نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ۱، سال ۱۳۹۷، صفحه ۵ تا ۱۹

نشریه مهندسی سازه و ساخت

www.jsce.ir

تأثیر آب مغناطیسی و پوزولان‌های مختلف بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم

مجید قلهکی[1*]، علی خیرالدین[2]، محمد حج‌فروش[3]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

بتن خودتراکم، بتنی است که می‌تواند در فضای فشرده بین آرماتورها، بدون جداشدگی دانه‌ها جریان یابد و تنها در اثر وزن خود متراکم گردد. هدف از این مقاله، بررسی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی در نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی مواد سیمانی می‌باشد. بدین منظور رفتار بتن خودتراکم در حالت تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان ۵۰ سانتی‌متر(T_{50})، زمان عبور بتن از قیف V، نسبت انسداد در جعبه L و شاخص پایداری چشمی بررسی شده است. خواص بتن سخت شده خودتراکم با تعیین مقاومت‌های فشاری و کششی(شکافت نمونه استوانه‌ای) در سنین ۷ و ۲۸ روز و مشخصه دوام نمونه‌های بتنی با انجام آزمایش درصد جذب آب در سن ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور تأثیر آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا در نتایج، نمونه‌هایی با آب معمولی نیز ساخته شده است. نتایج به دست آمده از بتن تازه در آزمایشگاه نشان می‌دهد که آب مغناطیسی و پوزولان‌های مورد استفاده، موجب بهبود شرایط خودتراکمی بتن از لحاظ جریان‌پذیری و ویسکوزیته می‌شوند. بر این اساس، آب مغناطیسی می‌تواند میزان مورد نیاز کاهنده شدید آب برای بتن خودتراکم را با حفظ جریان اسلامپ، تا ۴۵ درصد کاهش دهد. نتایج بتن سخت شده نیز حاکی از بهبود خواص مقاومتی و پایایی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پوزولان‌های مصرفی می‌باشد. بر این اساس، می‌توان اختلاط حاوی آب مغناطیسی و جایگزینی ۲۰ درصد میکروسیلیس را با افزایش ۴۸ و ۳۵ درصد به ترتیب در مقاومت فشاری و مقاومت کششی و کاهش ۵۵ درصد در میزان جذب آب در سن ۲۸ روزه، به عنوان طرح بهینه انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: آب مغناطیسی، بتن خودتراکم، میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج، خاکستر بادی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: 10.22065/jsce.2017.77396.1073
۱۳۹۵/۱۱/۲۰	۱۳۹۶/۰۱/۱۰	۱۳۹۶/۰۲/۲۳	۱۳۹۶/۰۲/۲۵	۱۳۹۷/۰۳/۳۰	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77396.1073

*نویسنده مسئول: دکتر مجید قلهکی

پست الکترونیکی: mgholhaki@semnan.ac.ir

The effect of magnetic water and different pozzolanic materials on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete

Majid Gholhaki[1*], Ali Kheyroddin[2], Mohammad Hajforoush[3]

1- Associate Professor., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
3- PhD candidate in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Self-compacted concrete (SCC) is a concrete that can flow in the space between reinforcement without separation and compact only by their own weight. In this study, the effect of using silica fume, metakaolin, rice husk ash and fly ash with different ratios of 10% and 20% by weight of cement in self-compacting concrete containing magnetic water is concerned. The fresh properties of self-compacted concrete were tested by means of slump flow, T_{50}, V-funnel, L-box and visual stability index (VSI). The hardened properties were assessed using compressive strength at the ages of 7 and 28 days. Also splitting tensile strength and water absorption test were assessed at the age of 28 days. In addition, concrete specimens were made using tap water and magnetic water was passed through a magnetic field of 0.8 Tesla. The results show that pozzolanic materials are suitable in properties of self-compacting concrete containing magnetic water in terms of flow ability and viscosity. Moreover, magnetic water can reduce the amount of superplasticizer, required for SCC, up to 45%. Also the results of hardened SSC show an improvement in mechanical and durability properties of concrete. The usage of silica fume with ratio 20% by weight of cement in self-compacting concrete containing magnetic water, increases the compressive and splitting tensile strengths by 48% and 35% respectively and decreases amount of water absorption by 55% at the age of 28 days.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Received: 08/02/2017
Revised: 30/03/2017
Accepted: 13/05/2017

Keywords:
Magnetic Water
Self-Compacted Concrete
Silica Fume
Metakaolin
Rice Husk Ash
Fly Ash

doi: 10.22065/jsce.2017.77396.1073

*Corresponding author: Dr. Majid Gholhaki.
Email address: mgholhaki@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

توسعه بتن به عنوان یکی از مهمترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خواص بتن به عنوان یک ماده مرکب همواره تحت تأثیر مشخصات مصالح تشکیل دهنده آن و شرایط عمل‌آوری مربوط به زمان بعد از ساخت بتن می‌گردد. امروزه با توجه به ضوابط مشخصی که برای طراحی و ساخت بتن وجود دارد، دغدغه اصلی در احداث سازه‌های بتنی، کیفیت بتن در اجراست. از طرفی بخش عمده هزینه‌های یک پروژه ناشی از نیروی کار انسانی است. به همین دلیل امروزه دیدگاه جهانی به سمت کاهش نیروی انسانی مورد نیاز در ساخت و سازهای عمرانی پیش می‌رود. از جمله عواملی که در پروژه‌های عمرانی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود، عملیات تراکم بتن است. در یک نگاه کلی می‌توان ظهور بتن خودتراکم را در جهت جبران مسئله فوق دانست. مفهوم بتن خودتراکم اولین بار در سال ۱۹۸۶ در پی مسئله دوام در سازه‌های بتنی و اینکه علت اصلی ضعف این سازه‌ها در عدم کیفیت بتن اجرایی است، پیشنهاد شد [۱]. نمونه اولیه این بتن، در سال ۱۹۸۸ در ژاپن و در دانشگاه توکیو با اسلامپ بیشتر از ۶۲۰ میلی‌متر ساخته شد [۲]. بتن خودتراکم، بتن تازه‌ای است که سه ویژگی، توانایی جریان یافتن تحت وزن خود، پر کردن فضای موردنیاز یا قالب به طور کامل و ایجاد یک مخلوط چگال و به اندازه کافی همگن را بدون نیاز به عملیات تراکم همزمان داشته باشد(رفتاری شبیه مایع نیوتنی). از مزایای بتن خودتراکم می‌توان به افزایش سرعت اجرای بتن‌ریزی و در نتیجه کاهش زمان ساخت سازه و صرفه جویی اقتصادی به ویژه در المان‌های افقی مانند دال‌ها [۳]، کاهش آلودگی صوتی ناشی از ویبره کردن و فراهم کردن امکان بتن‌ریزی در شب در مناطق شهری [۴]، امکان ساخت سازه‌های بتنی ویژه، مانند بتن‌ریزی در زیر آب [۴] اشاره کرد. بنابراین دور از ذهن نیست که بتن خودتراکم، بتن آینده باشد.

کیفیت آب مورد استفاده در ساخت بتن به طور مستقیم روی خواص مهندسی آن تأثیر می‌گذارد. مغناطیسی کردن آب از جمله روش‌هایی است که با تغییر در خواص مولکولی، می‌تواند موجب بهبود کیفیت آب مورد استفاده در بتن گردد. آبی که از طریق گذراندن از میدان مغناطیسی به دست می‌آید، نه در ظاهر، بلکه در ساختار مولکولی خود دچار دگرگونی‌هایی می‌شود. جوشی و کامات [۵] گزارش کردند که تأثیر میدان مغناطیسی بر پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب باعث می‌شود که برخی از خواص فیزیکی آب از جمله چگالی، کشش سطحی و هدایت الکتریکی تغییر کند. القای میدان مغناطیسی روی مولکول‌های آب موجب می‌شود که اجتماع مولکولی آب کوچک شده و تعداد مولکول‌های بیشتری بتوانند در واکنش هیدراتاسیون سیمان شرکت کنند [۶]. در فرآیند هیدراتاسیون، حضور آب مغناطیسی سبب می‌شود، ذرات سیمان به وسیله یک لایه تک مولکولی آب با چگالی و کشش سطحی کمتر احاطه شوند که در نتیجه با افزایش سرعت واکنش و کاهش آب مصرفی، فرآیند هیدراتاسیون کامل‌تری رخ می‌دهد [۷-۸]. استفاده از آب مغناطیسی باعث می‌شود تا ضمن صرفه جویی در مصرف سیمان به میزان ۵ درصد، مقاومت بتن در برابر آب‌انداختگی و یخزدگی افزایش یابد [۹-۱۰]. تحقیقات بسیاری نشان دادند که آب مغناطیسی، خواص مهندسی بتن را بهبود می‌بخشد [۱۱-۱۲]. افشین و همکاران [۱۳] در تحقیق خود بر روی خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا حاوی آب مغناطیسی نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی، مقدار اسلامپ و مقاومت فشاری بتن را به ترتیب به میزان ۴۵ و ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. آنها همچنین گزارش کردند که در صورت بکارگیری آب مغناطیسی می‌توان به ازای اسلامپ و مقاومت فشاری یکسان، مقدار سیمان مصرفی را تا ۲۸ درصد کاهش داد. تأثیر آب مغناطیسی روی خواص بتن حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی [۱۴] و خاکستر بادی [۱۵] توسط سو و همکاران در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ انجام شد. آنها گزارش کردند که آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۳۵ تسلا می‌تواند، ۹ الی ۱۹ درصد مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. تحقیقات جدید در زمینه تأثیر میدان مغناطیسی متناوب در بتن ریزدانه [۱۶] و تیرهای بتن‌آرمه کوچک مقیاس [۱۷]، از بهبود خواص مقاومتی بتن حکایت دارد. بنابراین تکنولوژی مغناطیس موجب می‌شود که خواص مهندسی بتن بدون اضافه کردن هرگونه ماده شیمیایی و آلودگی زیست محیطی بهبود یابد.

استفاده از مواد پودری(پرکننده) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، کاهش آلودگی زیست محیطی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهره‌مندی از محصولات جانبی کارخانجات تولیدی، موجب بهبود خواص مقاومتی و پایایی بتن شود [۱۸-۱۹]. طبق شیوه‌نامه EFNARC [۲۰]، عبارت پودر به عناصری از بتن خودتراکم اطلاق می‌شود که دارای قطر کوچکتر از ۱۲۵ μm هستند که شامل کسری از ماسه، سیمان و پرکننده می‌شود. مواد افزودنی مانند خاکستر بادی، پودر سنگ آهک، سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس به طور موفقیت آمیزی در بتن خودتراکم استفاده شده‌اند [۲۲-۲۱]. تحقیقات مقصودی و همکاران [۲۳] در زمینه بتن

خودتراکم حاوی ذرات نانو نیز، حکایت از تأثیر بالای این مواد در کاهش فضای خالی و تورم بتن خودتراکم دارد. در مطالعه جلال و همکاران [۲۴] بر روی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس، کاهش درصد جذب آب، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش ارتفاع نفوذ یون کلر گزارش شد. ثابت و همکاران [۲۵] گزارش کردند که وجود ۱۰ و ۲۰ درصد میکروسیلیس، باعث افزایشی به ترتیب ۲۲ و ۲۸ درصد در مقاومت فشاری بتن خودتراکم می‌شود. آنها همچنین گزارش دادند که جذب آب نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر است. مطالعات مختلف [۲۷-۲۶] درباره تأثیر خاکستر بادی بر روی عملکرد بتن خودتراکم نشان می‌دهد که خاکستر بادی موجب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. مشابه نتایج فوق، مطالعه‌ای بر روی عملکرد بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی توسط خطیب [۲۸] گزارش شده است. نتایج پژوهش وی نشان داد که با افزایش میزان خاکستر بادی، درصد جذب آب بتن افزایش می‌یابد. جلال و همکاران [۲۹] نشان دادند که استفاده از خاکستر بادی در درصدهای مختلف ۵ تا ۱۵ درصد، موجب بهبود روانی بتن خودتراکم می‌گردد. از طرفی خاکستر بادی، جذب آب و نفوذ یون کلر بتن را کاهش می‌دهد. آنها همچنین گزارش کردند که خاکستر بادی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه را نسبت به بتن مبنا کاهش می‌دهد، اما تأثیری روی مقاومت کششی(شکافت نمونه استوانه‌ای) ندارد. پون و همکاران [۳۰] گزارش کردند که خواص پوزولانی متاکائولن موجب تسریع روند کسب مقاومت در سنین اولیه و همچنین بهتر شدن وضعیت تخلخل خمیر سیمان در مقایسه با پرکننده‌هایی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی می‌گردد. اگرچه در یک نسبت جایگزینی یکسان، بتن حاوی متاکائولن، مقاومت ۲۸ روزه مشابهی نسبت به بتن حاوی میکروسیلیس دارد. تأثیر متاکائولن بر خواص بتن خودتراکم در مقایسه با میکروسیلیس توسط حسن و همکاران [۳۱] انجام شده است. آنها گزارش کردند که متاکائولن سبب افزایش ویسکوزیته پلاستیک بتن می‌گردد، در حالیکه میکروسیلیس تأثیری بر ویسکوزیته ندارد. آنها همچنین وجود متاکائولن را سبب افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذ یون کلر و افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ذوب یخ اعلام کردند. در تحقیقی که بر روی بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج انجام شده است، مدندوست و همکاران [۳۲] نتیجه گرفتند که واکنش پوزولانیک خاکستر پوسته شلتوک برنج در سنین پایین کم بوده و با افزایش سن پس از گذشت ۲۷۰ روز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت بتن خواهد داشت.

از آنجا که پژوهش‌ها در زمینه استفاده از آب مغناطیسی در بتن خودتراکم در ابتدای راه خود می‌باشد، لذا مطالعات هرچه بیشتری در این زمینه احساس می‌شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی می‌باشد. خواص بتن تازه به وسیله آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان ۵۰ سانتی‌متر(T_{50})، زمان عبور بتن از قیف V، نسبت انسداد در جعبه L و شاخص پایداری چشمی بررسی می‌گردد. خواص بتن سخت شده خودتراکم با تعیین مقاومت‌های فشاری و کششی(شکافت نمونه استوانه‌ای) و مشخصه دوام با انجام آزمایش درصد جذب آب در سن ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه، سیمان پرتلند تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳/۱۵ و پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی به عنوان مصالح جایگزین سیمان با وزن‌های مخصوص به ترتیب ۲/۳۲، ۲/۶، ۲/۰۹ و ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جدول ۱، مشخصات شیمیایی این مصالح ارائه شده است. مصالح درشت‌دانه از نوع شکسته با حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب ۱/۱ درصد و مصالح ریزدانه شامل ماسه رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب ۲/۲۵ درصد می‌باشد. آب مورد استفاده در چرخه اختلاط بتن، به دو صورت آب مغناطیسی شده با شدت میدان ۰/۸ تسلا و آب معمولی می‌باشد. در تمامی اختلاط‌ها به منظور رسیدن به حد روانی مورد نیاز EFNARC [۲۰]، از کاهنده شدید آب بر پایه کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق استاندارد ASTM C494 استفاده شده است.

جدول۱ : ترکیبات شیمیایی سیمان و پرکننده‌ها.

XRF*	PC*	SF*	MK*	RHA*	FA*
SiO2	۲۲/۴۵	۹۵/۲۳	۵۴/۵	۹۱/۲۶	۶۰/۱
Al2O3	۴/۸۵	۱/۲۱	۳۴/۶۳	۰/۹۴	۲۴/۶
Fe2O3	۳/۹۵	۰/۹۱	۱/۴۲	۰/۳۷	۵/۱
CaO	۶۴/۸۶	۰/۶۳	۰/۲۸	۲/۱۵	۷/۶۱
MgO	۰/۸	۰/۹۸	۰/۳	۰/۸۸	۰/۷۴
SO3	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۲۲	-	۰/۱
K2O	۰/۵۱	۱/۰۳	۰/۳۴	۰/۹۸	-
Na2O	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۱	۰/۴۶	۳/۲۳

*XRF : آنالیز شیمیایی مصالح، *PC : سیمان پرتلند، *SF : میکروسیلیس، *MK : متاکائولن، *RHA : خاکستر پوسته شلتوک برنج و FA: خاکستر بادی.

۲-۲- نسبت‌های اختلاط و شرایط آزمایش

به منظور دستیابی به اهداف این مطالعه، ده اختلاط متفاوت شامل بتن خودتراکم در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۷ و میزان کل مواد سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب طراحی گردید. دو اختلاط مبنا با آب معمولی(NW) و آب مغناطیسی(MW) ساخته شده‌اند. هشت اختلاط دیگر شامل آب مغناطیسی و پرکننده‌های میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی در دو نسبت جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد. جزئیات اختلاط نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا شن و ماسه به مدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شدند. سپس نصف آب مصرفی به مدت ۱ دقیقه به بتونیر اضافه گردید. پس از این مرحله، بتونیر به مدت ۱ دقیقه خاموش شد تا سنگدانه‌ها آب لازم را جذب نمایند. سپس سیمان و پرکننده‌ها اضافه شده و ۱ دقیقه دیگر اختلاط انجام گردید. در حالیکه بتونیر به مدت ۳ دقیقه روشن بود، مابقی آب مصرفی و ماده افزودنی کاهنده شدید آب به مخلوط اضافه گردید. این روند مشابه روش اختلاط خیاط و همکاران [۳۳] برای تولید بتن خودتراکم می‌باشد. بتن‌های ساخته شده ابتدا تحت آزمایش‌های بتن تازه قرار گرفته و سپس به منظور تعیین مقاومت فشاری و میزان جذب در قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و جهت تعیین مقاومت کششی در قالب‌های استوانه‌ای۳۰×۱۵ سانتی‌متری ریخته شدند. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا سن آزمایش در داخل آب با دمای ۲۱±۲°C نگهداری شدند. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز و آزمایش مقاومت کششی(شکافت نمونه استوانه‌ای) در سن ۲۸ روز به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C39 و ASTM C496 انجام پذیرفت. میزان جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C642 اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

۳-۱- خواص بتن تازه خودتراکم

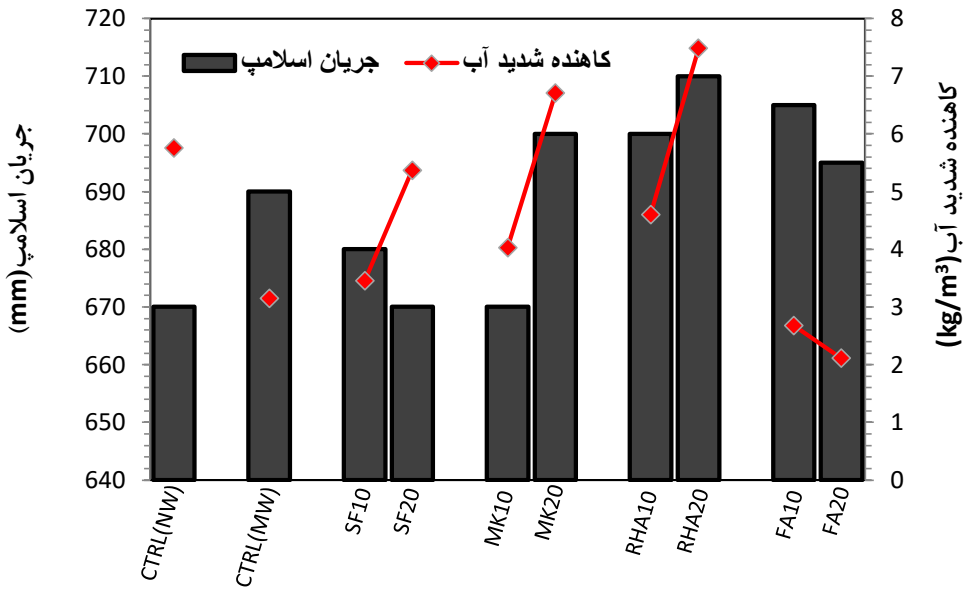
به منظور تأمین ویژگی‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم، آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان T_{50}، زمان عبور بتن از قیف V، توانایی عبور(نسبت انسداد) در جعبه L و شاخص پایداری چشمی در فاز خمیری بتن خودتراکم انجام شد. در این پژوهش، تمامی نتایج به دست آمده از فاز خمیری، محدوده مجاز EFNARC [۲۰] برای پذیرش بتن خودتراکم را تأمین نمود. در نتیجه تمامی نمونه‌های ساخته شده از لحاظ خواص خودتراکمی بتن، مناسب ارزیابی شدند.

جدول۲ : جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در آزمایشگاه(kg/m^3).

شماره طرح	نام اختلاط	سیمان	میکروسیلیس (SF)	متاکائولن (MK)	خاکستر پوسته برنج (RHA)	خاکستر بادی (FA)	آب	شن	ماسه	کاهنده شدید آب
۱	CTRL(NW)	۴۰۰	-	-	-	-	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۸۵	۵/۷۵
۲	CTRL(MW)	۴۰۰	-	-	-	-	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۸۵	۳/۱۵
۳	SF10	۳۶۰	۴۰	-	-	-	۱۴۸	۷۶۶	۱۰۶۹	۳/۴۵
۴	SF20	۳۲۰	۸۰	-	-	-	۱۴۸	۷۶۱	۱۰۶۲	۵/۳۷
۵	MK10	۳۶۰	-	۴۰	-	-	۱۴۸	۷۶۸	۱۰۷۱	۴/۰۳
۶	MK20	۳۲۰	-	۸۰	-	-	۱۴۸	۷۶۵	۱۰۶۷	۶/۷۱
۷	RHA10	۳۶۰	-	-	۴۰	-	۱۴۸	۷۶۴	۱۰۶۶	۴/۶۰
۸	RHA20	۳۲۰	-	-	۸۰	-	۱۴۸	۷۵۷	۱۰۵۶	۷/۴۸
۹	FA10	۳۶۰	-	-	-	۴۰	۱۴۸	۷۶۷	۱۰۷۰	۲/۶۸
۱۰	FA20	۳۲۰	-	-	-	۸۰	۱۴۸	۷۶۴	۱۰۶۵	۲/۱۱

۳-۱-۱- جریان اسلامپ

تغییرات میزان جریان اسلامپ و مصرف ماده افزودنی کاهنده شدید آب برای تمامی اختلاط‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. تمامی اختلاط‌ها دارای جریان اسلامپی در محدوده ۷۱۰-۶۷۰ میلی‌متر با تنظیم مقدار کاهنده شدید آب از ۲/۱۱ تا ۷/۴۸ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند. همانگونه که از شکل ۱ مشاهده می‌گردد، افزودن میکروسیلیس، میزان کاهنده شدید آب را برای نگه داشتن مخلوط در محدوده قابل قبول جریان اسلامپ، افزایش می‌دهد. مطابق این شکل، استفاده از آب مغناطیسی ضمن کاهش کاهنده شدید آب به میزان ۴۵ درصد، موجب افزایش جریان اسلامپ به میزان ۳ درصد می‌گردد. دلیل آن می‌تواند آزادی عمل بیشتر مولکول‌های آب مغناطیسی در میان ذرات سیمان نسبت به آب معمولی باشد. جایگزینی ۲۰ درصد میکروسیلیس، میزان کاهنده شدید آب را بیش از ۳۱ درصد افزایش می‌دهد. این در حالی است که میزان جریان اسلامپ ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. این نتیجه توسط ثابت و همکاران [۲۵] نیز ارائه شده بود. تحقیقات گوئیسی [۲۶] نیز در همین راستا می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند سطح مخصوص ویژه بالای ذرات میکروسیلیس نسبت به ذرات سیمان و در نتیجه افزایش جذب کاهنده شدید آب و کاهش جریان‌پذیری مخلوط‌های سیمانی باشد. همچنین شکل ۱ نشان می‌دهد که مصرف بیشتر کاهنده شدید آب در اختلاط‌های حاوی متاکائولن، جریان پذیری را افزایش داده است. بر اساس نتایج به دست آمده، جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولن موجب افزایش ۲۰ درصدی در مصرف کاهنده شدید آب در مقایسه با نمونه‌های حاوی میکروسیلیس گردید. اگرچه جریان‌پذیری نیز افزایش یافته است. نتیجه مشابه برای بتن خودتراکم توسط مدندوست و موسوی [۳۴] به دست آمده است. افزودن خاکستر پوسته شلتوک برنج نسبت به تمامی اختلاط‌ها، مصرف کاهنده شدید آب را افزایش می‌دهد. پایین بودن وزن مخصوص خاکستر پوسته شلتوک برنج موجب می‌شود که نسبت حجمی مواد سیمانی افزایش یابد. در نتیجه با افزایش اصطکاک بین ذره‌ای، ویسکوزیته پلاستیک افزایش می‌یابد. این نتیجه توسط صفی‌الدین و همکاران [۳۵] نیز گزارش شده است. همانگونه که از شکل ۱ مشاهده می‌گردد، خاکستر بادی تقاضا برای کاهنده شدید آب را کاهش داده است. شکل کروی ذرات خاکستر بادی، اصطکاک بین سنگدانه و خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. بنابراین جریان‌پذیری مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی افزایش می‌یابد. البته در بعضی اختلاط‌ها، مصرف بیشتر کاهنده شدید آب موجب افزایش جریان‌پذیری می‌گردد. این موضوع در مطالعه جلال و همکاران [۲۹] نیز اشاره شده بود. گزارشی توسط لیبره و همکاران [۳۶] نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۰-۵۰ درصد خاکستر بادی، جریان‌پذیری ملات خودتراکم را افزایش می‌دهد.

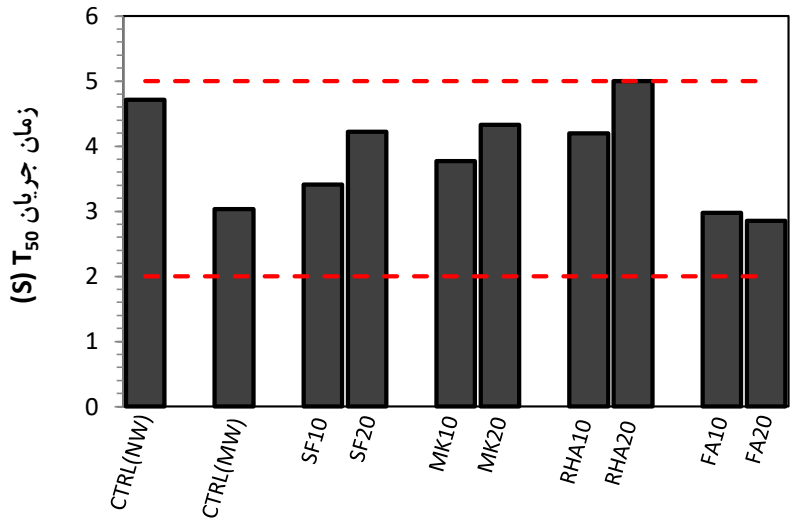


شکل۱ : تغییرات جریان اسلامپ و کاهنده شدید آب برای بتن خودتراکم.

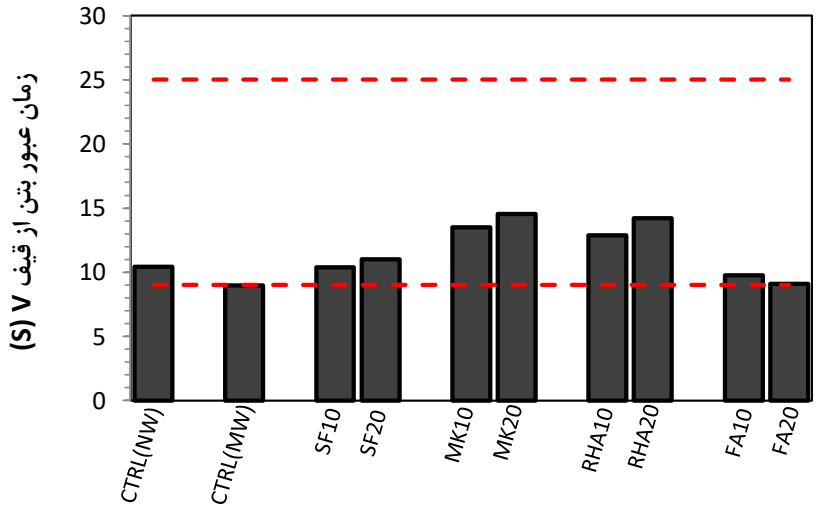
۳-۱-۲- زمان جریان T_{50} و زمان عبور بتن از قیف V

مدت زمان اندازه‌گیری شده از لحظه بالا کشیدن مخروط ناقص در آزمایش جریان اسلامپ تا رسیدن جریان به قطر ۵۰ سانتی‌متر را که اصطلاحاً، T_{50} می‌نامند، اطلاعاتی درباره ویسکوزیته مخلوط به دست می‌دهد. مقادیر زمان جریان T_{50} برای اختلاط‌های مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. این زمان برای طرح‌های متفاوت در محدوده ۵/۸۹-۲/۸۵ ثانیه می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده، افزودن پرکننده‌های مورد استفاده به غیر از خاکستر بادی، زمان جریان را افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل قدرت بالای جذب آب این مواد باشد که منجر به افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش جریان‌پذیری مخلوط می‌گردد.

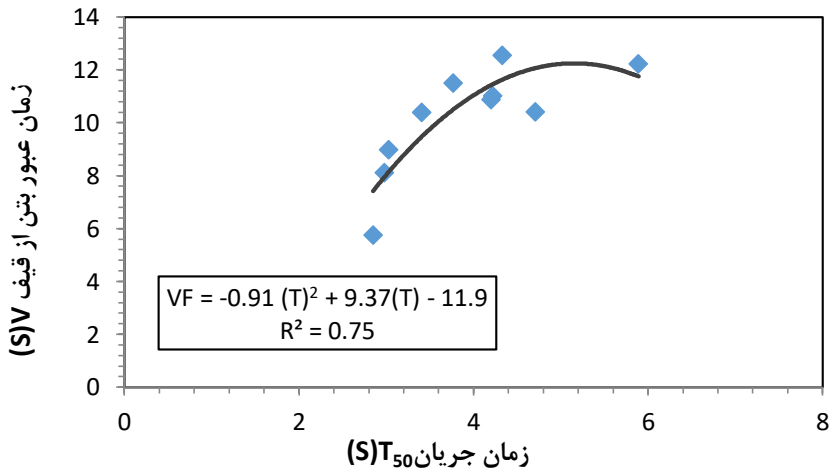
زمان عبور بتن از قیف V برای اختلاط‌های متفاوت در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این آزمایش، مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه‌گیری می‌شود و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و ویسکوزیته پلاستیک بتن تازه مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند جایگزینی برای آزمایش T_{50} باشد. این زمان برای تمامی طرح‌ها، روندی مشابه زمان جریان T_{50} دارد. براساس شکل‌های ۲ و ۳، آب مغناطیسی با کاهش زمان جریان، ویسکوزیته بتن خودتراکم را کاهش و حضور پرکننده‌ها، این زمان را افزایش می‌دهد. این نتایج، در راستای مطالعات سایر محققان می‌باشد. برای مثال، مطالعه حسن و همکاران [۳۱] نشان می‌دهد که حضور متاکائولن موجب افزایش زمان عبور بتن خودتراکم از قیف V می‌گردد. این افزایش زمان به دلیل افزایش ویسکوزیته مخلوط در حضور متاکائولن می‌باشد. در شکل ۴ رابطه بین زمان جریان T_{50} و زمان عبور بتن از قیف V برای نمونه‌های متفاوت بتن خودتراکم نشان داده شده است. در این رابطه، زمان عبور بتن خودتراکم از قیف V با VF و زمان جریان T_{50} با T نشان داده شده است. این رابطه با ضریب همبستگی بالایی برقرار است.



شکل۲ : تغییرات زمان جریان T_{50} برای بتن خودتراکم.



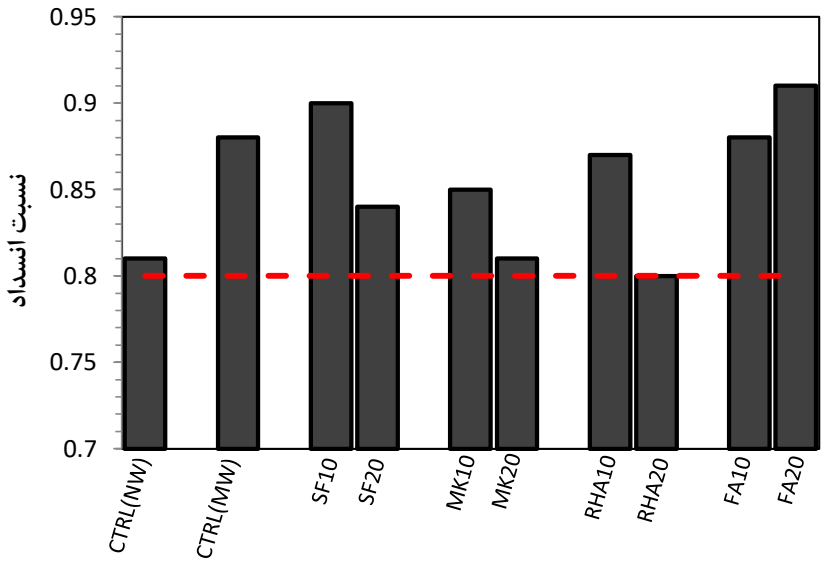
شکل۳ : تغییرات زمان عبور بتن از قیف v برای بتن خودتراکم.



شکل۴ : رابطه زمان عبور بتن از قیف V و زمان جریان T_{50} برای بتن خودتراکم.

۳-۱-۳- توانایی عبور(نسبت انسداد) در جعبه L

نسبت انسداد طرح‌های حاوی پرکننده‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. در این آزمایش، هدف یافتن حجمی از بتن است که اجازه یافته از بین میلگردهایی که در سر راه آن در جعبه L قرار گرفته‌اند، عبور کند. نسبت انسداد در تمامی طرح‌ها در محدوده ۰/۰-۸/۹۱ می‌باشد. EFNARC [۲۰]، نسبت انسداد پایین‌تر از ۰/۸ را برای تولید بتن خودتراکم مجاز نمی‌داند. بنابراین تمامی اختلاط‌های طراحی شده، ضوابط پذیرش این موسسه را تأمین می‌کنند. بر اساس نتایج به دست آمده، آب مغناطیسی قادر است، میزان توانایی عبور بتن خودتراکم در جعبه L را بیش از ۸ درصد افزایش دهد. این میزان در حضور پوزولان خاکستر بادی به بیش از ۱۲ درصد می‌رسد.



شکل۵ : تغییرات نسبت انسداد(توانایی عبور) در جعبه L برای بتن خودتراکم.

۳-۱-۴- شاخص پایداری چشمی

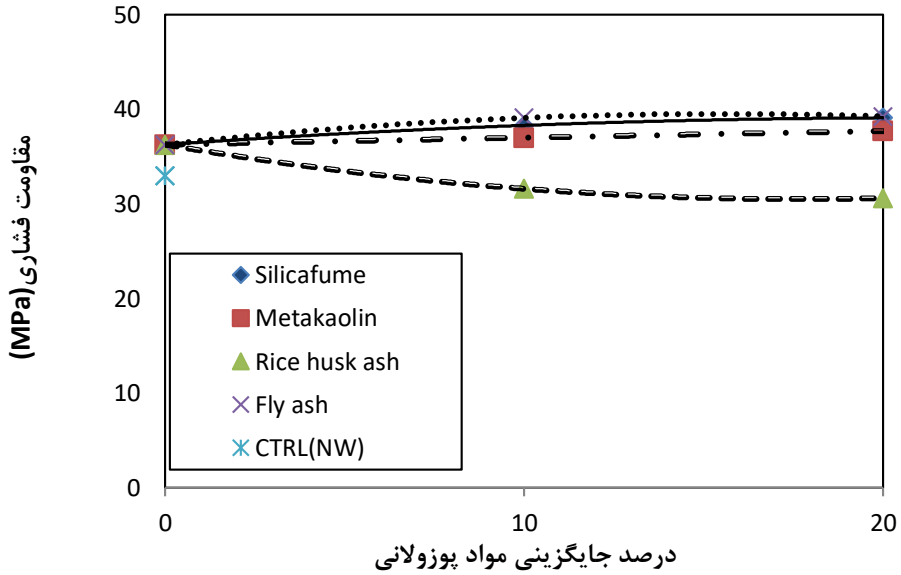
جداشدگی سنگدانه‌ها و آب‌انداختگی بتن خودتراکم از جمله عواملی هستند که باید در حین ساخت و انتقال بتن رخ ندهند. زیرا این عوامل به شدت بر روی مشخصه‌های مقاومت و دوام بتن خودتراکم تأثیر می‌گذارند. شاخص پایداری چشمی به عنوان ساده‌ترین روش برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم توسط ناظر انجام می‌شود. در این پژوهش، تمامی اختلاط‌ها دارای شاخص صفر یا یک بر اساس موسسه EFNARC[۲۰] بوده‌اند که نشان از پایداری بالای مخلوط‌های ساخته شده می‌باشد.

۳-۲- خواص بتن سخت شده خودتراکم

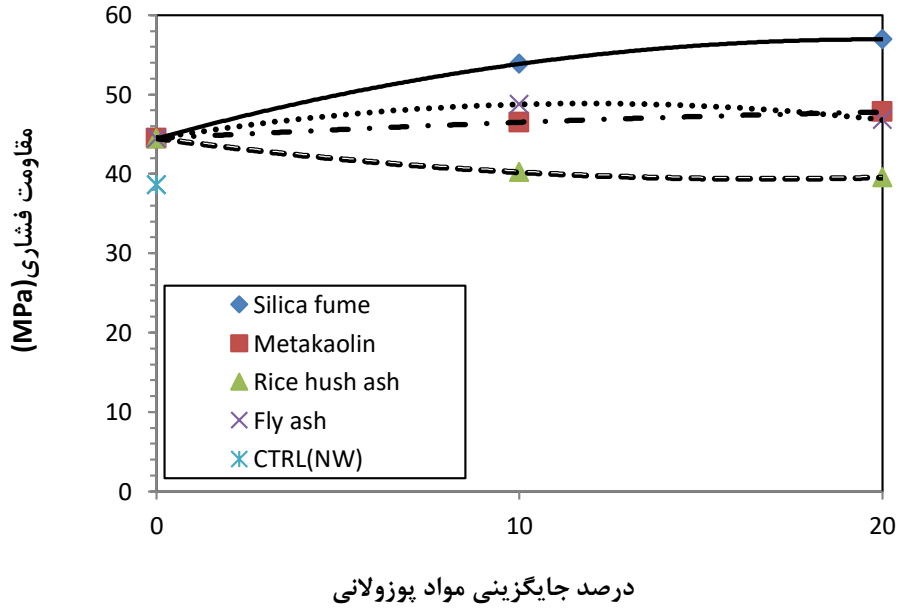
۳-۲-۱- مقاومت فشاری

روند کسب مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پرکننده‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، آب مغناطیسی موجب افزایش ۱۰ و ۱۵ درصدی در مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه شده است که دلیل آن می‌تواند تکمیل شدن فرآیند هیدراتاسیون سیمان باشد. افشین و همکاران [۱۳] در تحقیق خود روی بتن با مقاومت بالا گزارش کردند که آب مغناطیسی مقاومت فشاری بتن را ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. تحقیقات سو و همکاران [۱۴-۱۵] نیز در همین راستا می‌باشد. مطابق شکل ۶، بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی در درصدهای مختلف جایگزینی، مقاومت

فشاری ۷ روزه بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین جایگزینی پرکننده‌های مختلف به جز خاکستر پوسته شلتوک برنج، موجب افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه می‌گردد. نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج در سطح جایگزینی ۲۰ درصد، دارای کمترین مقاومت نسبت به نمونه‌های کنترل هستند. این نشان دهنده فعال نشدن خاصیت پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک برنج در سنین اولیه می‌باشد. از میان تمامی پرکننده‌ها، نمونه‌های حاوی آب مغناطیسی و خاکستر بادی دارای بیشترین مقاومت فشاری کسب شده به میزان بیش از ۸ درصد نسبت به نمونه‌های با آب مغناطیسی تنها و بیش از ۱۵ درصد نسبت به نمونه‌های با آب معمولی می‌باشد. این افزایش مقاومت فشاری می‌تواند به دلیل پر شدن فضاهای خالی خمیر سیمان از طریق ذرات بسیار کوچک خاکستر بادی نسبت به ذرات سیمان و همچنین فعالیت پوزولانی آن باشد [۲۵]. بر اساس شکل‌های ۶ و ۷، سیر صعودی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی آب مغناطیسی و میکروسیلیس در درصدهای بالای جایگزینی، بیشتر است.



شکل۶ : مقاومت فشاری بتن خودتراکم در سن ۷ روزه.



شکل۷ : مقاومت فشاری بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه.

بیشترین افزایش مقاومت فشاری برای درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی نسبت به بتن کنترل حاوی آب مغناطیسی به ترتیب حدود ۲۸، ۸، ۹- و ۱۰ درصد نتیجه شده است. این نتایج نسبت به بتن کنترل حاوی آب معمولی به ترتیب ۴۸، ۲۴، ۴ و ۲۶ درصد می‌باشد. بنابراین تأثیر آب مغناطیسی روی کسب مقاومت فشاری نمونه‌ها مشهود است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی آب مغناطیسی و میکروسیلیس دارای بیشترین مقدار نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. ترکیب آب مغناطیسی و میکروسیلیس، مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نسبت به نمونه کنترل با آب مغناطیسی حدود ۲۲ درصد و نسبت به نمونه کنترل با آب معمولی حدود ۳۲ درصد افزایش می‌دهد. این افزایش مقاومت را می‌توان به دلیل خاصیت پرکنندگی ذرات میکروسیلیس و در نتیجه ایجاد یک ساختار سیمانی فشرده‌تر دانست [۲۵]. مقاومت فشاری کسب شده نمونه‌های حاوی متاکائولن در سطح جایگزینی ۲۰ درصد از نمونه‌های حاوی خاکستر بادی بیشتر است. این نتیجه مشابه نتایج مطالعات گوئیسی و همکاران [۲۶] و پون و همکاران [۳۰] می‌باشد.

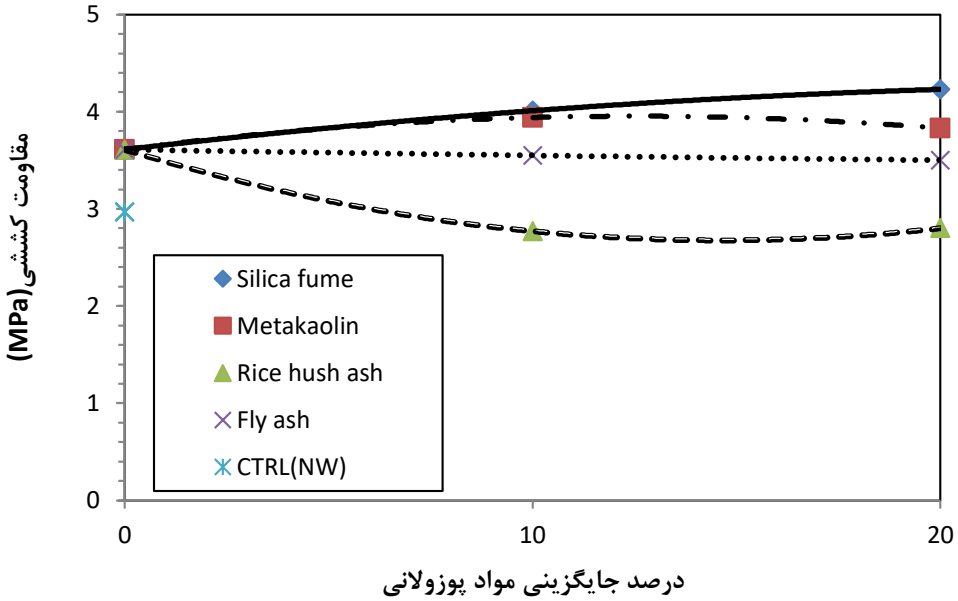
۳-۲-۲- مقاومت کششی (شکافت نمونه استوانه‌ای)

نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پوزولان‌های مختلف در سن ۲۸ روزه در شکل ۸ ارائه شده است. مقاومت کششی در تمامی نمونه‌ها در محدوده ۲/۴-۷۷/۲۳ MPa می‌باشد. بیشترین افزایش مقاومت کششی برای درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی نسبت به بتن کنترل حاوی آب مغناطیسی به ترتیب حدود ۱۸، ۱۰، ۲۲- و ۲ درصد نتیجه شده است. این نتایج نسبت به بتن کنترل حاوی آب معمولی به ترتیب ۳۴، ۲۵، ۱۱- و ۱۳ درصد می‌باشد. لذا نتایج نشان می‌دهد که مشابه روند افزایش مقاومت فشاری، آب مغناطیسی روی مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم نیز تأثیر مثبتی دارد. بر این اساس، آب مغناطیسی به تنهایی قادر است، مقاومت کششی بتن خودتراکم را حدود ۱۵ درصد افزایش دهد. همانگونه که از شکل ۸ مشاهده می‌گردد، مقاومت کششی نمونه‌های مختلف تقریباً روندی مشابه مقاومت فشاری آنها دارد. در این میان تنها نمونه‌های حاوی خاکستر بادی، مقاومت کششی کمتری از خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که افزودن خاکستر بادی تأثیری در افزایش مقاومت کششی ندارد. موضوعی که جلال و همکاران [۲۹] نیز در مطالعات خود به آن رسیدند.

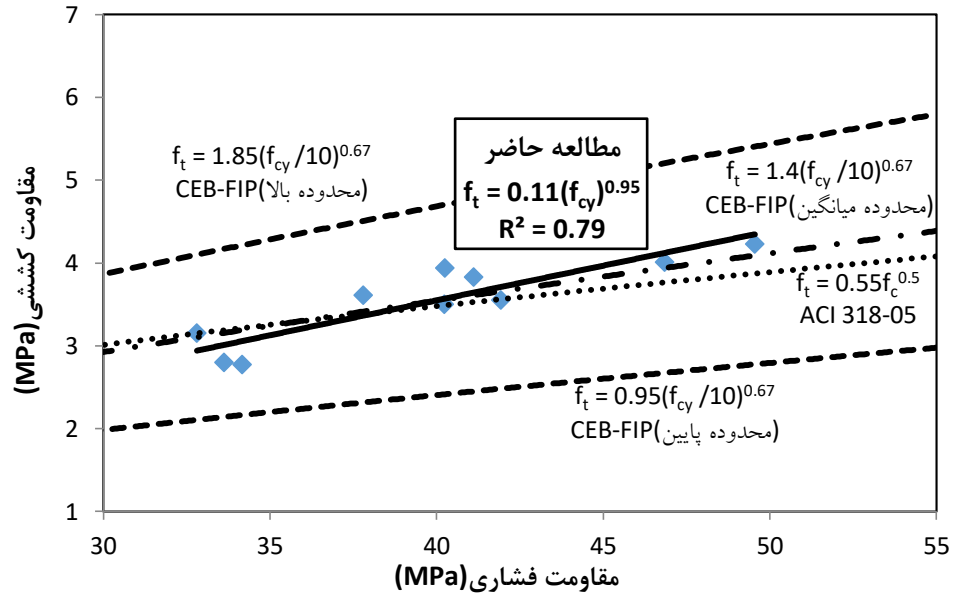
یکی از نقاط ضعف بتن، مقاومت کششی پایین‌تر آن نسبت به مقاومت فشاری می‌باشد. لذا ارزیابی و تعیین رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقاومت کششی بر مبنای مقاومت فشاری، همواره مورد توجه می‌باشد. بدین منظور در شکل ۹، تغییرات مقاومت فشاری استوانه‌ای در مقابل مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه برای طرح‌های متفاوت این مطالعه و مقایسه آنها با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI 318-05 [۳۷] و CEB-FIP [۳۸] نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ابتدا با اعمال ضرایب مربوطه، مقاومت فشاری مکعبی به مقاومت فشاری استوانه‌ای تبدیل شده است. این ضرایب تبدیلی برای بتن خودتراکم توسط دومونه [۳۹] با گردآوری نتایج موجود در مطالعات مختلف ارائه شده است. از شکل ۹ مشخص است که مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که استفاده از آب مغناطیسی و پرکننده‌های مورد استفاده در این پژوهش در بتن خودتراکم، در محدوده توصیه شده CEB-FIP [۳۸] قرار دارد. نتایج این مطالعه با روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI 318-05 [۳۷] و حد میانگین CEB-FIP [۳۸] رابطه بسیار نزدیکی دارد. لذا در این مورد می‌توان به رابطه توانی $f_t=0.11(f_{cy})^{0.95}$ با ضریب همبستگی $R^2=0.79$ که بر اساس نتایج این مطالعه به دست آمده، اشاره کرد.

۳-۲-۳- درصد جذب آب

آزمایش درصد جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پرکننده‌های مختلف به منظور بررسی دوام این نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه انجام شد. این نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذب آب نمونه‌های مختلف در محدوده ۱/۹-۴/۲ درصد می‌باشد. کمترین این مقدار مربوط به جایگزینی ۲۰ درصد میکروسیلیس و بیشترین مربوط به نمونه کنترل با آب معمولی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که آب مغناطیسی به تنهایی قادر است حدود ۱۰ درصد جذب آب را کاهش دهد که دلیل آن می تواند افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها در اثر کاهش فضای خالی در بتن باشد. CEB-FIP [۳۸] کیفیت بتن را بر اساس درصد جذب آب به سه گروه خوب(کمتر از ۳ درصد)، متوسط(۵-۳ درصد) و ضعیف(بیشتر از ۵ درصد) تقسیم بندی می‌کند. همانگونه که از شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، تمامی نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش، دارای کیفیت جذب آب متوسط و خوب هستند.

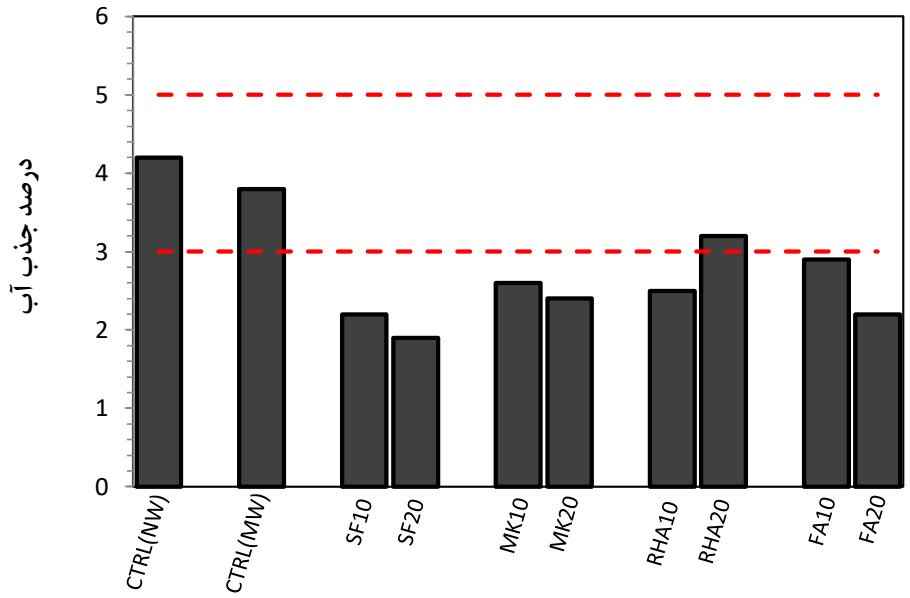


شکل۸ : مقاومت کششی بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه.



شکل۹ : رابطه مقاومت فشاری استوانه‌ای و مقاومت کششی طرح‌های مختلف بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه.

مطابق نتایج، نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس دارای کمترین میزان جذب آب هستند. این میزان در مقایسه با نمونه‌های کنترل با آب مغناطیسی حدود ۵۰ درصد و در مقایسه با نمونه‌های کنترل با آب معمولی حدود ۵۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش تخلخل بتن در اثر تشکیل ژل سیلیکاتی باشد. ثابت و همکاران [۲۵] گزارش کردند که جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس در بتن خودتراکم، میزان جذب آب را حدود ۳۹ درصد کاهش می‌دهد.



شکل۱۰ : درصد جذب آب بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیرات آب مغناطیسی و پوزولان‌های مختلف بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد.

- آب مغناطیسی با افزایش میزان جریان‌پذیری، نیاز مخلوط به کاهنده شدید آب را حدود ۴۵ درصد کاهش می‌دهد. درحالیکه بکارگیری پوزولان‌های مصرفی به جز خاکستر بادی، این میزان را تقلیل و یا حتی افزایش می‌دهند.
- تمامی نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی و پوزولان‌های مختلف دارای جریان اسلامپی در محدوده توصیه شده EFNARC [۲۰] می‌باشند. بنابراین تمامی آنها از نظر خاصیت خودتراکمی بتن گزینه مناسبی می‌باشند و می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی شرایط عملکرد جریان‌پذیری، قابلیت عبور و ویسکوزیته را مهیا کنند.
- آب مغناطیسی، ویسکوزیته بتن خودتراکم را که به وسیله زمان جریان T_{50} و زمان عبور بتن از قیف V اندازه‌گیری می‌شود، کاهش می‌دهد. اما استفاده از پوزولان های میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر پوسته شلتوک برنج، موجب افزایش ویسکوزیته پلاستیک می‌شوند. همچنین برای تمامی نمونه‌های ساخته شده، زمان جریان T_{50} و زمان عبور بتن از قیف V با رابطه درجه دوم و ضریب همبستگی بالا ارتباط دارند.
- آب مغناطیسی می تواند توانایی عبور مخلوط خودتراکم را در جعبه L افزایش دهد. اما در حضور پوزولان‌های مصرفی به جز خاکستر بادی، این توانایی کاهش می‌یابد.
- نمونه های بتنی ساخته شده با آب مغناطیسی در تمامی سنین نسبت به نمونه‌های با آب معمولی، مقاومت فشاری بیشتری دارند. این میزان در سن ۷ روزه حدود ۱۰ درصد و در سن ۲۸ روزه حدود ۱۵ درصد می‌باشد. در حضور پوزولان‌ها و در سن ۷ روزه، نمونه‌های حاوی خاکستر بادی دارای افزایش مقاومتی حدود ۱۸ درصد هستند. این میزان در سن ۲۸ روزه و در حضور پوزولان میکروسیلیس به حدود ۴۸ درصد می‌رسد.
- مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی در سن ۲۸ روزه حدود ۱۴ درصد بیشتر است. در خصوص پوزولان‌ها،

بیشترین تأثیر روی مقاومت کششی مربوط به اختلاط با ۲۰ درصد میکروسیلیس با افزایشی حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

- مقایسه مقاومت‌های فشاری استوانه‌ای و کششی نمونه‌های بتن خودتراکم ساخته شده نشان می‌دهد که می‌توان، مقاومت کششی آنها را توسط مقاومت فشاری استوانه‌ای و از رابطه توانی $f_t=0.11(f_{cy})^{0.95}$ با ضریب همبستگی بالایی پیش‌بینی کرد.
- آب مغناطیسی قادر است میزان جذب آب بتن خودتراکم را حدود ۱۰ درصد کاهش دهد. بنابراین با استفاده از آب مغناطیسی می توان بتن خودتراکم توانمند نیز تولید کرد. این کاهش جذب آب در حضور پوزولان میکروسیلیس می‌تواند به حدود ۵۵ درصد برسد.

مراجع

[1] Okamura, H., Ouchi, M., (2003), "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.

[2] Okamura, H., (1997), "Self-compacting high performance concrete", *Concr Int*, 19(7), pp. 50-54.

[3]. "Self Consolidating Concrete", (April 2007), Reported by ACI Committee237.

[4] De Schutter, G., peter, J., Bartos, M., Domone, p., Gibbs, J., (2008), "Self-Compacting Concrete", Whittles publishing.

[5] Joshi, K.M., Kamat, P.V., (1996), "Effect of magnetic field on the physical properties of water", J. Ind. Chem. Soc, 620-622.

[6] Lungader, M., (1995), "Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts", J. Cryst. Growth, 152, 94–100.

[7] Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G. and Keddam, M., (2001), "Magnetic Water Treatment for Scale Prevention", *Wat. Res*, Vol.35, No.13, pp.3248-3259.

[8] Kronenberg, K., and Klaus, J., (1985), "Experimental Evidence for Effects of Magnetic Fields on Moving Water", J. Of Trans. On Mag, Vol 21, No. 5.

[9] Saddam, M. A., (2009), "Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete", Al-Rafidain Engineering, Vol.17 No.1.

[10] Fu, W., Wang, Z. B., (1994), "The new technology of concrete engineering. Beijing", The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 56–59.

[11] Chau, Z. J., (1996), "The new construction method of concrete. Beijing", The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 401–407.

[12] Tawfic, Y. R., Abdelmoez, W., (2013), "The Influence of Water Magnetization on fresh and hardened concrete properties", International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 4(6), 21-43.

[13] Afshin, H., Gholizadeh, M., Khorshidi, N., (2010), "Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology", Scientia Iranica, (ISI), 17(1), 74-79.

[14] Su, N., Yeong Hwa Wu., Yo Mar, Ch., (2000), "Effect of Magnetic Water on The Engineering Properties of Concrete Containing Granulated Blast Furnace Slag", J. of Cement and Concrete Research, 30, 599 – 605.

[15] Su, N., Yeong Hwa, Wu., Yo Mar, Ch., (2003), "Effect of Magnetic Field Treated Water on Mortar and Concrete Containing Fly Ash", Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issue 7, 681-688.

[16] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A., (2017), "Alternating Magnetic Field Effect on Fine-aggregate Concrete Compressive Strength", Constr Build Mater, 134, 83–90.

[17] Abavisani, I., Rezaifar, O., Kheyroddin, A., (2017), "Magneto-Electric Control of Scaled-Down Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, V. 114, No. 1-6.

[18] Oner, A., Akyuz, S., (2007), "An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete". Cement Concr Compos, 29(6), 505–14.

[19] Yang, E.H., Yang, Y.Z., Li, V.C., (2007), "Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness", ACI Mater J 104(6), 620–8.

[20] "The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use", (May 2005), EFNARC.

[21] Gesoglu, M., Guneyisi, E., Ozbay, E., (2009), "Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume", Constr Build Mater, 23, 1847–54.

[22] Elahi, A., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S. V., Khan, Q.U.Z., (2010), "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials", Constr Build Mater, 24, 292–9.

[23] Maghsoudi, A. A., Soheil, M. J., Darbhenz, A., (2010), "Effect of the Nano Particles in the New Generation of Concretes, SCC", Int. J. Nanosci. Nanotechnol., Vol. 6, No. 3, pp. 137-143.

[24] Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, AR., (2012), "Mechanical, rheological, durabilityand microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO_2 micro and nanoparticles", Materials and Design, 34, 389–400.

[25] Sabet, F., Libre, N. A., Shekarchi, M., (2013), "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", Constr Build Mater, 44, 175–184.
[26] Guneyisi, E., Gesoglu, M., Ozbay, E., (2009), "Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network", Mater Struct, 42, 469–84.
[27] Sahmaran, M., Yaman, I.O., Tokyay, M., (2009), "Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash", Cem Concr Compos, 31, 99–106.
[28] Khatib, J.M., (2008), "Performance of self-compacting concrete containing fly ash", Constr Build Mater, 22, 1963–71.
[29] Jalal, M., Ramezanianpour, A.A., khazaei pool M., (2013), "Split tensile strength of binary blended Self- compacting concrete containing low volume fly ash and Tio_2 nanoparticles", Composites Engineering, 55, 324-37.
[30] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R., (2001), "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", Cem Concr Res, 31, 1301–6.
[31] Hassan, A.A.A., Lachemi, M., Hossain, K.M.A., (2012), "Effect of Metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete", Cement and concrete composites, 34, 801-7.
[32] Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Ahmadi Moghadam, H., Mousavi, S. Y., (2011), "Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete", Biosystems Engineering, 110, 144-152.
[33] Khayat, K.H., Bickley, J., Lessard, M., (2000), "Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls", ACI Material Journal, 97, 374–380.
[34] Madandoust, R., Mousavi, S. Y., (2012), "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin", Constr Build Mater, 35, 752–760.
[35] Safiuddin, M.d., West, J.S., Soudki, K.A., (2010), "Flowing ability of self-consolidating concrete and its binder paste and mortar components incorporating rice husk ash", Canadian Journal of Civil Engineering, 37, 401-12.
[36] Libre, N. A., Khoshnazar, R., Shekarchi, M., (2010), "Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures", Constr Build Mater, 24(7), 1262–71.
[37] ACI Committee 318, (2005), "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318–05) and Commentary (318R–05)", American Concrete Institute, Farmington Hills.
[38] CEB-FIP, Diagnosis and assessment of concrete structures, (1989), "state of the art report", CEB Bull 192, 83–85.
[39] Domone, P.L., (1997), "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", Cement and concrete composites, 29, 1–12.