحنی از ابتدای بارگذاری تا نیروی نهایی، از ابتدای بارگذاری تا ۸۰ درصد نیروی نهایی در شاخه نزولی منحنی و از ابتدای بارگذاری تا ۵۰ درصد نیروی نهایی در شاخه نزولی منحنی می‌باشند. این موضوع در شکل ۱۳ نشان داده شده است. میزان طاقت نمونه‌های بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی برای میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب در اشکال ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. بر این اساس، میزان انرژی‌های ورودی و خروجی برای نمونه‌های مغناطیسی بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد که این میزان به‌طور متوسط برای میلگردهای با قطرهای ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب تا حدود ۸۲ و ۵۳ درصد رشد داشته است.

- با توجه به قطر میلگرد کشش، مقاومت پیوستگی بتن تحت میدان مغناطیسی تا حدود ۸۳ و ۵۱ درصد متناظر با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت.

- در پژوهش حاضر براساس نتایج آزمایشگاهی و برازش آن‌ها، یک معادله سه متغیره پیشنهاد شد که مقاومت پیوستگی بتن الیافی تحت میدان مغناطیسی را با دقت بالا و بر حسب سه مؤلفه مقاومت فشاری بتن، قطر میلگرد و پوشش بتن محاسبه می‌کند.

- میزان طاقت نمونه‌های بتن مغناطیسی در آزمون بیرون کشیدن میلگرد به ترتیب تا حدود ۸۲ و ۵۳ درصد مرتبط با میلگردهای با قطر ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت.

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

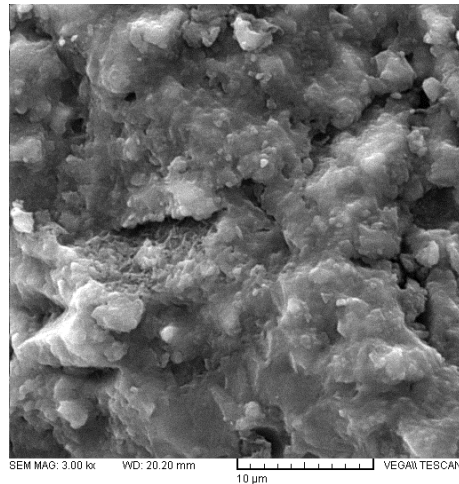
۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که بدین طریق از پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان در خصوص همکاری‌ها و حمایت‌های انجام گرفته جهت اجرای کار تحقیقاتی حاضر تشکر و قدردانی نمایند.

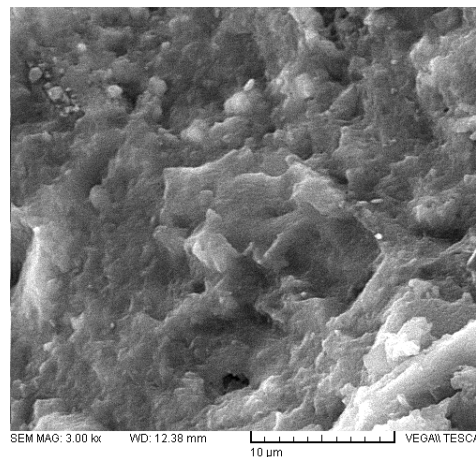
۷- مراجع

- [1] Saidani, M., Saraireh, D., Gerges, M. "Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture," Eng. Struct. (2016); 113: 328-334.
- [2] Karimipour, A., Ghalehnovi, M., de Brito, J., Attari, M. "The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete," Structures. (2020); 25:72-87.
- [3] Madandoust, R., Kazemi, M., Khakpour Talebi, P., de Brito, J. "Effect of the curing type on the mechanical properties of lightweight concrete with polypropylene and steel fibres," Constr. Build. Mater. (2019); 223: 1038-1052.
- [4] Ahmadi, M., Kheyroddin, A., Dalvand, A., Kioumars, M. "New empirical approach for determining nominal shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams," Constr. Build. Mater. (2020); 234: 117293.

می‌یابد. نتیجه‌ای که توسط سوتورنال و همکاران [۲۷] 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 ۱۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی بتن غیرمغناطیسی



شکل ۱۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی بتن مغناطیسی

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر مقاومت‌های مکانیکی و پیوستگی و همچنین ریزساختار بتن الیافی حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی پرداخته شد که نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشند:

- اعمال میدان مغناطیسی به بتن تازه الیافی موجب گردید که مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی آن در سن ۲۸ روز به ترتیب تا حدود ۲۱، ۹ و ۱۳ درصد افزایش یابد.

- Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications. Elsevier, (2019); 215-239.
- [18] 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.
- [19] Mu, R., Li, H., Qing, L., Lin, J., Zhao, Q. "Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field," *Constr. Build. Mater.* (2017); 131: 309-316.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A. "Alternating magnetic field effect on fine aggregate concrete compressive strength," *Constr. Build. Mater.* (2017); 134: 83-90.
- [27] 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.
- [28] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A. "Magneto-electric control of scaled-down reinforced concrete beams," *ACI Struct. J.* (2017); 114: 233-244.
- [5] Parvez, A., Foster, S.J. "Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams," *J. Struct. Eng.* (2015); 141: 04014117.
- [6] Kazemi, M., Kafi, M.A., Hajforoush, M., Kheyroddin, A. "Cyclic behaviour of steel ring filled with compressive plastic or concrete, installed in the concentric bracing system," *Asian J. Civ. Eng.* (2019); 1-11.
- [7] Kazemi, M., Hajforoush, M., Khakpour Talebi, P., Daneshfar, M., Shokrgozar, A., Jahandari, S., Saberian, M., Li, J. "In-situ strength estimation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and point load test," *J. Sustain. Cem. Based Mater.* (2020); 1-18.
- [8] Garcia Taengua, E., Martí Vargas, J.R., Serna, P. "Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.* 2016; 105: 275-84.
- [9] Mazaheripour, H.B., Barros, J.A., Sena Cruz, J.M., Pepe, M., Martinelli E. "Experimental study on bond performance of GFRP bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete," *Compos. Struct.* (2013); 95: 202-12.
- [10] Albitar, M., Visintin, P., Ali, M.M., Lavigne, O., Gamboa, E. "Bond slip models for uncorroded and corroded steel reinforcement in class-F fly ash geopolymer concrete," *J. Mater. Civil Eng.* (2017); 291: 04016186.
- [11] American Concrete Institute, ACI 408. Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. (ACI 408R-03) Farmington Hills, MI, USA, (2003).
- [12] 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.
- [13] Alhawati, M., Ashour, A. "Bond strength between corroded steel reinforcement and recycled aggregate concrete," *Structures* (2019); 19: 369-385.
- [14] Saleh, N., Ashour, A., Sheehan, T. "Bond between glass fibre reinforced polymer bars and high-strength concrete," *Structures* (2019); 22: 139-153.
- [15] ACI (American Concrete Institute), Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI 318-14, Farmington Hills, MI, USA, (2014).
- [16] 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.
- [17] Shahir Liew, M., Nguyen Tri, P., Nguyen, T.A., Kakooei, S. Smart Nanoconcretes and

- [29] Rezaifar, O., Abavisiani, I., Kheyroddin, A. "Magneto-electric active control of scaled down reinforced concrete columns," *ACI Struct. J.* (2017); 114: 1351-1362.
- [30] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
- [31] 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).
- [32] Song, P.S., Hwang, S. "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.* (2004); 18(9): 669-673.
- [33] ASTM A615. Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. (ASTM A615/615M-16), ASTM International, West Conshohocken PA, (2016).
- [34] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken. PA, USA, (2018).
- [35] Grant, I.S., Phillips, W.R. Electromagnetism. John Wiley & Sons, (2013).
- [36] 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.

The Effect of Magnetic Field on Bond Strength between Reinforcing Steel Bar and Steel Fiber Reinforced Concrete by means of Pull-out Test

Mohammad Hajforoush

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Ali Kheyroddin *

Distinguished Prof., Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Omid Rezaifar

Assoc. Prof., Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

In this research, the effect of applying magnetic field directly to steel fiber reinforced concrete specimens containing 1.5% volume of steel fiber on bond strength between reinforcing steel bar and concrete was experimentally investigated using a direct pull-out test. For this purpose, magnetic field was applied externally to the fresh specimens by means of an electromagnetic instrument, capable of causing the flux density of 5000 Gauss. In this study, the pull-out specimens were tested with two different bar diameters: 14 and 20 mm. The study also investigated, mechanical properties of the specimens in the terms of compressive, splitting tensile and flexural strengths at an age of 28 days. In addition, the microstructure of the specimens was analyzed by the SEM images. The experimental results demonstrated that the pull-out failure occurred for all the specimens. Furthermore, the bond strength of the specimens increased by about 83 and 51% correspond to the #14 and #20 rebars, respectively. In addition, toughness parameter of concrete exposed to magnetic field increased by 82 and 53% correspond to the #14 and #20 rebars, respectively. Applying magnetic field to fresh concrete caused an increase in its compressive strength more than 21%. Following this, splitting tensile and flexural strengths of concrete specimens were enhanced up to 9 and 13%, respectively. Magnetic field also has the ability to compact the microstructure of concrete.

Keywords: Bond strength, Pull-out test, Uniform magnetic field, Steel fiber reinforced concrete, Microstructure.

* Corresponding Author: kheyroddin@semnan.ac.ir