

چقرمگی و دوام بتن سنگ‌دانه بازیافتی ساخته شده با آب مغناطیسی

علی عبدالله یوسف

دانشجو دکترای مهندسی عمران - گرایش سازه - دانشگاه فردوسی مشهد.

محمد رضا اصفهانی *

استاد گروه آموزشی مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

چکیده

در این تحقیق، چقرمگی و دوام بتن با سنگ‌دانه بازیافتی و آب مغناطیسی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد و خواص مکانیکی نظیر مقاومت‌های فشاری و کششی بررسی می‌شود. متغیرها شامل تعداد چرخه‌های مختلف آب در میدان مغناطیسی، مقدارهای مختلف فوق روان‌کننده، الیاف فولادی و میکروسیلیس می‌باشند. در مجموع ۲۴۲ نمونه در ۱۱ طرح مختلف با و بدون الیاف، ساخته شد. لازم به ذکر است که نیمی از نمونه‌های ذکر شده دارای الیاف فولادی می‌باشند. نتایج اغلب آزمایش‌ها نشان داد که آب مغناطیسی با اینکه تأثیر زیادی در خواص مکانیکی بتن داشته اما نباید از آن به تنهایی به‌عنوان عامل جبران‌کننده نقص‌های ناشی از سنگ‌دانه‌های بازیافتی استفاده کرد. استفاده از افزودنی معدنی میکروسیلیس به همراه آب مغناطیسی، خواص بتن را به مقدار زیادی بهبود می‌بخشد. شاخص‌های چقرمگی توسط استانداردهای JSCE، ASTM C1018 و روش PCS و آزمایش دوام بتن توسط استاندارد BS EN 140:2003 انجام شد. بهترین نتایج چقرمگی بتن‌های دارای سنگ‌دانه بازیافتی، مربوط به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و الیاف فولادی بود. همچنین، آب مغناطیسی ده دور باعث افزایش دوام بتن سنگ‌دانه بازیافتی حدود ۲۵٪ در مقایسه با یک دور آن شد.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌دانه‌های بازیافتی، بتن بازیافتی، آب مغناطیسی، دوام، چرخه‌های ذوب و انجماد، چقرمگی، الیاف فولادی، میکروسیلیس.

۱- مقدمه

رئسی [۱۰] نتیجه گرفتند که در شدت‌های میدان مغناطیسی مختلف مورد مطالعه (۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ تسلا)، میدان مغناطیسی بیشترین تأثیر را در انتشار مولکول‌های آب و هیدراتاسیون ذرات سیمان در شدت میدان ۱/۲ تسلا دارد. همچنین، برای یک نسبت آب به سیمان و میزان جریان آب مشخص، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی با افزایش شدت میدان مغناطیسی به ۱/۲ تسلا افزایش می‌یابد. سو و همکاران [۱۱] نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی در ساخت بتن منجر به افزایش کارایی، مقاومت فشاری، بهبود نفوذپذیری بتن و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد شده است. همچنین، به این نتیجه رسیدند که استفاده از میدان‌های مغناطیسی ۰/۸، ۱/۲، ۱/۳۵ تسلا در تولید آب مغناطیسی منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن بین ۹٪ تا ۱۹٪ می‌گردد. فریس و همکاران [۱۲] با عبور آب از میدان‌های ۶۰۰ تا ۹۰۰۰ گوس با سرعت مشخص دریافتند که مقاومت فشاری بتن در بهترین حالت که تحت تأثیر بار مغناطیسی بیشینه بوده تا ۳۵٪ و مقاومت کششی بتن نیز تا ۲۰٪ افزایش یافته است. از طرف دیگر، بر اساس مطالعات سو و وو [۹]، بسته به شدت میدان مورد استفاده ۰/۸ تسلا و یا ۱/۲ تسلا، مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی بین ۱۵٪ تا ۲۰٪ افزایش پیدا می‌کند. ردی و همکاران [۱۳] آب را در داخل بشرهای آزمایشگاهی و روی آهنربایی با میدان ۹۸۵ گوس برای مدت زمان‌های ۱، ۲، ۲۴ و تا ۷۲ ساعت قرار داده و دریافتند که مدت زمان بیشتر از ۲۴ ساعت تأثیری در افزایش مقاومت ندارد و همچنین نمونه ساخته شده با آب مغناطیسی ۵۰٪ مقاومت بالاتری نسبت به بتن معمولی ساخته شده با آب معمولی از خود نشان می‌دهد. ردی و همکاران [۱۴] نتیجه گرفتند که کارایی بتن ساخته شده با آب مغناطیسی، بالاتر از بتن ساخته شده با آب معمولی است. مقدار جذب آب بتن ساخته شده با آب مغناطیسی، کمتر از نمونه مشابه با آب معمولی است. مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی به ترتیب می‌تواند ۵۰٪، ۱۸٪ و ۲۵٪ افزایش نسبت به آنهایی که با آب معمولی ساخته شدند، از خود نشان می‌دهند. شینر و همکاران [۱۵] با عبور آب از جریان مغناطیسی ۹۲۵۰ گوسی، تا ۲۲٪ افزایش در مقاومت فشاری بتن را مشاهده نمودند. منجوپری و مالادی [۱۶] با استفاده از آب عبور کرده از میدان مغناطیسی با بزرگی ۹۰۰۰ گوس، نشان دادند که تیر بتن مسلح دارای آب مغناطیسی، در مقایسه با همان

افزایش نرخ تخریب سازه‌های قدیمی معضلات جدیدی همچون کمبود مراکز دفن را به دنبال داشته است. یکی از پیشنهاد‌های نوین در خصوص حل بخشی از این معضلات، بازیافت نخاله‌های بتنی و استفاده مجدد از آن به عنوان مصالح سنگ‌دانه‌ای در تولید بتن است [۱، ۲]. از مزایای استفاده از بتن سنگ‌دانه بازیافتی می‌توان به تخریب کمتر محیط زیست، کاهش چشمگیر نیاز به محل دپوی مصالح و همچنین حفظ سنگدانه‌های طبیعی در محیط زیست اشاره کرد. از طرفی، سنگ‌دانه بازیافتی عملکرد مکانیکی و دوام کمتری نسبت به سنگ‌دانه طبیعی دارد، این امر سبب شده است که بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی خواص مکانیکی و دوام ضعیف تری نسبت به بتن معمولی داشته باشد [۱-۳]. کیوشی و همکاران [۴] با مطالعه ویژگی‌های مختلف بتن سنگدانه بازیافتی دریافتند که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی بجای سنگدانه طبیعی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن کاهش و انقباض ناشی از خشک‌شدگی بتن افزایش می‌یابد. شیائو و همکاران [۵] در بررسی بتن بازیافتی نشان دادند که ساختار بتن سنگ‌دانه بازیافتی اندکی پیچیده‌تر از بتن سنگ‌دانه معمولی می‌باشد زیرا این بتن دارای دو ناحیه انتقالی شامل ناحیه بین سنگدانه اصلی و ملات سیمان قدیمی و ناحیه انتقالی بین سنگدانه بازیافتی و ملات سیمان جدید می‌باشد. همچنین، هرچه مقدار سنگ‌دانه بازیافتی بتن بیشتر شود، مدول الاستیسیته بتن نیز کاهش می‌یابد.

استفاده از آب مغناطیسی نیز در چندین سال گذشته به‌منظور بهبود کلیه خواص بتن رواج پیدا کرده است. آب مغناطیسی با عبور دادن آب از یک میدان مغناطیسی تولید می‌شود. مغناطیس، مولکول‌های آب را از حالت بینظمی خارج و به شکلی مرتب می‌کند که پیوند اکسیژن-هیدروژن از شکل مثلثی به خطی تبدیل شود [۶]. به این ترتیب، هیدروژن‌های مثبت دارای نیروی بیشتری می‌شوند. در نتیجه، بار الکتریکی مولکول‌های آب کوچک‌تر شده و تعداد مولکول‌های آب در واحد حجم افزایش خواهد یافت. این شرایط و کاهش سطحی آب، قدرت حلالیت آن را افزایش داده و درجه سختی را کاهش می‌دهد [۷]. در نتیجه، مغناطیسی شدن آب باعث تغییر در عناصر ساختاری آب، ویسکوزیته و هدایت الکتریکی آب می‌شود [۸]. تغییر در ساختار آب، به بهبود خواص آن برای استفاده در بتن و هیدراتاسیون کامل سیمان کمک می‌کند [۹]. جوزدانی و

150 [۲۱] می‌باشد. از سوی دیگر، میکروسیلیس مصرفی با استاندارد ASTM C 1240 [۲۲] مطابقت داشته که این ماده به صورت پودر خاکستری رنگ با وزن مخصوص $2/13 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. در این پژوهش، از مقدار ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان استفاده شده است. آب مورد استفاده در اینجا آشامیدنی است. به منظور حصول آب مغناطیسی، از دستگاهی با میدان مغناطیسی ۱/۲ تسلا (شکل ۱) که آب با عبور از این میدان، خاصیت مغناطیسی به خود گرفته، استفاده شده است.



شکل ۱- دستگاه تولید آب مغناطیسی به همراه مخزنها و موتور پمپ

همچنین، برای نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی، از مقدار الیاف معادل ۱٪ وزن حجمی آن که از نوع دو انتها قلاب‌دار بوده (شکل ۲)، استفاده شده است. وزن مخصوص، استحکام کششی، طول، قطر و نسبت ظاهری این الیاف به ترتیب $7/85 \text{ gr/cm}^3$ ، $0/8 \text{ mm}$ ، 50 mm ، 809 N/mm^2 و $62/5$ می‌باشد.



شکل ۲- الیاف فولادی دو انتها قلاب‌دار

سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی مورد استفاده در طرح اختلاط مربوط به نمونه‌های شاهد، از نوع سنگ‌دانه‌های شکسته هستند. در حالی که، سنگ‌دانه‌های بازیافتی از تخریب یک قسمت از سازه بتنی که بتن آن برای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال طراحی شده، فراهم شده

تیر ساخته شده با آب معمولی، ظرفیت جذب انرژی و شاخص چقرمگی بالاتری دارد. هنگامی که بتن در معرض یخ‌زدن و ذوب-شدگی چرخه‌ای قرار می‌گیرد، احتمال خراب شدن آن نیز افزایش می‌یابد. کاوامورا و تورری [۱۷]، تحقیقاتی در مورد سطح تخریب بتن ساخته شده با سنگ‌دانه بازیافتی در معرض سیکل‌های پی‌پی ذوب و انجماد انجام داده و دریافته‌اند که خرابی ناشی از ذوب و انجماد، در داخل ملات به همپیوسته رخ داده است. هوسوکاوا و همکاران [۱۸]، تأثیر اضافه کردن افزودنی‌ها به ملات بتن سنگ‌دانه بازیافتی در دوام چرخه‌های ذوب و انجماد را مطالعه نموده و دریافته‌اند که افزودنی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت در برابر یخ‌زدن و خرد شدن ندارند. البته، اعتقاد بر این است که افزودن مواد هوازا به افزایش مقاومت یخ‌زدایی بتن کمک می‌کند. از طرفی، ریچاردسون [۱۹] نشان داد که بتن ساخته شده با افزودنی هوازا، ۷۶ بار موثرتر از بتن ساخته شده با سیمان معمولی است. طبق نظر ریچاردسون [۲۰]. افزودن الیاف در بتن به مسدود کردن ریز ترک‌های بتن منجر شده که نتیجه آن، جذب آب کم‌تر بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی است؛ از این‌رو، بتن با الیاف کمتر تحت تأثیرات منفی پایین‌تر ذوب و انجماد قرار می‌گیرد.

۲- اهمیت تحقیق

در گذشته، مطالعه‌ای در مورد استفاده هم‌زمان از بتن سنگ‌دانه بازیافتی و آب مغناطیسی در اختلاط بتن بازیافتی گزارش نشده است. در این پژوهش، اثر مثبت آب مغناطیسی بر روی چقرمگی و دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد بتن سنگ‌دانه بازیافتی، علاوه بر خواص مکانیکی دیگر از جمله مقاومت‌های فشاری و کششی بررسی می‌شود. همچنین، اثر فوق‌روان‌کننده و آب مغناطیسی برای نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) یکسان، مقایسه می‌شود. افزودنی معدنی میکروسیلیس و الیاف فولادی نیز برای رسیدن به بهینه‌ترین حالت ممکن از بین طرح‌ها، استفاده شده است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مصالح

برای ساخت مخلوط‌های بتن از سیمان پرتلند ضد سولفات متوسط (تیپ دو) که تمام مشخصات آن مطابق با استاندارد ASTM C

¹ Binder

و منحنی دانه‌بندی طبق نمودار شکل ۴ به‌دست آمده است. محدوده استاندارد ماسه، طبق استاندارد ملی در بخش الزامات اجباری ماسه، مطابق با نمودارهای A و B در شکل ۴ می‌باشد. همچنین، با انجام تعدادی از آزمایش‌های تکمیلی بر روی ماسه، نتایج به‌دست آمده مربوط به وزن مخصوص، درصد جذب آب حالت SSD، ضریب نرمی ماسه به ترتیب 2.6 gr/cm^3 ، 3.6% و 2.7 می‌باشد.

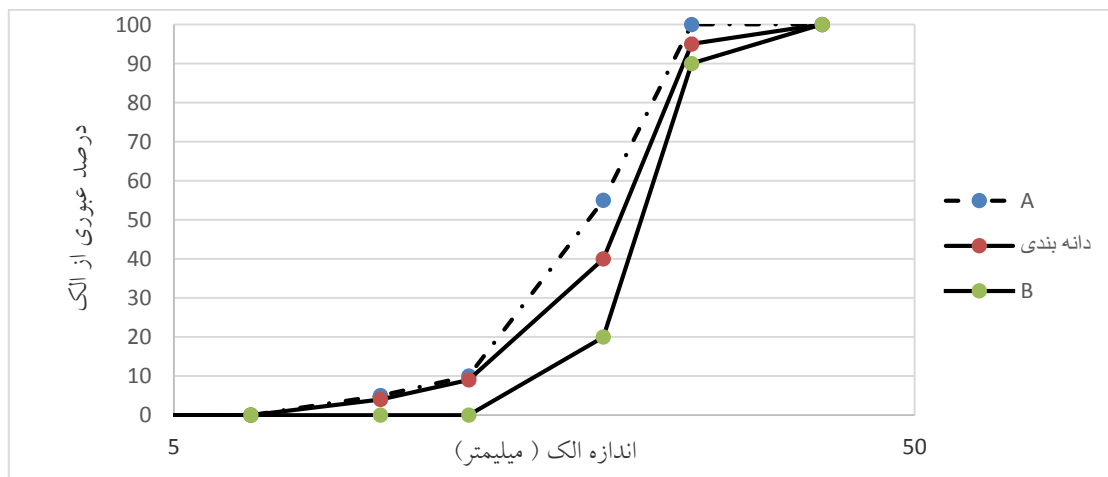
فوق روان‌کننده مورد استفاده در این پژوهش، بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح شده مطابق با استاندارد ASTM C 494 [۲۳] می‌باشد. در این پژوهش برای رسیدن به اسلامپ‌های متناظر با روانی ناشی از تعداد دورهای مختلف آب مغناطیسی، از مقادیر مختلف فوق روان‌کننده به‌دست آمده از روش آزمون و خطا، استفاده شده است.

است. دانه‌بندی مصالح بازیافتی، مطابق با دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی انجام شده است. در شکل ۳، منحنی دانه‌بندی شن‌ها و مقایسه آن با استاندارد نیز رسم شده است. همچنین، نتایج آزمایش‌های تکمیلی بر روی شن در جدول ۱، آورده شده است.

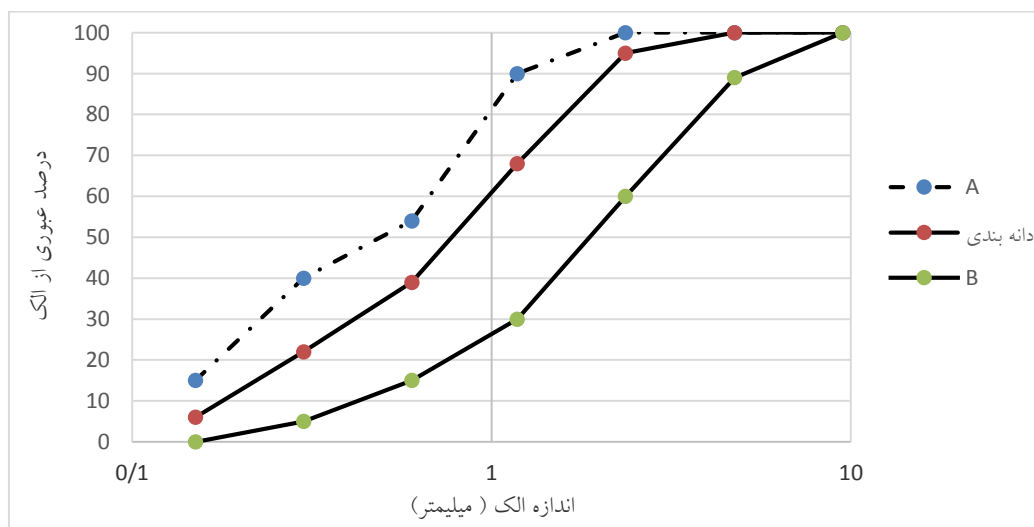
جدول ۱- نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی شن

نوع شن	وزن مخصوص (gr/cm^3)	درصد جذب آب (حالت SSD)	درصد سایش
طبیعی	۲/۶۵	۱/۳۸	۱۰/۲۱
بازیافتی	۲/۲۱	۷/۹۲	۳۲/۷۳

ماسه مصرفی در همه طرح‌های اختلاط، طبیعی و به صورت شسته بوده است. با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی، مدول نرمی ماسه 2.7



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی شن و مقایسه آن با استاندارد ملی



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی ماسه و مقایسه آن با الزامات اجباری استاندارد ماسه

۲-۳- طرح اختلاط

۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای و اسلامپ بتن تازه ناشی از آن، به ترتیب ۲۵ مگاپاسکال و ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر باشد. طرح اختلاط انتخابی برای نمونه‌های حاوی الیاف، دقیقاً با آنهایی که فاقد الیاف‌اند، مطابقت دارد؛ با این تفاوت که این طرح اختلاط از ۱٪ وزن حجمی الیاف معادل ۷۸/۵ کیلوگرم در هر متر مکعب استفاده شده و به بتن در حال اختلاط اضافه شده است.

طرح‌های اختلاط به گونه‌ای انتخاب شده که با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ($w/b=0.5$) و مقدار روانی یکسان، بتوان تفاوت اثر آب مغناطیسی و فوق روان‌کننده بر خواص مکانیکی بتن را مقایسه کرد. لازم به ذکر است که طرح اختلاط انتخابی که نسبت‌های آن در جدول ۲ آمده، بر این اساس طراحی شده که مقاومت فشاری

جدول ۲- جزئیات طرح‌های اختلاط بدون الیاف برای یک متر مکعب بتن

سری	نام طرح	سیمان (C) (kg)	سنگدانه			فوق روان کننده (kg)	میکروسیلیس (SF) (kg)
			چرخه‌های مغناطیسی	درشت‌دانه طبیعی بازیافتی	ریزدانه طبیعی (kg)		
اول	CTRL1	۳۸۶	-	۹۰۰	۸۲۱	-	-
	CTRL2	۳۸۶	۵	۹۰۰	۸۲۱	-	-
	CTRL3	۳۸۶	-	۹۰۰	۸۲۱	-	-
دوم	MW1	۳۸۶	۱	۹۰۰	۸۲۱	-	-
	MW2	۳۸۶	۱۰	۹۰۰	۸۲۱	-	-
	SP1	۳۸۶	-	۹۰۰	۸۲۱	۲/۹	-
	SP2	۳۸۶	-	۹۰۰	۸۲۱	۳/۵	-
سوم	^۱ MG-SF1	۳۴۷/۴	۱	۹۰۰	۸۲۱	-	۳۸/۶
	MG-SF2	۳۴۷/۴	۱۰	۹۰۰	۸۲۱	-	۳۸/۶
	^۲ SP-SF1	۳۴۷/۴	-	۹۰۰	۸۲۱	۳/۲	۳۸/۶
	SP-SF2	۳۴۷/۴	-	۹۰۰	۸۲۱	۳/۸۶	۳۸/۶

خواص مکانیکی دیگر نظیر اسلامپ، جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی این نوع بتن، ۲۴۲ نمونه در ۱۱ طرح مختلف ساخته شده است. آزمایش اسلامپ برای تعیین میزان کارایی بتن به کار رفته و بر اساس استاندارد ASTM C143 [۲۴] انجام شده است. آزمایش جذب آب بر اساس الزامات اجرایی استاندارد ASTM C642 [۲۵] انجام شده است. نمونه‌ها بعد اینکه به مدت ۷۲ ساعت در آب قرار گرفته، از آب خارج شده و سطح آن‌ها توسط یک پارچه خشک و توزین می‌شود. پس از آن، به مدت ۲۴ ساعت تحت حرارت قرار گرفته تا به صورت کامل خشک و مجدداً وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 12390-3:2009 [۲۶]، در مجموع ۶۶ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شده است. این نمونه‌ها مربوط به ۱۱

در جدول ۲، سه سری طرح در دست است. سری اول شامل سه طرح کنترلی CTRL1، CTRL2 و CTRL3 که به ترتیب حاوی سنگ‌دانه طبیعی با آب طبیعی، سنگ‌دانه طبیعی با آب مغناطیسی پنج دور و سنگدانه بازیافتی با آب طبیعی هستند. سری دوم شامل چهار طرح MW1، MW2، SP1 و SP2 که به ترتیب حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با آب مغناطیسی یک دور، آب مغناطیسی ده دور، فوق روان‌کننده معادل اسلامپ ناشی از آب مغناطیسی یک دور و فوق روان‌کننده معادل اسلامپ ناشی از آب مغناطیسی ده دور می‌باشد. سری سوم، دقیقاً مشابه سری دوم بوده با این تفاوت که در آن مقدار ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان افزودنی معدنی جایگزین سیمان در هر طرح اضافه شده است.

۳-۳- روند انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی چقرمگی و دوام بتن سنگدانه بازیافتی در برابر سیکلهای مختلف ذوب و یخبندان، علاوه بر

^۱ Magnetic water - Silica fume^۲ Super plasticizer - Silica fume

می گیرند. برای ارزیابی نمونه‌ها، در ابتدا سطح مورد آزمایش محاسبه شده و سپس از تقسیم وزن مواد جدا شده بر مساحت سطح، پارامتری به عنوان شاخص دوام بتن به دست می‌آید که بر حسب کیلوگرم بر مترمربع گزارش می‌شود.

آزمایش مقاومت خمشی با کمک استاندارد ASTM C1018 [۲۹] انجام شده است. نحوه ساخت، اندازه و عمل‌آوری نمونه‌ها باید مطابق با استانداردهای ASTM C31 [۳۰] و ASTM C192 [۳۱] انجام شود. با توجه به این استاندارد، ابعاد انتخابی برای ساخت نمونه‌ها $100 \times 100 \times 350$ میلیمتر می‌باشد. نقطه اوج مقاومت خمشی با استفاده از اولین نقطه اوج بارگذاری تعیین می‌شود. سپس مقاومت خمشی نمونه از رابطه $f = \frac{PL}{bd^2}$ به دست می‌آید.

۴- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

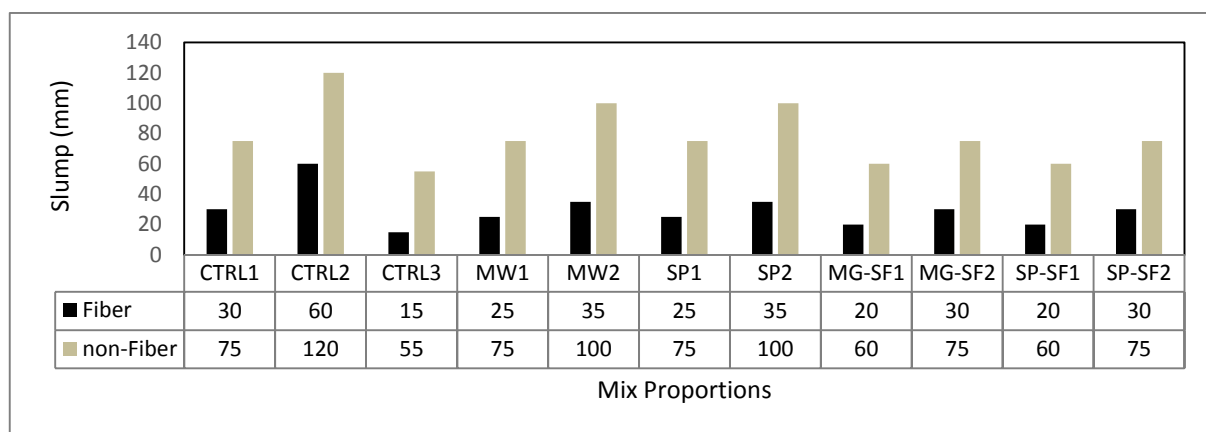
۴-۱- کارایی (آزمایش اسلامپ)

کارایی به مفهوم درجه سهولت ریختن و کار کردن با بتن می‌باشد. هرچه ریختن بتن تازه سخت‌تر باشد، کارایی آن کمتر است. نتایج اسلامپ طرح‌های مختلف با و بدون الیاف در شکل ۵ نشان داده شده است.

طرح مختلف بوده که برای هر طرح، سه نمونه شامل الیاف فولادی و سه نمونه فاقد این نوع الیاف می‌باشد. سه نمونه به منظور به دست آوردن میانگین مقادیر مقاومت انتخاب شده است.

آزمایش مقاومت کششی (آزمون برزیلی) مطابق با استاندارد ASTM C496 [۲۷] انجام شد. در این پژوهش، بر طبق الزامات این استاندارد، از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ mm و طول ۳۰ mm استفاده شد و حداکثر بار ثبت شده توسط دستگاه آزمایش بر حسب نیوتن برداشته و با کمک رابطه $T = \frac{2P}{\pi t d}$ ، مقاومت کششی نمونه محاسبه گردید. در این رابطه، T مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال، P حداکثر بار ثبت شده توسط دستگاه بر حسب نیوتون، l طول نمونه بر حسب میلی‌متر و d قطر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به اهمیت بالای مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد و با استفاده از استاندارد BS EN 1340:2003 [۲۸]، به بررسی دوام بتن سنگدانه بازیافتی با آب مغناطیسی در حضور و عدم حضور الیاف پرداخته شد. مطابق با استاندارد نامبرده، از نمونه‌های مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها پس از ۲۸ چرخه (معادل ۲۸ روز) مورد ارزیابی قرار



شکل ۵- نمودار نتایج اسلامپ

دارای اسلامپ حدوداً ۳۶٪ کمتر نسبت به طرح CTRL1 است و دلیل این کاهش در روانی مخلوط بتن وجود دانه‌های بازیافتی که جذب آب بالایی دارند، می‌باشد. همچنین، اسلامپ طرح‌های MW1 و MW2 که به ترتیب با آب مغناطیسی یک و ده دور ساخته شده، به ترتیب ۳۶٪ و ۸۱٪ بیشتر از اسلامپ طرح CTRL3 می‌باشد. از طرفی، با مقایسه طرح‌های MW1 و MW2، ملاحظه می‌شود که آب مغناطیسی ده دور نسبت به یک

با توجه به شکل ۵، ملاحظه می‌شود نمونه‌های دارای الیاف در همه طرح‌ها، اسلامپ کمتری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف فولادی دارند. اسلامپ طرح CTRL2 که دارای سنگدانه طبیعی و آب مغناطیسی ۵ دور بدون الیاف بوده، از اسلامپ طرح CTRL1 حاوی آب طبیعی همراه با سنگدانه طبیعی، حدود ۶۰٪ بیشتر است که در اینجا اثر آب مغناطیسی بر افزایش اسلامپ بتن ملاحظه می‌شود. طرح CTRL3 حاوی آب معمولی و سنگدانه بازیافتی،

مغناطیسی پنج دور می‌باشد. درحالی‌که بیشترین میزان جذب آب مربوط به طرح CTRL3 بوده که با استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی همراه با آب طبیعی ساخته شده است.

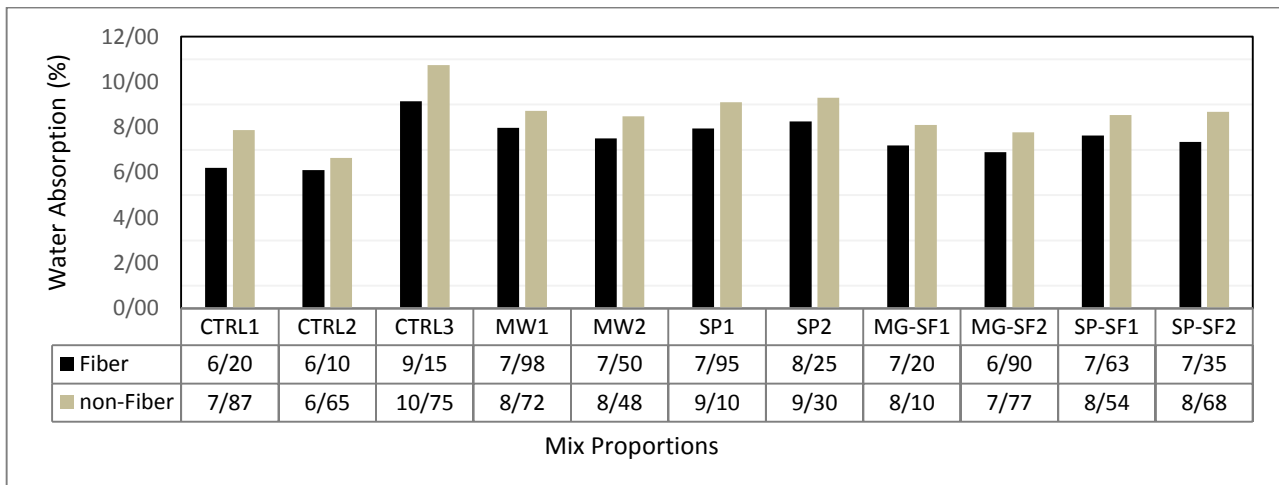
وجود مصالح بازیافتی در بتن به دلیل تخلخل بوجود آمده، جذب آب بتن را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، طرح CTRL3 که با سنگ‌دانه بازیافتی ساخته شده نسبت به طرح CTRL1 که سنگ‌دانه طبیعی دارد جذب آب حدود ۳۷٪ در نمونه‌های فاقد الیاف و ۴۸٪ در نمونه‌های دارای الیاف بیشتری دارد. در نمونه‌های فاقد میکروسیلیس (طرح‌های سری دوم)، آن‌هایی که با آب مغناطیسی ساخته شده (MW2 و MW1)، جذب آب کمتری نسبت به SP1 و SP2 که با فوق روان‌کننده ساخته شده، دارند. علاوه بر آن، طرح‌های دارای میکروسیلیس (سری سوم)، به علت اثر مثبت میکروسیلیس بر اصلاح ساختار و کاهش اندازه حفرات بتن، به طور متوسط جذب آب حدود ۸٪ در نمونه‌های فاقد الیاف و ۱۶٪ در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی کمتری نسبت به طرح-های فاقد این افزودنی معدنی دارند. طرح MW-SF2 حاوی میکروسیلیس ۱۰٪ با آب مغناطیسی ده دور (در دو حالت با و بدون الیاف فولادی)، کمترین میزان جذب آب در میان تمام طرح‌های که دارای سنگ‌دانه بازیافتی بوده را دارد.

دور آن، باعث ۳۳٪ اسلامپ بیشتری می‌شود. مقدار فوق روان-کننده طرح‌های SP1 و SP2 طوری تعیین شده که اسلامپ‌های مشابهی با طرح‌های MW1 و MW2 داشته باشند. چهار طرح آخر دارای ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان، به دلیل افزایش چسبندگی مخلوط بتن، نسبت به طرح‌های سری دوم به‌طور تقریبی ۲۹٪ اسلامپ کمتری دارند.

۴-۲- جذب آب

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نمونه‌های بتن سخت شده مربوط به طرح‌های مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. از آنجا که جذب آب در بتن سخت شده تابع انواع ترک خوردگی در نمونه‌ها می‌باشد، بدیهی است که با افزایش عرض ریزترک‌ها، نفوذ آب و در نتیجه جذب آب بتن بیشتر می‌شود. مسلح‌سازی نمونه‌ها با الیاف فولادی، موجب کنترل رشد ریزترک‌ها و کاهش نفوذپذیری می‌شود.

از نمودار شکل ۶ ملاحظه می‌شود که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، به طور متوسط جذب آب حدود ۱۴٪ کمتری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف دارند. همچنین، کمترین میزان جذب آب، مربوط به طرح CTRL2 که دارای سنگ‌دانه طبیعی و آب



شکل ۶- نمودار نتایج جذب آب

افتادن رشد ریزترک‌ها در بتن می‌گردد که در نتیجه باعث افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر خواهد شد. مقاومت فشاری طرح CTRL2 که با آب مغناطیسی ساخته شد، نسبت به مقاومت طرح CTRL1 که دارای آب معمولی بوده، در بتن‌های حاوی و فاقد الیاف فولادی حدود ۸٪ بیشتر است. همچنین، طرح

۴-۳- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی برای ۱۱ طرح مختلف در جدول ۳ آمده است. با توجه به جدول ۳، ملاحظه می‌شود در همه طرح‌ها، مقاومت نمونه‌های حاوی الیاف از آن‌هایی که فاقد الیاف هستند، بیش‌تر است. وجود الیاف باعث به تاخیر

۴-۴- مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای برای بتن مربوط به ۱۱ طرح مختلف در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های مکعبی با و بدون الیاف

سری	نام طرح	مقاومت کششی نمونه‌های با الیاف (MPa)	مقاومت کششی نمونه‌های بدون الیاف (MPa)
اول	CTRL1	۴/۲	۲/۶
	CTRL2	۳/۹	۳/۵
	CTRL3	۲/۸	۱/۹
دوم	MW1	۳/۱	۲/۲
	MW2	۳/۳	۲/۷
	SP1	۳	۲/۲
	SP2	۳/۲	۲/۴
سوم	MG-SF1	۳/۳	۲/۶
	MG-SF2	۳/۷	۳/۱
	SP-SF1	۳/۳	۲/۹
	SP-SF2	۳/۵	۳

در همه‌ی طرح‌های دارای الیاف فولادی، مقاومت کششی نسبت به طرح‌های که فاقد این نوع الیاف، به‌طور متوسط حدود ۲۸٪ بیشتر است. در دسته کنترلی، کمترین مقاومت کششی نیز متعلق به بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی (CTRL3) می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی و آب مغناطیسی یک و ده دور نیز به ترتیب ۱۸٪ و ۳۹٪ افزایش مقاومت نسبت به طرح CTRL3 برای نمونه‌های فاقد الیاف و همچنین ۱۳٪ و ۱۸٪ برای آن‌هایی که حاوی الیاف فولادی هستند را نشان می‌دهند. استفاده از میکروسیلیس در سری سوم طرح‌های اختلاط، به‌طور میانگین باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های دارای الیاف فولادی حدود ۱۰٪ و افزایش این مقاومت در نمونه‌های فاقد الیاف حدود ۲۲٪ نسبت به سری دوم طرح‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در میان نمونه‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان، بهترین عملکرد مربوط به طرح MG-SF2 که دارای آب مغناطیسی ده دور می‌باشد.

CTRL3 حاوی سنگدانه بازیافتی از همه طرح‌ها مقاومت کمتری را از خود نشان داد. با مقایسه این طرح با طرح CTRL1، نتیجه می‌شود که جایگزین ۱۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، منجر به کاهش مقاومت فشاری حدود ۷۶٪ در بتن حاوی الیاف فولادی و ۷۲٪ در بتن فاقد این نوع الیاف می‌باشد.

جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با و بدون الیاف

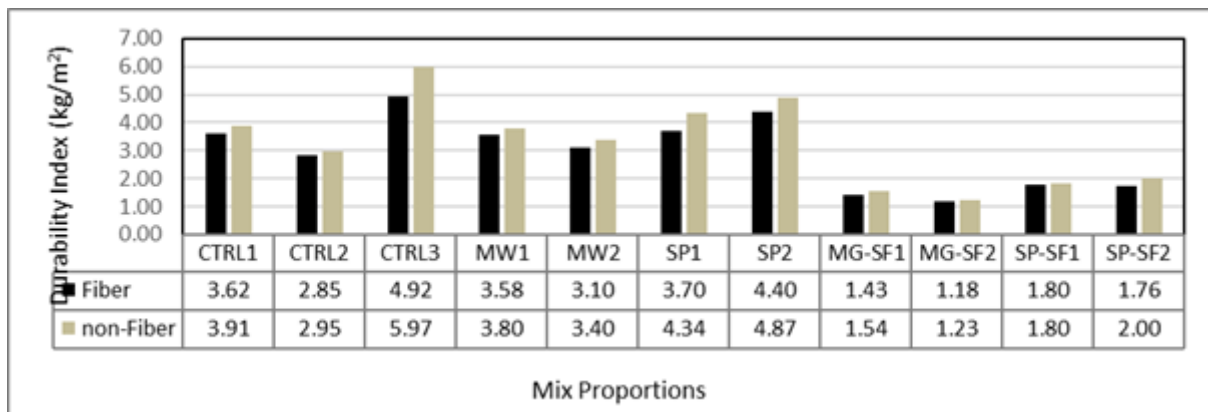
سری	نام طرح	مقاومت فشاری نمونه‌های با الیاف (MPa)	مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف (MPa)
اول	CTRL1	۳۶/۷	۳۴/۹
	CTRL2	۳۹/۵	۳۷/۸
	CTRL3	۲۰/۹	۲۰/۳
دوم	MW1	۲۴	۲۲/۴
	MW2	۲۶/۹	۲۵/۷
	SP1	۲۵/۹	۲۲/۵
	SP2	۲۳/۷	۲۱/۸
سوم	MG-SF1	۳۳/۶	۲۹/۹
	MG-SF2	۳۵	۳۲/۷
	SP-SF1	۳۳/۶	۳۰/۷
	SP-SF2	۳۳/۵	۳۱/۲

از طرفی، در طرح MW1، آب مغناطیسی یک دور، منجر به افزایش مقاومت فشاری به نسبت ۱۵٪ در بتن حاوی الیاف و ۱۰٪ در بتن فاقد الیاف شد. درحالی‌که ده دور آب مغناطیسی (طرح MW2)، باعث افزایش این مقاومت به نسبت ۲۹٪ و ۲۶٪ به ترتیب در بتن‌های حاوی و فاقد الیاف شد. علاوه براین، در نمونه‌های الیافی، استفاده از فوق روان‌کننده در طرح SP1، منجر به افزایش مقاومت فشاری حدود ۲۴٪ نسبت به نمونه MW1 (دارای اسلامپ مشابه طرح SP1) گردید، درحالی‌که فوق روان‌کننده در طرح SP2، باعث افزایش مقاومت به مقدار ۱۴٪ نسبت به نمونه MW2 شد. در طرح‌های سری سوم، استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان و آب مغناطیسی، به‌طور متوسط همراه با افزایش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی و فاقد الیاف فولادی به ترتیب به نسبت‌های ۳۴٪ و ۳۰٪ می‌گردد.

MW2 با یک و ده دور آب مغناطیسی می‌باشد. همچنین، با مقایسه نتایج طرح‌های مربوط به بتن الیافی، ملاحظه شد که سنگدانه بازیافتی، آب مغناطیسی و فوق روان‌کننده اثرات مشابهی با آنچه که در طرح‌های فاقد الیاف بودند، دارد. به عنوان مثال، طرح CTRL2 حاوی سنگدانه طبیعی با آب مغناطیسی در مقایسه با طرح CTRL1 که با آب طبیعی ساخته شد، تقریباً ۲۷٪ دوام بیشتری دارد. در حالی که، طرح CTRL3 حدود ۳۶٪ دوام کمتری نسبت به CTRL1 دارد. سری سوم طرح‌ها که با استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان ساخته شد، در مقایسه با طرح‌های سری دوم، نشان می‌دهند که افزودنی معدنی میکروسیلیس منجر به افزایش بسیار بالای دوام بتن می‌گردد که به طور متوسط در بتن الیافی برای نمونه‌های دارای آب مغناطیسی حدوداً ۱۵۵٪ و نمونه‌های حاوی فوق روان‌کننده حدوداً ۱۲۸٪ است و این نسبت‌ها به ترتیب به ۱۷۷٪ و ۱۴۲٪ در بتن‌های فاقد الیاف رسیده است.

۴-۵- آزمایش چرخه‌های ذوب و انجماد

نتایج آزمایش ذوب و یخبندان در شکل ۷ آمده است. در این شکل شاخص‌های دوام ۱۱ ترکیب مختلف که هر کدام از میانگین‌گیری نتایج دو نمونه مشابه به دست آمده، ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، از روی نتایج بتن فاقد الیاف، طرح CTRL2 که دارای سنگدانه طبیعی با آب مغناطیسی بوده، از طرح CTRL1 که با آب طبیعی ساخته شد، دوام حدوداً ۳۲٪ بیشتری دارد. از طرفی طرح CTRL3 که با سنگدانه‌های بازیافتی و آب طبیعی ساخته شد، در مقایسه با طرح CTRL1، دوام حدوداً ۵۳٪ پایین‌تری دارد. مقایسه طرح‌های MW1 و MW2 با طرح CTRL1، نتیجه می‌دهد که آب مغناطیسی یک دور به طور تقریبی تاثیر ناچیزی روی دوام بتن داشته در حالی که ده دور آن باعث افزایش دوام بتن به مقدار ۱۵٪ می‌شود. برای روانی یکسان، دوام نمونه‌های دارای فوق روان‌کننده (SP1 و SP2)، کمتر از دوام نمونه‌های MW1 و



شکل ۷- نمودار نتایج آزمایش ذوب و یخبندان

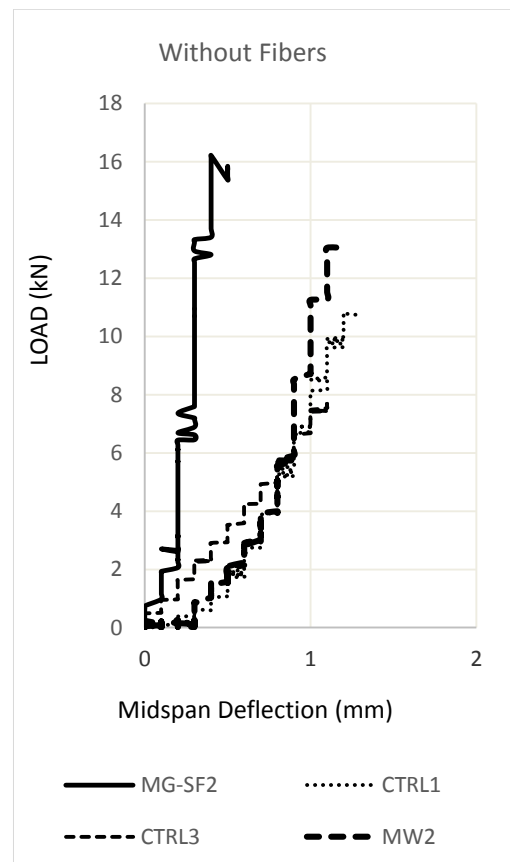
با توجه به نمودارهای بار-جابجایی، بار بیشینه مربوط به هر یک از طرح‌ها بر حسب نیوتن برای بتن با الیاف و فاقد الیاف به دست آمده است. سپس با استفاده از رابطه مدول گسیختگی ذکر شده، مقاومت خمشی نمونه‌های با و بدون الیاف محاسبه شده و در جدول ۵ درج شده‌اند. همچنین، در صد اختلاف نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های با و بدون الیاف در همین جدول آمده است. در بتن فاقد الیاف فولادی، استفاده از سنگدانه بازیافتی در طرح CTRL3، منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای بار بیشینه و یا مقاومت خمشی معادل آن به مقدار ۴۳٪ در مقایسه با بار بیشینه‌ی طرح CTRL1 که حاوی سنگدانه طبیعی شده است. از سوی دیگر،

۴-۶- آزمایش مقاومت و چقرمگی خمشی

به دلیل شباهت نمودارهای بار-جابجایی نمونه‌های فاقد الیاف فولادی، از آوردن نمودارهای مربوط به همه‌ی طرح‌ها خودداری شده است و به نمودارهای طرح‌های CTRL1، CTRL3، MW2 و MG-SF2 در شکل ۸ اکتفا شده است. با استفاده از نمودارهای بار-جابجایی، چقرمگی خمشی نمونه‌های دارای الیاف فولادی با استفاده از استانداردهای ASTM C1018، JSCE [۳۲] و روش PCS محاسبه می‌شود. به کمک داده‌های ثبت شده در آزمایش مقاومت خمشی، نمودارهای بار-جابجایی رسم می‌شوند (شکل ۹).

یک دور در طرح MW1، منجر به افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۲۲٪ می‌گردد، در حالی که این مقدار در طرح MW2 که آب مغناطیسی ده دور دارد، به ۷۰٪ رسیده است. استفاده از فوق روانکننده در طرح‌های SP1 و SP2، به ترتیب باعث افزایش مقاومت خمشی به مقدارهای ۱۷٪ و ۵۲٪ نسبت به نمونه‌های دارای آب معمولی (طرح CTRL3) شده است. استفاده از میکروسیلیس در چهار طرح پایانی، همراه با افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت خمشی نمونه‌ها بوده، به‌ویژه طرح MW-SF2 که با آب مغناطیسی ده دور ساخته شده، مقاومت خمشی آن حدود ۲/۱۳ برابر مقاومت خمشی طرح CTRL3 که سنگدانه ی باز یافتی با آب طبیعی دارد. از طرفی، مقایسه مقدار بار بیشینه و یا مقاومت خمشی معادل آن برای طرح‌های موجود در بتن حاوی الیاف فولادی مشابه بتن فاقد الیاف می‌باشد. به عنوان مثال، طرح‌های MW1، MW2 و MW-SF2 در مقایسه با طرح CTRL3 به ترتیب حدود ۱۶٪، ۲۴٪ و ۵۳٪ مقاومت خمشی بالاتری دارد. لازم به ذکر است که بار بیشینه و یا مقاومت خمشی معادل آن برای نمونه‌های حاوی الیاف در همه طرح‌ها از همان بار و یا مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های فاقد الیاف بیش تر است. از طرف دیگر، اختلاف بار بیشینه و یا مقاومت خمشی نمونه‌های با و بدون الیاف در همه ی طرح‌ها، یکسان نبوده است. به عنوان مثال، در طرح CTRL1 که یکی از طرح‌های کنترلی می‌باشد، بار بیشینه ی نمونه‌های حاوی الیاف، حدود ۴۸٪ از نمونه‌های فاقد الیاف، بیشتر است. در حالیکه این اختلاف در طرح CTRL2 که در آن آب مغناطیسی پنج دور همراه با سنگدانه باز یافتی استفاده شد، به ۵۴٪ رسیده است.

استفاده از آب مغناطیسی پنج دور در طرح CTRL2 باعث افزایش مقاومت خمشی حدود ۶۹٪ در مقایسه با طرح CTRL1 که داری آب معمولی است، می‌گردد.

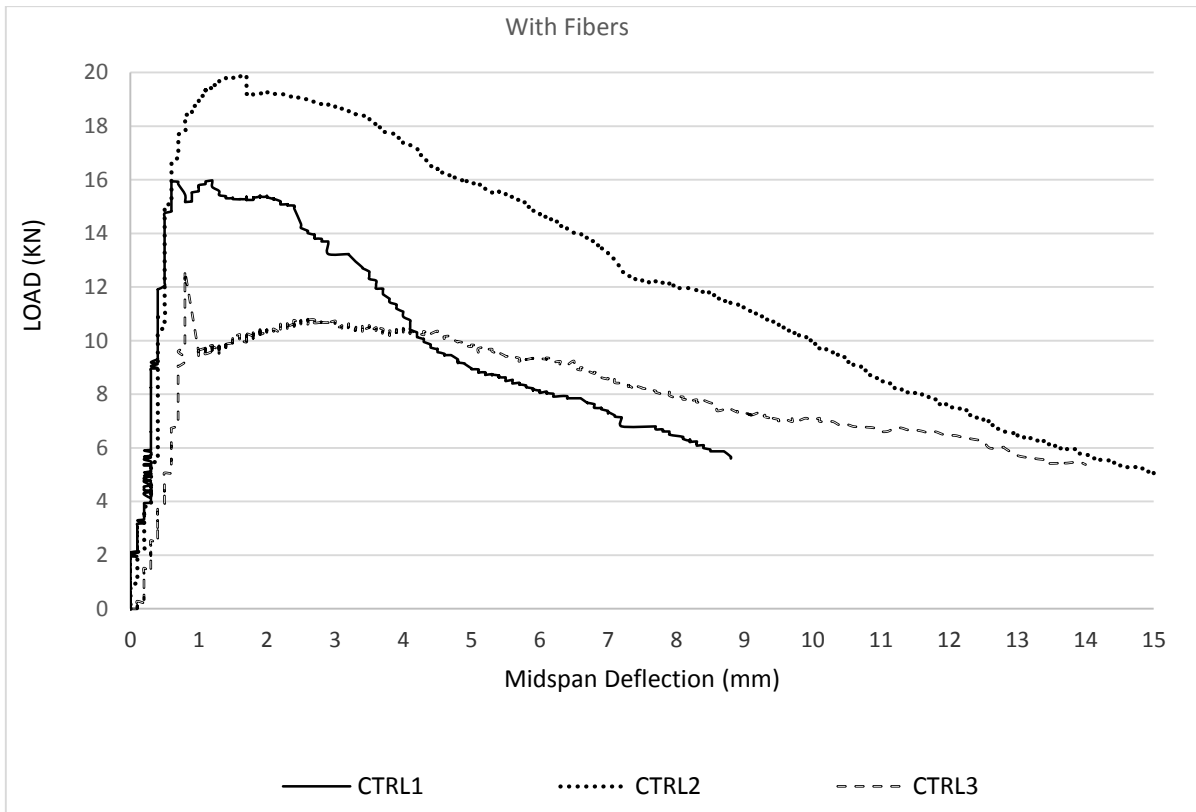


شکل ۸- نمودار بار- جابه‌جایی نمونه‌های فاقد الیاف طرح‌های CTRL1، CTRL3، MW2، MG-SF2

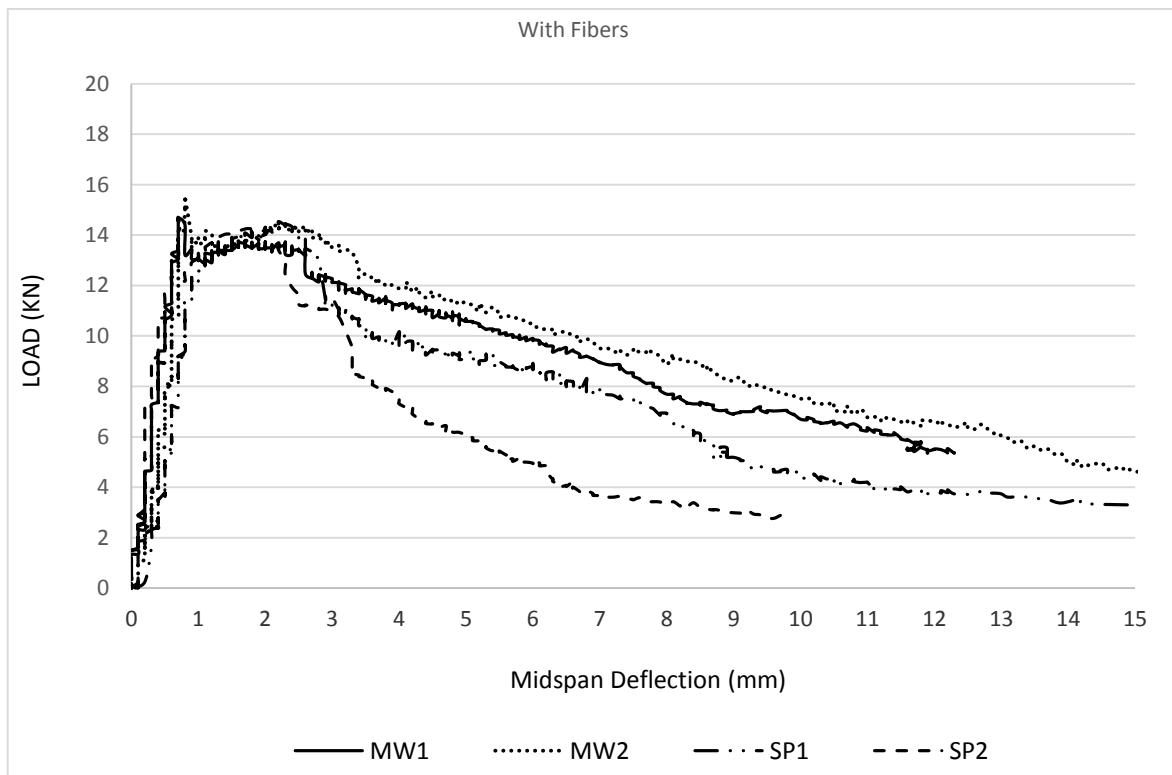
علاوه بر آن، مقایسه ی طرح‌های CTRL3 و MW1، که فقط در نوع آب با هم اختلاف دارند، نشان می‌دهد که آب مغناطیسی

جدول ۵- بار بیشینه و مقاومت خمشی نمونه‌های با و بدون الیاف فولادی

درصد اختلاف نمونه-های با و بدون الیاف	با الیاف		بدون الیاف		نام طرح	سری
	مقاومت خمشی (MPa)	بار بیشینه (N)	مقاومت خمشی (MPa)	بار بیشینه (N)		
۴۸	۴/۸	۱۵۹۸۰	۳/۳	۱۰۸۲۰	CTRL1	اول
۵۴	۵/۹	۱۹۹۱۰	۳/۹	۱۲۸۷۰	CTRL2	
۶۴	۳/۸	۱۲۶۲۰	۲/۳	۷۶۸۰	CTRL3	
۵۶	۴/۴	۱۴۷۰۰	۲/۸	۹۳۹۰	MW1	دوم
۱۹	۴/۷	۱۵۵۷۰	۳/۹	۱۳۰۵۰	MW2	
۶۰	۴/۴	۱۴۵۴۰	۲/۷	۹۱۱۰	SP1	
۲۲	۴/۳	۱۴۲۴۰	۳/۵	۱۱۶۹۰	SP2	سوم
۲۴	۵/۶	۱۸۶۱۰	۴/۲	۱۳۹۲۰	MG-SF1	
۲۰	۵/۸	۱۹۴۸۰	۴/۹	۱۶۲۲۰	MG-SF2	
۳۵	۴/۷	۱۵۷۱۰	۳/۵	۱۱۶۶۰	SP-SF1	
۲۳	۵/۰	۱۶۶۲۰	۴/۰	۱۳۴۷۰	SP-SF2	

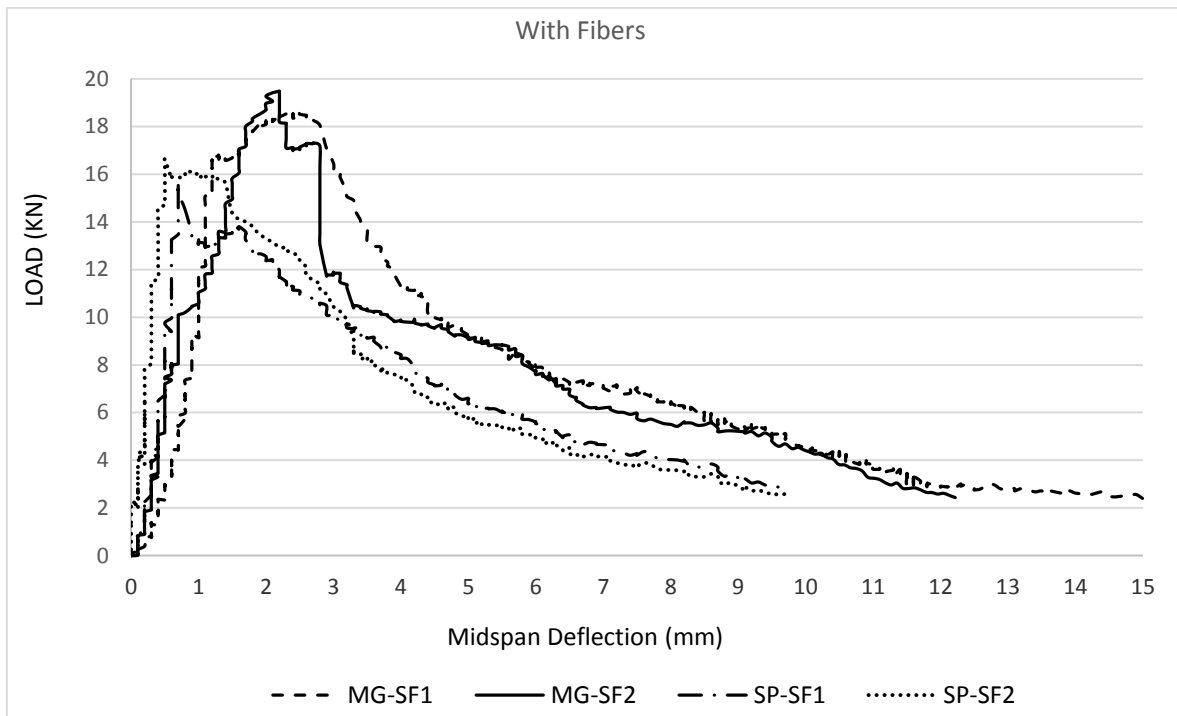


(الف)



(ب)

شکل ۹- نمودار بار- جابه‌جایی نمونه‌های الیافی (الف): طرح‌های CTRL1, CTRL2, CTRL3 (ب): طرح‌های SP2, SP1, MW1, MW2



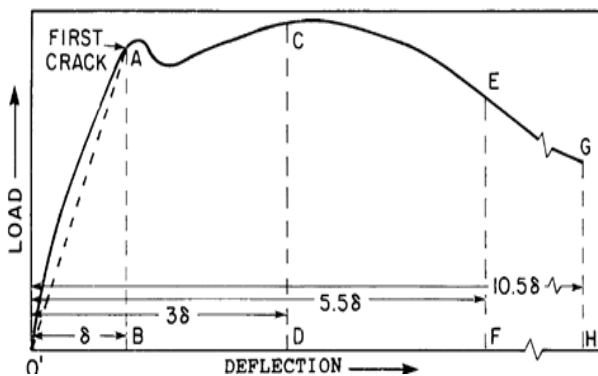
(ج)

ادامه شکل ۹- نمودار بار- جابه‌جایی نمونه‌های الیافی (ج): طرح‌های MG-SF1، MG-SF2، SP-SF1، SP-SF2

از ترسیم نمودار بار- جابه‌جایی در جابه‌جایی‌های نزدیک به بار بیشینه می‌کند.

۵- روش‌های محاسبه شاخص‌های چقرمگی

برای محاسبه چقرمگی خمشی روش‌های مختلفی وجود دارد. رایج‌ترین آن‌ها به شرح زیر است.



شکل ۱۰- نمودار بار- تغییر مکان حاوی جابه‌جایی‌های موردنظر

برای محاسبه شاخص‌های چقرمگی [۲۹]

با مقایسه‌ی مساحت‌های تجمعی متناظر با جابه‌جایی‌های مختلف (جدول ۶)، نتیجه می‌شود که مقدار جذب انرژی (مساحت تجمعی) تقریباً با نتایج آزمایش‌های قبلی مطابقت دارد. شاخص چقرمگی I_{10} حاصل از مساحت‌های تجمعی نمودار بار- جابه‌جایی طرح CTRL2 از نتایج طرح CTRL1 حدود ۶٪ بیشتر است (جدول ۶).

۱-۵- استاندارد ASTM C1018

طبق این استاندارد، هر نمونه دارای شاخص‌های چقرمگی مختلفی بوده که مقدار این شاخص‌ها با توجه به حداکثر جابه‌جایی مورد نظر متفاوت می‌باشد. این شاخص‌ها در واقع ضریبی برای معرفی چقرمگی خمشی و توانایی بتن در جذب انرژی در خیزهای مختلف می‌باشند. طبق این استاندارد، برای محاسبه شاخص‌های چقرمگی از نمودار بار- جابه‌جایی (شکل ۱۰) استفاده می‌شود. نتایج حاصل شده در جدول ۶ درج شده است.

مقایسه‌ی نتایج طرح‌های مختلف توسط شاخص‌های چقرمگی تقریباً مفهوم متفاوتی با آنچه در آزمایش‌های قبلی مشخص شده را نشان می‌دهد. این امر احتمالاً به این دلیل بوده که روش ASTM C1018 خطاهای زیادی از جمله مسئله پیدا کردن دقیق جابه‌جایی متناظر با اولین ترک ایجاد شده، به علاوه خطاهای ناشی

	۳۷۳۸	۰/۷	δ_{peak}	
	۵/۹۸	۲۲۳۶۲	۲/۱	I_5
	۱۰/۸۶	۴۰۶۲۰	۳/۸۵	I_{10}
	۱۶/۴۷	۶۱۵۸۲	۷/۳۵	I_{20}
		۴۰۳۹	۰/۵	δ_{peak}
	۴/۹۲	۱۹۸۸۸	۱/۵	I_5
	۹/۱۱	۳۶۸۱۲	۲/۷۵	I_{10}
	۱۳/۸۰	۹۵۵۷۵۸	۵/۲۵	I_{20}

طرح CTRL3 حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی با آب معمولی بدون هیچ افزودنی دیگر، مساحت‌های تجمعی پایین‌تری در مقایسه با سایر طرح‌ها دارد. همچنین، طرح MW2 حاوی آب مغناطیسی ده دور، نسبت به طرح MW1 که با آب مغناطیسی یک دور ساخته شده، مساحت تجمعی بیشتری دارد، و نیز شاخص‌های چقرمگی مربوط این طرح‌ها، همین نتیجه را نشان می‌دهد که در آن شاخص چقرمگی (I_{20}) در طرح MW2 حدود ۲۳٪ از طرح MW1 بیشتر است. از طرفی دیگر، اختلاف تاثیر آب مغناطیسی یک و ده دور، در مقایسه با تاثیر مقادیر مختلف فوق روان‌کننده در طرح‌های SP1 و SP2، نتایج کاملاً معکوسی می‌دهد. به عنوان مثال، شاخص‌های چقرمگی I_5 و I_{10} طرح SP1 به ترتیب حدود ۱۳٪ و ۲۳٪ از شاخص‌های طرح SP1، کمتر می‌باشد. نتایج آزمایش‌های مختلف طرح‌های سری سوم با آنچه که در این راهکار به دست آمده، صدق نمی‌کند. طرح‌های SP-SF1 و SP-SF2، در مقایسه با طرح‌های MW-SF1 و MW-SF2 نتایج بالایی را از خود نشان داده و این اختلاف که فقط و فقط در این روش حاصل شده با آن چه که انتظار بوده، کاملاً مغایر است.

۵-۲- استاندارد JSCE

طبق این استاندارد، چقرمگی با محاسبه سطح زیر نمودار بار-جابه‌جایی و تا تغییر مکان $\frac{L}{150}$ طول دهانه محاسبه می‌شود. شکل ۱۱ نمودار بار-جابه‌جایی حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بوده و سطح هاشور خورده برابر با چقرمگی خمشی نمونه‌ها تا جابه‌جایی معادل $\frac{L}{150}$ عرض دهانه می‌باشد. استاندارد JSCE رابطه‌ی $\sigma_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2}$ را نیز با نام فاکتور چقرمگی و بعنوان پارامتری برای میزان جذب انرژی معرفی کرده که در آن، σ_b فاکتور چقرمگی

جدول ۶- نتایج شاخص چقرمگی با استفاده از روش ASTM C1018

نام طرح	نماد	جابجایی (mm)	مساحت تجمعی (N.mm)	شاخص چقرمگی
CTRL1	δ_{peak}	۱/۲	۱۳۹۹۷	
	I_5	۳/۶	۴۸۴۳۵	۳/۴۶
	I_{10}	۶/۶	۷۶۱۱۰	۵/۴۴
	I_{20}	۱۲/۶	*	*
CTRL2	δ_{peak}	۱/۷	۲۴۶۹۷	
	I_5	۵/۱	۸۵۷۳۹	۳/۴۷
	I_{10}	۹/۳۵	۱۴۲۰۵۰	۵/۷۵
	I_{20}	۱۷/۸۵	۱۹۶۲۳۹	۷/۹۴
CTRL3	δ_{peak}	۰/۸	۲۹۱۸	
	I_5	۲/۴	۱۹۲۹۵	۶/۶۱
	I_{10}	۴/۴	۴۰۲۵۵	۱۳/۷۹
	I_{20}	۸/۴	۷۶۱۷۶	۲۶/۱۰
MW1	δ_{peak}	۰/۷	۴۹۶۳	
	I_5	۲/۱	۲۳۸۱۰	۴/۷۹
	I_{10}	۳/۸۵	۴۴۸۳۳	۹/۰۳
	I_{20}	۷/۳۵	۸۱۱۴۲	۱۶/۳۵
MW2	δ_{peak}	۰/۸	۴۶۵۶	
	I_5	۲/۴	۲۶۹۵۶	۵/۷۹
	I_{10}	۴/۴	۵۲۷۴۰	۱۱/۳۳
	I_{20}	۸/۴	۹۳۵۰۰	۲۰/۰۸
SP1	δ_{peak}	۲/۲	۲۱۶۸۸	
	I_5	۶/۶	۶۶۲۰۴	۳/۰۵
	I_{10}	۱۲/۱	۹۶۰۶۴	۴/۴۳
	I_{20}	۲۳/۱	*	*
SP2	δ_{peak}	۱/۷	۱۸۸۷۰	
	I_5	۵/۱	۵۱۱۶۱	۲/۷۱
	I_{10}	۹/۳۵	۶۸۱۰۱	۳/۶۱
	I_{20}	۱۷/۸۵	*	*
MW-SF1	δ_{peak}	۲/۵	۲۹۱۷۲	
	I_5	۷/۵	۸۱۵۲۷	۲/۷۹
	I_{10}	۱۳/۷۵	۱۰۸۲۳۴	۳/۷۱
	I_{20}	۲۶/۲۵	*	*
MW-SF2	δ_{peak}	۲/۲	۲۴۸۲۶	
	I_5	۶/۶	۷۰۶۵۱	۲/۸۴
	I_{10}	۱۲/۱	۹۳۶۴۰	۳/۸۸
	I_{20}	۲۳/۱	*	*

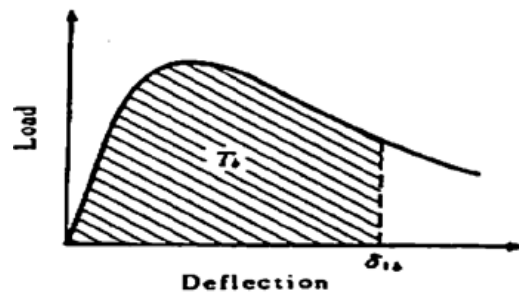
چقرمگی از سایر طرح‌ها پایین‌تری دارد. لازم به ذکر است، فاکتور چقرمگی طرح شماره‌ی سه از همه‌ی مقادیر، پایین‌تر بوده است. طرح MW1 که با آب مغناطیسی یک دور ساخته شد، از طرح SP1 که حاوی فوق‌روان‌کننده با روانی یکسان می‌باشد، حدود ۲۰٪ فاکتور چقرمگی بالاتری دارد. طرح MW2، حاوی آب مغناطیسی ده دور، در مقایسه با طرح MW1، شاخص چقرمگی و یا چقرمگی خمشی کمتری را از خود نشان داد و این امر ممکن است به خطاهای آزمایشگاهی و یا معایب مربوط به این روش وابسته باشد. طرح‌های سری سوم که میکروسلیس دارند، چقرمگی خمشی و یا شاخص‌های چقرمگی تقریباً نزدیک به طرح‌های سری دوم دارند که این امر کاملاً با نتایج قبلی مغایر است (جدول ۷).

۳-۵- روش PCS

برای جلوگیری از خطاهای رایج در محاسبه چقرمگی، بانتیا و تروتیر [۳۳] روشی به نام PCS پیشنهاد کردند. با توجه به این روش، با کمک بار بیشینه و مطابق شکل ۱۲، نمودار بار-جابجایی به دو ناحیه تقسیم می‌شود، ناحیه اول پیش از بار بیشینه و ناحیه دوم پس از بار بیشینه. نقاطی از نمودار پس از بار بیشینه که دارای جابه‌جایی‌هایی منطبق بر نسبت‌های مختلف حاصل از تقسیم طول دهانه بر یک عدد دلخواه ($\frac{L}{M}$) هستند، تعیین می‌شوند. مقاومت نمونه پس از ایجاد ترک (PCS_m) در ناحیه دوم (پس از بار بیشینه) مربوط به $\frac{L}{M}$ های مختلف با کمک رابطه‌ی $PCS_m = \frac{(E_{post,m})L}{(\frac{L}{M} - \delta_{peak})bh^2}$ محاسبه می‌شود که در آن، b و h ابعاد مقطع نمونه بر حسب میلیمتر، L طول دهانه و δ_{peak} جابه‌جایی مربوط به بار بیشینه بر حسب میلیمتر می‌باشد.

باید توجه شود که مقادیر PCS_m با کمک انرژی جذب شده پس از بار بیشینه ($E_{post,m}$) و نه با کمک انرژی کل ($E_{total,m}$) محاسبه می‌شود به نحوی که انرژی جذب شده پیش از بار بیشینه (E_{pre}) از محاسبات حذف می‌شود. این روش با توجه به نحوه‌ی محاسبه‌ی PCS_m شامل خطاهای ناشی از محاسبه‌ی E_{pre} نمی‌باشد. مقاومت پس از ایجاد ترک (PCS_m) در ناحیه دوم (پس از بار بیشینه) متناظر با $\frac{L}{M}$ های مختلف نمونه‌های مربوط به ۱۱ طرح مذکور در جدول ۸ به دست آمده است.

بر حسب T_b , kgf/cm^2 چقرمگی خمشی بر حسب $kgf.cm$ و δ_{tb} خیز معادل با $\frac{L}{150}$ عرض دهانه تیر بر حسب cm می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار بار-جابجایی [۳۲]

فاکتور چقرمگی نمونه‌های مربوط به ۱۱ طرح مختلف در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- نتایج فاکتور چقرمگی با استفاده از روش JSCE

سری	نام طرح	T_b (N.mm)	$\bar{\sigma}_b$ (Mpa)
اول	CTRL1	۲۶۲۸۸	۳/۹۴۳۲
	CTRL2	۳۰۴۵۸	۴/۵۶۸۷
	CTRL3	۱۵۱۲۳	۲/۲۶۸۵
دوم	MW1	۲۲۴۶۰/۴۱	۳/۳۶۹۱
	MW2	۲۱۲۳۶/۴۴	۳/۱۸۵۵
	SP1	۱۸۸۳۷/۵۰	۲/۸۲۵۶
	SP2	۲۴۵۴۲/۵۰	۳/۶۸۱۴
	MW-SF1	۱۹۹۶۸	۲/۹۹۵۲
سوم	MW-SF2	۲۰۹۶۳/۵۰	۳/۱۴۴۵
	SP-SF1	۲۱۱۳۰/۹۱	۳/۱۶۹۶
	SP-SF2	۲۸۱۴۳/۴۴	۴/۲۲۱۵

در این پژوهش، برای آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای، از نمونه‌های کاملاً یکسان استفاده شده است. عرض و ارتفاع نمونه‌ها برابر با ۱۰۰ میلیمتر و طول موثر دهانه‌های آن با در نظر گرفتن ۲۵ میلیمتر برای تکیه‌گاه از هر طرف، ۳۰۰ میلیمتر می‌باشد. طبق جدول ۷، از بین طرح‌های CTRL1 و CTRL2 که هر دو دارای سنگدانه‌ی طبیعی بوده، طرح CTRL2 حاوی آب مغناطیسی پنج دور، فاکتور چقرمگی به مقدار ۱۶٪ بالاتر و در واقع مساحت تجمع‌ی یا چقرمگی خمشی بیشتری دارد. از سوی دیگر، طرح CTRL3 حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی با آب معمولی، فاکتور

SF1، MW-SF2 و SP-SF2، از بین طرح‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی، تقریباً PCS_m بیشتر و عملکرد بهتری را از خود نشان دادند.

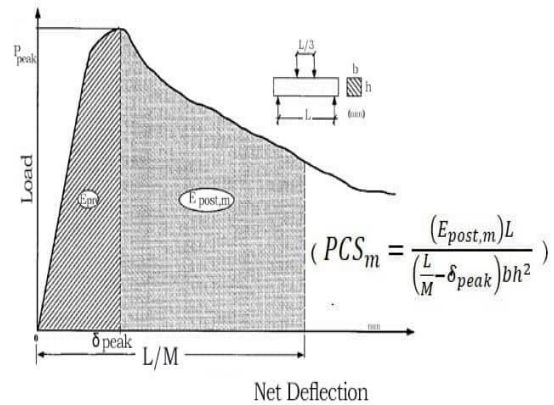
۶- تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی^۱ SEM (بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر)

تصویر برداری از طرح‌های CTRL1، CTRL3، MW2 و MG-SF2 انجام شده و در شکل ۱۳ آمده است.

در طرح CTRL1 که بتن توسط آب معمولی و سنگ‌دانه طبیعی ساخته شده است، ساختاری ناهمگون و ناهموار مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-الف). با بررسی طرح CTRL3، از روی شکل ۱۳-ب می‌توان متوجه شد که نا همواری سطح بتن ساخته شده توسط سنگدانه بازیافتی و آب معمولی تقریباً مشابه نمونه CTRL1 می‌باشد. بتن ساخته شده توسط سنگدانه بازیافتی و آب مغناطیسی ده دور و بدون میکروسیلیس (طرح MW2)، دارای یکپارچگی سطح و خلل و فرج نمونه بتنی بسیار کمتر از نمونه CTRL3 می‌باشد (شکل ۱۳-ت). این امر تایید می‌کند که استفاده از آب مغناطیسی منجر به هیدراتاسیون بهتر سیمان شده و بتنی با ساختار یکپارچه و یکنواخت تولید می‌کند که در بحث‌های مقاومتی و دوام نیز منجر به عملکرد بهتر بتن می‌گردد. همچنین نمونه ساخته شده توسط آب مغناطیسی ده دور و ۱۰٪ میکروسیلیس، دارای سطحی نسبتاً صاف و یکنواخت در مقایسه با بقیه طرح‌ها می‌باشد (شکل ۱۳-پ). در این حالت اثر مثبت مصرف میکروسیلیس بر تغییرات میکروساختار بتن ملاحظه می‌شود. این امر دلیل بهبود سایر خواص بتن ساخته شده با جایگزینی درصدی از سیمان با میکروسیلیس می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نمونه‌های متعددی به منظور ارزیابی مشخصات بتن سنگدانه بازیافتی ساخته شده با آب مغناطیسی آزمایش شد. نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها شامل جذب انرژی به روش‌های مختلف، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، مقاومت فشاری، اسلامپ، جذب آب و تصاویر الکترونی است. نتایج بدست آمده در این پژوهش به شرح زیر است:



شکل ۱۲- نمودار بار- جابه‌جایی پیشنهاد شده در روش PCS و نحوه تقسیم آن به دو ناحیه [۳۳، ۳۴]

۸- محاسبه مقاومت نمونه پس از ایجاد ترک (PCS_m)

در ناحیه دوم (پس از بار بیشینه) مربوط به L/M های مختلف

سری	نام طرح	PCS_m (MPa)		
		$L/300$	$L/450$	$L/600$
اول	CTRL1	۳/۱۷۴۹	۳/۷۹۴۸	۴/۱۸۳۸
	CTRL2	۴/۸۲۳۲	۵/۴۲۳۸	۵/۶۰۱۹
	CTRL3	۲/۹۲۲۴	۳/۱۲۵۵	۳/۱۱۳۷
دوم	MW1	۳/۳۳۱۷	۳/۷۰۳۶	۳/۸۲۹۹
	MW2	۳/۵۵۲۴	۳/۹۲۹۷	۴/۰۶۴۴
سوم	SP1	۲/۸۴۸۰	۳/۲۷۳۲	۳/۵۱۴۱
	SP2	۲/۱۳۴۷	۲/۸۰۵۲	۳/۲۷۳۱
	MW-SF1	۳/۰۳۵۴	۳/۸۶۰۱	۴/۵۲۴۲
	MW-SF2	۲/۸۰۱۷	۳/۴۸۷۹	۳/۸۸۹۴
	SP-SF1	۲/۴۸۰۶	۳/۰۷۷۲	۳/۴۳۰۱
	SP-SF2	۲/۵۴۷۰	۳/۲۴۲۴	۳/۷۳۰۲

با مقایسه نتایج PCS_m طرح‌های مختلف، طرح CTRL2 بزرگ‌ترین عدد در مقایسه با طرح CTRL1 و سایر طرح‌ها را از خود نشان می‌دهد. آشکار است که نتایج بقیه طرح‌ها، به طور واضحی به نتایج حاصل از طرح‌های CTRL1 و CTRL2، نزدیک است. با مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌ها پس از ایجاد ترک (PCS_m) در ناحیه‌ی دوم طرح‌های موجود برای L/M های مختلف، مشخص شد که طرح CTRL3 که حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی با آب معمولی بوده، پایین‌ترین نتیجه را از بین همه طرح‌ها داشته است. به طور خلاصه، طرح‌های MW2، SP1، MW-

^۱ Scanning Electron Microscope

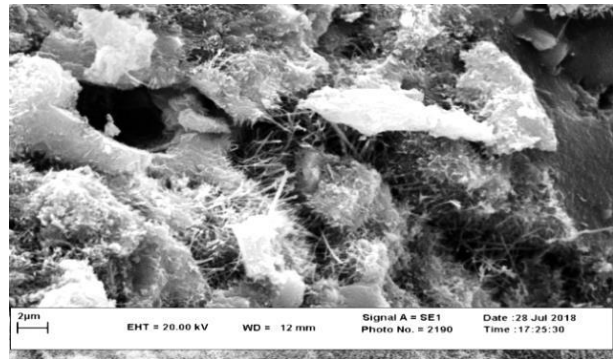
بازیافتی که به طور کامل جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شدند، باعث کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به ترتیب به نسبت‌های ۷۲٪، ۳۴٪ و ۴۱٪ و کاهش دوام به نسبت ۵۳٪ گردید. - ده دور مغناطیسی کردن آب نسبت به یک دور آن، منجر به افزایش مقدارهای مقاومت فشاری، کششی، خمشی، اسلایپ و کاهش جذب آب بتن به ترتیب به نسبت‌های ۱۲٪، ۷٪، ۷٪، ۴۰٪ و ۶٪ در نمونه‌های الیافی بدون میکروسیلیس شده، در حالی که این مقادیرها به ترتیب به ۱۵٪، ۲۹٪، ۳۹٪، ۳۳٪ و ۳٪ در نمونه‌های فاقد الیاف فولادی بوده است. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس این نسبت‌ها به ترتیب به ۴٪، ۱۲٪، ۴٪، ۵۰٪ و ۴٪ در نمونه‌های الیافی و به ۹٪، ۱۹٪، ۱۷٪ (کاهش یافته)، ۲۵٪ و ۴٪ در نمونه‌های بدون الیاف رسیده است.

- افزایش الیاف فولادی باعث افزایش چشمگیر مقاومت کششی بتن بازیافتی گشته و در نتیجه موجب افزایش قابل ملاحظه چقرمگی خمشی بتن و نرمتر شدن رفتار آن می‌گردد. افزایش چقرمگی به معنای افزایش قدرت جذب انرژی می‌باشد؛ که نقش مهمی در نوع شکست بتن نیز ایفا می‌کند. روش‌های PCS و JCSE برای اکثر موارد اندکی دقیقتر از روش ASTM C1018 می‌باشند، افزون بر آن، روش JSCE از بقیه‌ی روش‌ها از لحاظ محاسبه‌ی شاخص چقرمگی بسیار ساده‌تر است. بالاترین شاخص‌های چقرمگی نیز مربوط به نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه بازیافتی و میکروسیلیس در طرح‌های سری سوم بوده که به نمونه‌های کنترلی نزدیک می‌باشد.

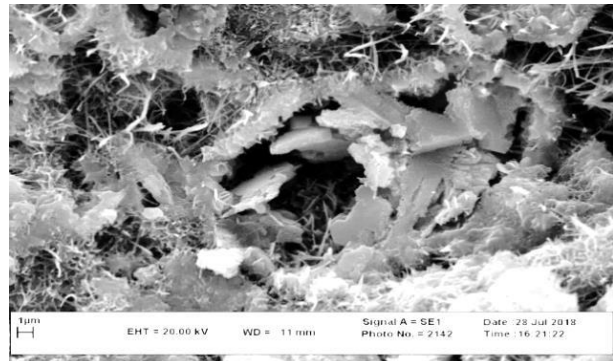
- عکس‌های SEM گرفته شده از نمونه‌های ساخته شده به‌طور کلی تایید می‌کند که استفاده از آب مغناطیسی در ساخت نمونه‌های بتنی منجر به هیدراتاسیون بهتر سیمان شده و در بحث ریزساختار بتنی با ساختار یکپارچه و یکنواخت تولید می‌کند که در بحث‌های مقاومتی و دوام نیز نمایانگر و تایید کننده عملکرد بهتر این نمونه‌ها می‌باشد.

- طرح‌های دارای ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان به همراه آب مغناطیسی ده دور، از بین همه‌ی طرح‌های دارای سنگدانه بازیافتی خواص مکانیکی بهتری داشته به طوری که به طرح‌های کنترلی دارای سنگدانه‌های طبیعی نزدیک بوده است.

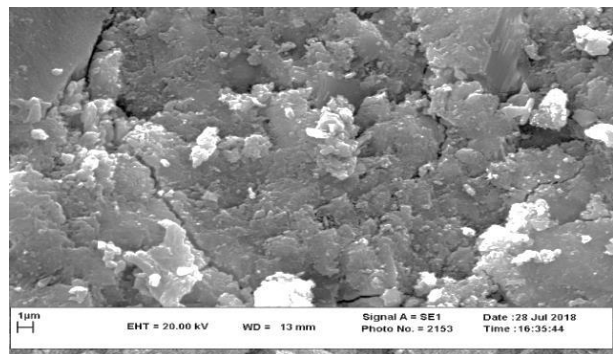
- ده و یک دور مغناطیسی کردن آب مورد استفاده در طرح اختلاط، در بتن فاقد میکروسیلیس (سری دوم) منجر به افزایش



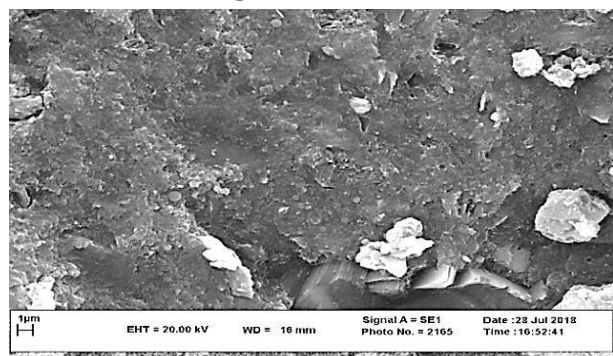
الف- تصویر SEM از طرح CTRL1



ب- تصویر SEM از طرح CTRL3



ت- تصویر SEM از طرح MW2



پ- تصویر SEM از طرح MG-SF2

شکل ۱۳- تصویر SEM از طرح‌های مختلف

- استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی منجر به افزایش حدود ۳۷٪ جذب آب نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بتن معمولی و کاهش اسلایپ به همین مقدار شد. علاوه بر این، استفاده از سنگدانه

ash," Cement and concrete composites, vol. 25, no. 7, pp. 681-688, 2003.

[10] B. E. Jouzdani and M. Reisi, "Effect of magnetized water characteristics on fresh and hardened properties of self-compacting concrete," Construction and Building Materials, vol. 242, p. 118196, 2020.

[11] N. Su, Y.-H. Wu, and C.-Y. Mar, "Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag," Cement and Concrete Research, vol. 30, no. 4, pp. 599-605, 2000.

[12] A. S. Faris, R. Al-Mahaidi, and A. Jadooe, "Implementation of magnetized water to improve the properties of concrete," International Journal Of Civil Engineering and Technology (IJCIET), vol. 5, no. 10, pp. 43-57, 2014.

[13] B. S. K. Reddy, V. G. Ghorpade, and H. S. Rao, "Effect of magnetic field exposure time on workability and compressive strength of magnetic water concrete," Int J Adv Engg Tech/IV/III/July-Sept, vol. 120, p. 122, 2013.

[14] B. S. K. Reddy, V. G. Ghorpade, and H. S. Rao, "Influence of magnetic water on strength properties of concrete," Indian journal of science and technology, vol. 7, no. 1, pp. 14-18, 2014.

[15] A. Shynier et al., "Improving Some of Mechanical Properties of Concrete by Magnetic Water Technology," Ministry of Science and Technology, 2014.

[16] T. Manjupriya and R. Malathy, "Experimental Investigation on Strength and Shrinkage Properties of Concrete Mixed with Magnetically Treated Water," Magnesium, vol. 290, p. 195, 2016.

[17] M. Kawamura and K. Torii, "Reuse of recycled concrete aggregate for pavement," in Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Tokyo, Japan, 1988, pp. 7-11.

[18] Y. Hosokawa, N. Maeda, and T. Hayasaka, "Influence of the time of removing mortar from recycled coarse aggregate on the properties of concrete products using recycled coarse aggregate from waste concrete," Proceedings of CSCE/JSCE International Conference on Engineering Materials, pp. 775-788, 1997.

[19] A. E. Richardson, "Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions," Structural survey, vol. 24, no. 2, pp. 138-153, 2006.

[20] A. Richardson, "Freeze/thaw durability in concrete with fibre additions," Structural Survey, vol. 21, no. 5, pp. 225-233, 2003.

[21] ASTM, "ASTM C150: Standard specification for Portland cement," 2001: ASTM Philadelphia^ePA PA.

۷۶٪ و ۴۰٪ دوام شده است. طرح MW-SF2 حاوی میکروسیلیس

با آب مغناطیسی ده دور از بین همهی طرح‌های حاوی سنگدانه بازیافتی، دوام به مراتب بهتری از خود نشان داده است.

استفاده از آب مغناطیسی در بتن دارای سنگدانه‌ی بازیافتی، به تنهایی نقص‌های ناشی از ضعف این نوع سنگدانه را جبران نمی‌کند. بنابراین آب مغناطیسی نباید به تنهایی به عنوان عامل جبران‌کننده‌ی نقص‌های ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شود و همواره باید همراه با افزودنی‌های مختلف، نظیر افزودنی معدنی میکروسیلیس استفاده شود تا خواص مطلوب در طرح اختلاط بتن حاصل گردد.

۸- مراجع

[1] J. De Brito and N. Saikia, Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste. Springer Science & Business Media, 2012.

[2] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, and R. Degeimbre, "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates," Construction and Building Materials, vol. 23, no. 11, pp. 3382-3387, 2009.

[3] C. Poon, S. Kou, and L. Lam, "Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete," Materials and Structures, vol. 40, no. 9, pp. 981-988, 2007.

[4] K. Eguchi, K. Teranishi, A. Nakagome, H. Kishimoto, K. Shinozaki, and M. Narikawa, "Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction," Construction and Building Materials, vol. 21, no. 7, pp. 1542-1551, 2007.

[5] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, and X. Huang, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)," Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 364-383, 2012.

[6] E. Bormashenko, "Moses effect: Physics and applications," Advances in Colloid and Interface Science, vol. 269, pp. 1-6, 2019.

[7] Y. Wang, H. Wei, and Z. Li, "Effect of magnetic field on the physical properties of water," Results in Physics, vol. 8, pp. 262-267, 2018.

[8] S. Bharath, S. Subraja, and P. A. Kumar, "Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag," J. Chem. Pharmaceutical Sci., vol. 9, no. 4, 2016.

[9] N. Su and C.-F. Wu, "Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly

- [22] C. ASTM, "1240.(2014). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," in American Society for Testing and Materials, pp. 1-7.
- [23] ASTM, "ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete," ed: ASTM Philadelphia, PA, USA, 2011.
- [24] C. ASTM, "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete," 2012.
- [25] C. ASTM, "642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete," Annual book of ASTM standards, vol. 4, p. 02, 2006.
- [26] B. EN, "12390-3: 2009," Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, vol. 19, 2009.
- [27] C. ASTM, "496/C 496M-04," Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2004.
- [28] BS-EN, "1340," Concrete kerb units–Requirements and test methods," British Standards Institution, London, 2003.
- [29] ASTM, "C1018," Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- [30] ASTM, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. ," C31 ASTM International, West Conshohocken., 2012.
- [31] ASTM, "C192/C192M (2014) Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," Annual Book of ASTM Standards, vol. 9, 2014.
- [32] JSCE, "SF-4, Method of Test for Flexural Strength and flexural Toughness of Fiber Reinforced concet: JCI Standard SF-4," 1984: Japan Society of Civil Engineers Tokyo.
- [33] N. Banthia and J.-F. Trottier, "Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition," ACI Materials Journal, vol. 92, pp. 48-48, 1995.
- [34] N. Banthia and M. Sappakittipakorn, "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization," Cement and concrete research, vol. 37, no. 9, pp. 1366-1372, 2007.

The Toughness And Durability Of Recycled Aggregate Concrete Made With Magnetic Water

Ali Abdallah Youssef

PhD Candidate, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

M. Reza Esfahani *

Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

Abstract

In this study, the toughness and durability of concrete with recycled aggregates and magnetic water against melting and freezing cycles and mechanical properties such as compressive and tensile strengths are investigated. Variables include the number of different cycles of water in the magnetic field, different amounts of super-plasticizer, steel fibers and micro-silica. A total of 242 samples were made in 11 different mix designs. It should be noted that half of the samples mentioned contains steel fibers. The results of most experiments have shown that magnetic water, although having a very high effect on the mechanical properties of concrete, should not be used alone as a compensating agent for defects caused by recycled aggregates. Using microsilica as a mineral admixture with magnetic water improves the concrete properties, significantly. The toughness indices were determined by ASTM C1018, JSCE and PCS method and concrete durability test by BS EN 140: 2003. Among the recycled aggregate concrete mixes, the best toughness results were for the samples containing microsilica and steel fibers. Also, ten round magnetic water resulted in an increase in the durability of recycled aggregate concrete by approximately 25% compared to one round of magnetization.

Keywords: Recycled Aggregates concrete, Magnetized Water, Durability, freeze and thawing cycles, Toughness, Steel Fibers.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir

