



ارزیابی تاثیر درصد ماسه‌های شکسته استاندارد بر روی ویژگی‌های بتن خودمتراکم

حمید رضا امینی^۱، بهزاد سعیدی رضوی^{۲*}، جمال احمدی^۳، مهدی بابایی^۴

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۱۲

دریافت مقاله: ۹۸/۰۴/۰۴

چکیده

شکستگی سنگدانه‌ها، با توجه به تأثیرات آن در تنش تسلیم، لزجت خمیری و اصطکاک بین اجزای بتن، نقش مهمی در عملکرد بتن به ویژه بتن-های خودمتراکم دارد، لذا در این تحقیق تاثیر درصد ماسه استاندارد شکسته بر روی خواص بتن خودمتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور طرح اختلاط‌های مختلفی برای دستیابی به طرح مخلوطی که الزامات حداقلی بتن خودمتراکم را برآورده کند، مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت از پنج طرح با جایگزین کردن مقادیر مختلف ماسه شکسته به جای ماسه طبیعی استفاده شده و آزمایش‌های رئولوژی (جریان اسلامپ، قیف V، حلقه‌ی J و جعبه‌ی L)، مشخصات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی) و دوام (چرخه یخبندان و جذب موئینه) انجام شده است. بر مبنای نتایج بدست آمده، با جایگزینی مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از ماسه استاندارد طبیعی با ماسه استاندارد شکسته، مقادیر قطر پخش شدگی در آزمون جریان اسلامپ که بیانگر تنش تسلیم بتن تازه و معیاری برای ارزیابی قابلیت پرکنندگی بتن خودمتراکم می‌باشد به ترتیب برابر ۰/۷، ۲ و ۱۰ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های ساخته شده با ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد ماسه شکسته، به ترتیب برابر ۴، ۷/۱ و ۶/۷ درصد افزایش یافته است. همچنین، جذب موئینه با جایگزینی ماسه شکسته افزایش یافته است که نشان دهنده تغییر و اصلاح دوام و پایایی نمونه‌های بتن خودمتراکم دارای ماسه شکسته می‌باشد.

کلید واژه‌ها: بتن خودمتراکم، ماسه استاندارد شکسته، رئولوژی بتن، مقاومت مکانیکی، دوام بتن.

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. عضو هیات علمی پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران bsaidi@standard.ac.ir

۳. عضو هیات علمی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۴. عضو هیات علمی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرفترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. اقتصادی بودن، سهولت دسترسی به اجزا تشکیل دهنده، شکل پذیری و دوام نسبتاً بالای این مخلوط موجب توجه روزافزون به استفاده از بتن شده است. آدام نویل (۱۳۷۸) تحقیق کرد که در تولید بتن به منظور برآورد ملزومات کارآیی، مقاومت و دوام، باید دقت بیشتری در انتخاب مصالح آن صورت بگیرد. در این میان سنگدانه‌ها و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها تاثیر بسزایی در خصوصیات مکانیکی به همراه دوام بتن دارند. پی کومار مهتا و پائولو جی ام مونتریو (P. Kumar Mehta Paulo J. M. Monteiro, 2001) در این زمینه ویژگی‌های هندسی و بخصوص مقدار شکستگی سنگدانه‌ها به دلیل افزایش سطح ویژه و افزایش مساحت یا به بیان دقیقتر حجم ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان هیدراته بر بسیاری از ویژگی‌های بتن در فازهای بتن تازه و سخت شده اثر می‌گذارد.

بر اساس تحقیقات پون و همکاران (Poon et al.2004) مخلوط‌هایی که شامل درصدی از سنگدانه شکسته و سنگدانه طبیعی هستند، در همه آزمون‌های مربوط به دوره‌های تست ۷ و ۲۸ روزه، مقاومت فشاری بالاتری را نسبت به مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی داشته‌اند. پژوهشی که توسط کوردیرو و همکاران (Cordeiro et al.2016) بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد، نشان داد با جایگزین کردن سنگدانه شکسته گرانیتهی به جای سنگدانه رودخانه‌ای سیلیسی در درصد‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰، مشخصات مکانیکی تغییر چشم‌گیری ندارد. تدین و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی تاثیر شکل سنگدانه بر مقاومت بتن با تهیه سنگدانه‌های گردگوشه و تیزگوشه و ترکیب کردن آنها و ایجاد نسبت‌های مختلف پرداختند. طبق نتایج بدست آمده مقاومت بتن با شکل سنگدانه‌های مصرفی رابطه مستقیم داشته و طرح‌هایی که در آن از شن و ماسه شکسته استفاده شده دارای مقاومت بالاتری

هستند. ساتا و همکاران (Sata et al. 2007) با انجام آزمایش‌هایی با درصد‌های مختلف جایگزینی خاک معدنی با ماسه طبیعی دریافتند که نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های مکعبی (۷ و ۲۸ و ۹۱ روزه) با جایگزینی خاک معدنی بجای ماسه تا ۳۰ درصد، افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. حق طالب و همکاران (۱۳۹۰) مطالعات آزمایشگاهی را بر روی تاثیر درصد شکستگی سنگدانه‌ها بر روی عیار سیمان مصرفی بر اساس روش ملی طرح مخلوط بتن انجام دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش درصد شکستگی شن و ماسه به ترتیب باعث کاهش و افزایش مصرف سیمان می‌شود. در پژوهشی که توسط مونگوریو و همکاران (Manguriu et al.2013) انجام شد پودر سنگ خرد شده جایگزین ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ماسه در ملات و صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد ماسه طبیعی در بتن گردید و مشاهده شد با جایگزینی سنگ شکسته به جای ماسه طبیعی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بهبود یافته و تغییر شکل تیر کاهش می‌یابد. همچنین در مطالعه‌ای که بر روی اثر ماسه حاصل از سنگ‌شکن‌ها بر روی دوام بتن انجام شد، ویجایاراگوان و وایال (Vijayaraghavan and Wayal 2013) مشاهده کردند که جایگزینی ماسه شکسته شده صنعتی به جای ماسه رودخانه‌ای باعث تقویت دوام بتن می‌شود. کریمی‌نیا و نوری (۱۳۸۹) با جایگزینی ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ماسه شکسته، به عنوان جایگزین ماسه گردگوشه و با ثابت نگه داشتن دیگر فاکتورهای تاثیرگذار مشاهده کردند که با افزایش درصد جایگزینی ماسه شکسته به جای ماسه گردگوشه، مقاومت فشاری و درصد جذب آب نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. شریفی و همکاران (۱۳۹۲) با پژوهش بر روی تأثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگدانه‌ها از جمله بافت سطحی آنها بر مقاومت بتن نشان دادند که در سنین پایین متخلخل بودن بافت سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن نشده و سبب افزایش مقاومت فصل مشترک سنگدانه و بتن نیز می‌شود. اما در سنین بالا تخلخل سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. ایلانگوانا و همکاران (Ilangovana et al. 2008)

ملی استاندارد ایران (۱۳۹۶) و مقدار شکستگی مشخص شده در آن است (جدول ۱). در شکل ۱ نمونه‌ای از تصاویر مربوط به ریزدانه‌های شکسته و طبیعی (ماسه شکسته و طبیعی) ارائه گردیده است. شن تهیه شده از نوع شکسته، با دانه‌بندی یکنواخت و با بیشینه اندازه دانه‌های ۱۹ میلی‌متر بوده و وزن مخصوص آن ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. ماسه تهیه شده از نوع رودخانه‌ای و شکسته با دانه‌بندی یکنواخت و با بیشینه اندازه دانه‌های ۴/۷۵ میلی‌متر (رد شده از الک شماره ۴) بوده و وزن مخصوص آن ۲/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۸۰ تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگدانه‌ریز (۱۳۹۶) و استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۸۲ تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگدانه درشت (۱۳۹۶) جهت تعیین وزن مخصوص سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای تامین ریزدانه (فیلر) مورد نیاز جهت ساخت بتن خودمتراکم از پودر سنگ با مشخصات موجود در جدول ۱ استفاده شده است.

۳. سیمان مصرفی

در تمامی مراحل، سیمان مصرفی تپ ۲ بجنورد بوده است. آنالیز شیمیایی سیمان مذکور مطابق گزارش کارخانه سازنده و خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان مذکور مطابق استانداردهای ASTM C 188 و C 305, C185, C 191, C 204, C 109 در جدول ۲ ارائه شده است.

تحقیقی در زمینه امکان جایگزینی ۱۰۰ درصدی سنگدانه‌های ریز شکسته بدست آمده از سنگ‌شکن‌ها با سنگدانه‌های ریز رودخانه‌ای انجام دادند و مشاهده کردند در صورت جایگزینی ۱۰۰ درصدی ماسه شکسته با ماسه رودخانه‌ای مقاومت خمشی و فشاری تقریباً یکسان و حتی بیشتر شده است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی تاثیر مصالح سنگی ریزدانه شکسته و گردگوشه بر نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مقاومت فشاری با افزایش مقدار جایگزینی ماسه شکسته تا ۵۰ درصد کاهش یافته و پس از آن با افزایش میزان ماسه در نسبت مخلوط، مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است و درصد جذب آب با افزایش میزان شکستگی همواره افزایش را نشان می‌دهد. در این پژوهش و بر مبنای تحقیقات انجام یافته، به ساخت بتن خودمتراکم با جایگزینی ماسه شکسته با ماسه طبیعی در درصدهای مختلف و سپس بررسی و ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام آن با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جذب آب حجمی اولیه و نهایی، چرخه یخبندان، نفوذ آب تحت فشار و جذب آب موئینه پرداخته شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۱-۲ سنگدانه‌های بکار رفته

مشخصاتی که در انتخاب نوع سنگدانه‌ها ملاک عمل قرار گرفت، قرار گرفتن سنگدانه‌ها در محدوده دانه‌بندی ارائه شده توسط استاندارد ۳۰۲ (سنگدانه‌های بتن - ویژگی‌ها) سازمان



شکل ۱. سنگدانه‌های ریز طبیعی و شکسته بکار رفته در ساخت نمونه‌ها

جدول ۱. دانه بندی شن و ماسه و ریزدانه

Sieve No. (mm)	Coarse Aggregate	Natural Sand	Fine Aggregate
12/5	68	-	-
9/5	31	-	-
6/35	1	-	-
4/75	-	16	-
2/36	-	21	-
1/18	-	19	-
0/60	-	16	18
0/30	-	14	46
0/15	-	12	31
0/075	-	-	5
Remnant	0	2	0

کارخانه سازنده این محصول مقدار مناسب قابل استفاده در مخلوط‌های بتنی، به میزان ۰/۳ تا ۱/۲ درصد وزن مواد سیمانی می‌باشد.

۴. فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده پلی کربکسیلاتی استفاده شده است. این محصول ویژه ساخت بتن خودمتراکم بدون نیاز به ویبره و یا انرژی اضافی جهت تراکم می‌باشد. به توصیه

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان بکار رفته در ساخت نمونه‌ها

Chemical Composition		
Chemical Ingredient	Type 2 Portland Cement (Bojnurd)	Standards
SiO ₂	21/57	>20/00
Al ₂ O ₃	4/64	<6/00
Fe ₂ O ₃	3/63	<6/00
CaO	64/8	-
MgO	1/96	<5
SO ₃	1/81	<3/00
IR	0/28	<0/75
LOI	-	<6/00
C ₃ S	60/09	-
C ₂ S	13/70	-
C ₃ A	6/20	<8/00
C ₄ AF	23/37	-
Physical Properties		
Expansion (%)	0/03	<0/8
Setting Time (min)	143-173	45-360
Blain (cm ² /g)	3163	>2800
Physical Properties (Compressive Strength) Kg/cm ²		
7 Day	301	>175
28 Day	411	>315

۵. تعیین نسبت‌های مخلوط

با توجه به این‌که دانه‌بندی سنگدانه در ساخت بتن خودتراکم یکی از پارامترهای اصلی به شمار می‌رود، برای تعیین دانه‌بندی مناسب از ۵ دانه‌بندی مختلف مقدماتی استفاده شده است.

هر کدام از دانه‌بندی‌ها با محدوده ارائه شده توسط راهنمای نسبت مخلوط ملی مقایسه شده است. با هر یک از این ۵ دانه‌بندی ۱۸ لیتر بتن با مقدار سیمان دارای ترکیب شیمیایی جدول ۲ و نسبت آب به سیمان ثابت ساخته شد تا تاثیر هر

کدام از دانه‌بندی‌ها روی کارایی بتن تعیین شود. استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۳-۱۰ (۱۳۹۲) برای این منظور آزمایش‌هایی جریان اسلامپ، جعبه L-BOX و استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۳-۹ (۱۳۹۲) قیف V شکل انجام شد که در نهایت یکی از دانه‌بندی‌ها به عنوان دانه‌بندی نهایی برای انجام نسبت‌های اصلی اختلاط انتخاب شد. در شکل ۲ نمونه‌ای از تصاویر آزمایشگاهی مربوط به قیف V و جریان اسلامپ ارائه گردیده است.



شکل ۲. تصاویر آزمایشگاهی از تعیین مشخصات روانی طرح مخلوط‌های ساخته شده

در این پژوهش، ۵ نسبت مخلوط با درصد جایگزینی متفاوت ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ماسه شکسته به جای ماسه طبیعی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است (جدول ۳). در تمامی طرح‌ها مقدار نسبت آب به سیمان یکسان و برابر ۰/۴ بوده و مقدار پودر سنگ بکار رفته ۲۵۰ و عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم در هر مترکعب بوده است.

در مطالعات آزمایشگاهی از استانداردهای بین‌المللی و ملی INSO 11270 (۱۳۹۳) آزمایش جریان اسلامپ، INSO 11271 (۱۳۹۳) برای سنجش نتایج آزمایش حلقه‌ی J، از

INSO 3203-9 برای تعیین و تفسیر نتایج آزمون قیف V و از INSO 3203-10 برای کنترل نتایج آزمون جعبه L استفاده شده است. همچنین INSO 1608-3 (۱۳۹۳) و BS EN 12390-3 (۲۰۰۹) برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، INSO 6047 (۱۳۹۴) و ASTM C 496 (۲۰۰۴) برای اندازه‌گیری مقاومت کششی، INSO 17731 (۱۳۹۲) و ASTM C 293 (۲۰۰۷) برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی، ISIRI 12728 (۱۳۸۹) برای چرخه یخبندان و RILEM CPC 11.2 (۱۹۹۴) برای جذب آب مویینه استفاده شده است.

جدول ۳. نسبت مخلوط نهایی (Kg/m³)

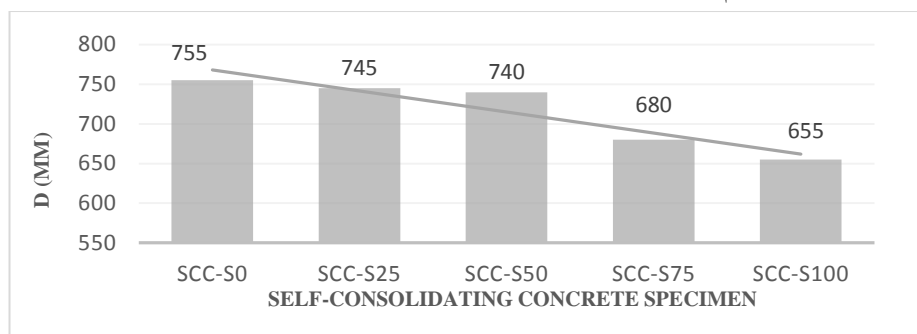
Mix No.	Mix-Design	Natura Sand	Crushed Sand	Coarse Aggregate	Fine Aggregate
1	SCC-CSS-0	924	-	541	252
2	SCC-CSS-25	693	231	541	252
3	SCC-CSS-50	462	462	541	252
4	SCC-CSS-75	231	693	541	252
5	SCC-CSS-100	-	924	541	252

برای ارزیابی قابلیت پرکنندگی بتن خودتراکم است. در راهنمای اروپایی (The European Guidelines, 2005) همچنین این آزمایش می‌تواند بازگو کننده شاخصی از مقاومت در برابر جداسدگی باشد.

۶. ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌ها

۶-۱. نتایج آزمایش جریان اسلامپ

نتایج آزمایش جریان اسلامپ در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج این آزمایش که به صورت قطر پخش شدگی بتن (D) آزموده می‌شود، بازگوکننده تنش تسلیم بتن تازه و معیاری

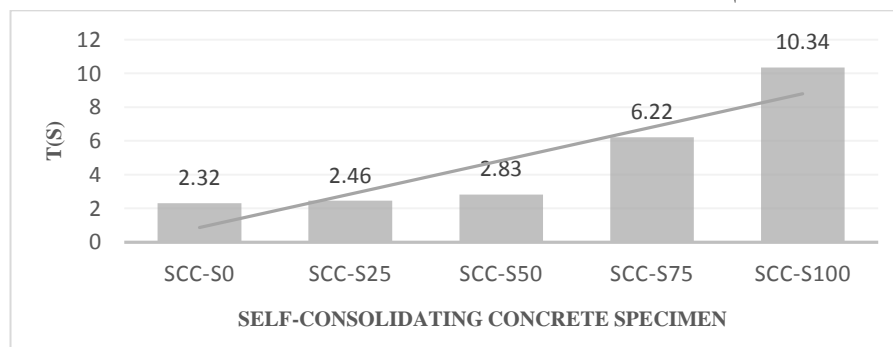


شکل ۳. نمودار میانگین قطرهای آزمون جریان اسلامپ نمونه‌ها

۶-۲. نتایج آزمایش T_{50cm} جریان اسلامپ

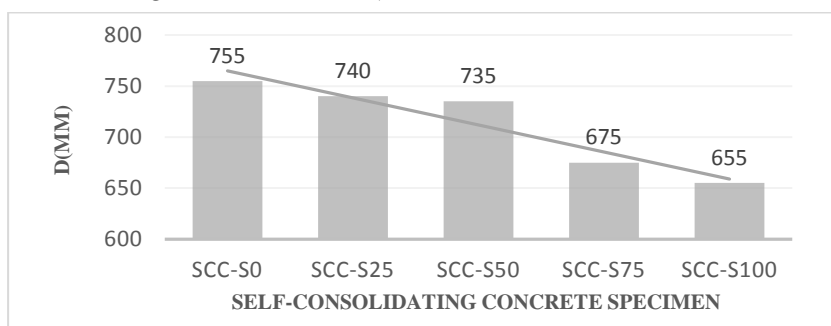
زمان T_{50cm} ، شاخص دوم آزمون جریان اسلامپ برای تعیین لزجت خمیری بتن تازه است (شکل ۴). زمان کمتر نشان دهنده شاخصی برای قابلیت جریان بالاتر است. اگر بتن در زمانی بیش از ۵ ثانیه به قطر ۵۰ سانتی‌متر برسد نشان دهنده لزجت خمیری زیاد بتن و اگر زمان اندازه‌گیری شده کمتر از یک ثانیه باشد لزجت کم بتن را نشان می‌دهد. در این موارد احتمال بروز جداسدگی و آب انداختگی در بتن افزایش می‌یابد و معمولاً به صورت شیره‌هایی از بتن در لبه‌ی بیرونی دایره ایجاد شده پدید می‌آید.

بر اساس نتایج بدست آمده، تمامی طرح اختلاط‌ها در محدوده مجاز بتن خودتراکم قرار دارند. با جایگزینی ماسه استاندارد شکسته تا ۵۰ درصد ماسه طبیعی، تغییر محسوسی در اسلامپ بتن ایجاد نمی‌شود. با افزایش درصد جایگزینی ماسه استاندارد شکسته به جای ماسه طبیعی، به تدریج قطر جریان اسلامپ بتن کاهش می‌یابد و این به معنای افزایش تنش تسلیم و کاهش پرکنندگی است (محدوده پیشنهادی در EFNARC برابر تنش تسلیم رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر را بین ۳ تا ۷ ثانیه برای کاربردهای مهندسی متداول و بین ۲ تا ۵ ثانیه برای کاربردهای سازه‌های بلند قابل قبول می‌داند). با توجه به رده‌ی اسلامپ SCC-CS75 و SCC-CS100، این طرح‌ها در برای ساخت بتن خود تراکم مناسب نبوده است.

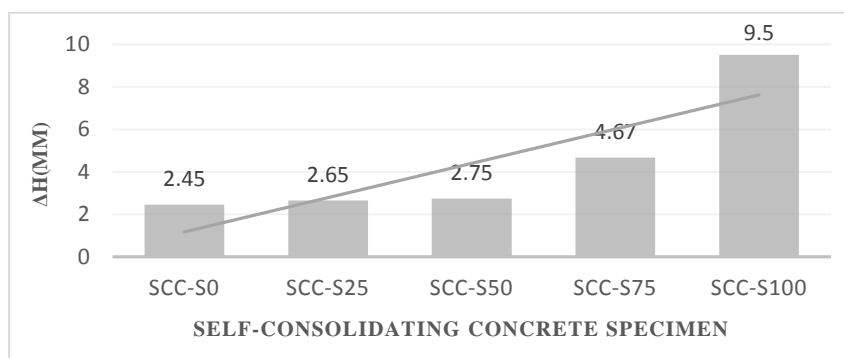


شکل ۴. نمودار زمان پخش شدگی قطر ۵۰ سانتی متر آزمون جریان اسلامپ

این آزمایش بیانگر قابلیت عبور و جریان در بتن خودتراکم می‌باشد (شکل ۲). نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است. با مقایسه این آزمایش با جریان اسلامپ مشخص می‌شود که چگونه میزان گسترش اسلامپ مهار نشده کاهش می‌یابد. هرچه اختلاف ارتفاع موجود در قبل و بعد از آرماتورها بیشتر باشد، توانایی عبور کمتر خواهد بود. اگر میزان این اختلاف بیشتر از ۱۰ میلی‌متر باشد، احتمال بروز پدیده انسداد افزایش می‌یابد.



شکل ۵. نمودار میانگین قطرهای آزمون حلقه‌ی J نمونه‌ها



شکل ۶. نمودار اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه در آزمون حلقه‌ی J نمونه‌ها

انسداد، این طرح مخلوط مناسبی به عنوان بتن خود تراکم نمی‌باشد.

۶-۴. نتایج آزمایش قیف V (V-Funnel Test)

نتایج این آزمایش بیانگر پرکنندگی و لزجت خمیری بتن می‌باشد (شکل ۷). در راهنمای اروپایی (The European Guidelines, 2005) زمان مناسب تخلیه بتن از دستگاه قیف V شکل برای بتن خودتراکم حدود ۶ تا ۱۲ ثانیه است. اگر زمان تخلیه بیش از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر لزجت خمیری زیاد

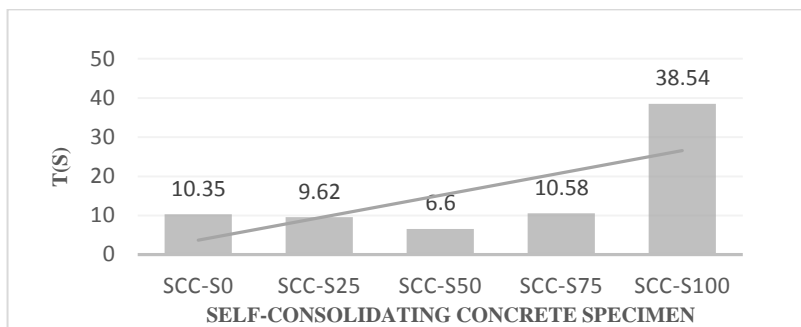
طرح‌های با ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی ماسه استاندارد شکسته با ماسه طبیعی، رفتار مشابهی از نظر لزجت خمیری داشته و در بازه‌ی مناسب (۲ تا ۵ ثانیه) قرار دارند. با افزایش درصد جایگزینی ماسه استاندارد شکسته به جای ماسه طبیعی، لزجت خمیری افزایش یافته و در طرح‌های SCC-CS75 و SCC-CS100 احتمال بروز جداشدگی زیاد است.

۶-۳. نتایج آزمایش حلقه‌ی J (J-Ring Test)

از مقایسه این آزمایش با آزمایش جریان اسلامپ، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در قطر پخش شدگی جریان اسلامپ و حلقه‌ی J مشاهده نگردید که این بیان کننده قابلیت پخش شدگی مناسب بتن است. اختلاف ارتفاع داخل و بیرون میلگردها در تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز (زیر ۱۰ میلی‌متر) می‌باشد. طرح دارای ۱۰۰ درصد ماسه استاندارد شکسته، اختلاف ارتفاع داخل و خارج میلگرد ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد و به مقدار حد مجاز نزدیک است. بنابراین با توجه به احتمال بروز پدیده

زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد نشان دهنده لزجت کم و احتمال وقوع پدیده جداسدگی است.

است. در این صورت ممکن است تامین کارایی مورد نیاز بتن مشکل باشد و این شاخصی از قابلیت مسدود شدن بتن است. در راهنمای اروپایی (The European Guidelines, 2005) اگر



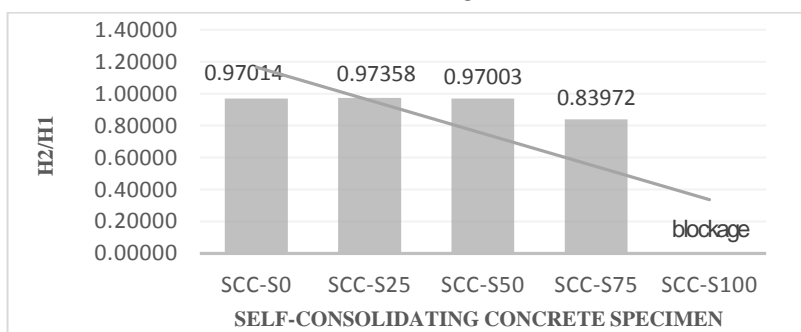
شکل ۷. نمودار زمان تخلیه در آزمون قیف V نمونه‌ها

ماسه سه برابر شده است. در نتیجه احتمال بروز انسداد برای این طرح وجود دارد.

۶-۵. نتایج آزمایش جعبه L (L-Box Test)

شکل ۸ نشان‌دهنده تاثیر درصدهای مختلف ماسه استاندارد شکسته بر روی بتن خودمتراکم در آزمایش جعبه L می‌باشد. در این آزمایش نسبت انسداد یعنی H_2/H_1 ثبت می‌گردد که بازگوکننده قابلیت پرکنندگی بتن خودمتراکم می‌باشد.

به جز طرح SCC-CS100، تمامی طرح‌ها در زمان مناسب (۶ تا ۱۲ ثانیه) از قیف عبور کردند که نشان می‌دهد با جایگزینی ماسه استاندارد شکسته به جای بخشی از ماسه طبیعی، لزجت خمیری مناسب تامین شده است. با جایگزینی ۵۰ درصد ماسه استاندارد شکسته به جای ماسه طبیعی، روان‌ترین بتن و بهترین طرح از نظر پرکنندگی حاصل شده است. در طرح SCC-CS100 که تمام ماسه مورد استفاده، از نوع شکسته است، زمان عبور بتن از قیف نسبت به ۷۵ درصد جایگزینی



شکل ۸. نمودار نسبت ارتفاع سطح بتن در قسمت عمودی و افقی جعبه در آزمون جعبه L نمونه‌ها

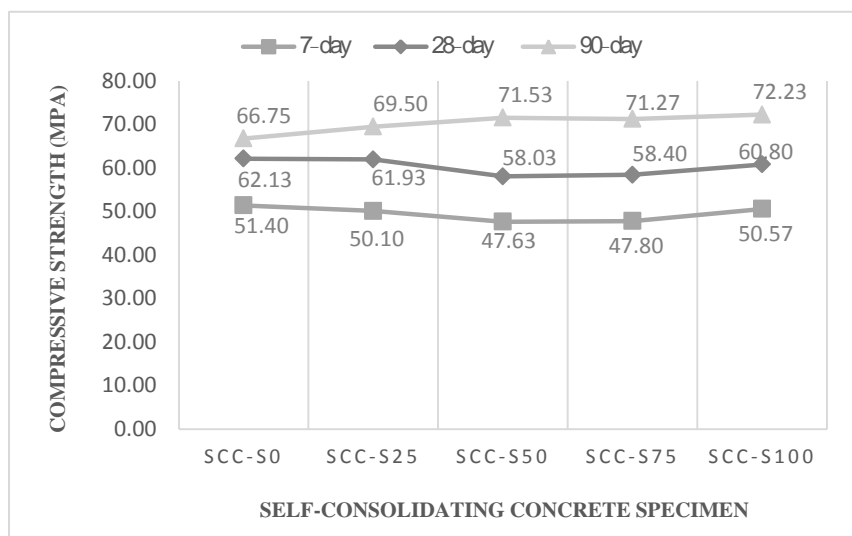
بتن ساخته شده با ماسه طبیعی تغییر می‌کند. همانطور که از نتایج آزمایش‌های قبل برداشت شد، در بتن ساخته شده با ۱۰۰ درصد ماسه شکسته استاندارد، پدیده انسداد رخ داده است.

۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مشابه نتایج آزمایش‌های قبل، در آزمایش جعبه L نیز مشخص شد که با جایگزینی ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد ماسه استاندارد شکسته به جای ماسه طبیعی، تغییر قابل توجهی در قابلیت پرکنندگی بتن خودمتراکم ایجاد نمی‌شود به طوری که در طرح‌های SCC-CS25 و SCC-CS50، نسبت ارتفاع‌های ابتدا و انتهای جعبه به ترتیب ۰/۳۵ درصد و ۰/۳۶ درصد نسبت به

حاصل شده است. سایر نسبت‌ها مانند نتایج ۷ روزه بتن، مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با نمونه ساخته شده با ماسه رودخانه‌ای دارند. اما در نتایج بدست آمده از نمونه‌های ۹۰ روزه یک تغییر اساسی به وجود آمده است. در طولانی مدت، با توجه به تکمیل فرآیند گیرش و افزایش یکپارچگی اجزای تشکیل دهنده، درگیری و اصطکاک بیشتر دانه‌های ماسه در نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته نسبت به نمونه‌های ساخته شده با ماسه طبیعی، باعث افزایش مقاومت شده است به همین علت تمامی نسبت‌های اختلاط، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به ماسه‌ی طبیعی دارند و نسبت -SCC S100 بیشترین مقاومت را دارا می‌باشد. نتایج انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در روزهای ۷، ۲۸ و ۹۰ در شکل ۹ نمایش داده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری و برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳-۱۶۰۸ انجام شد. همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، تمامی نسبت‌های مخلوط در آزمایش مقاومت فشاری در عمر ۷ روزه بتن خودمترکم، مقاومت کمتری نسبت به بتن ساخته شده با ماسه طبیعی از خود نشان می‌دهند. دلیل آن احتمالاً ناقص بودن فرآیند هیدراتاسیون در کوتاه مدت و همچنین تشکیل فضای خالی بیشتر در اثر شکستگی است. از طرفی درصد شکستگی بیشتر باعث درگیری بیشتر بین اجزای تشکیل دهنده بتن شده و مقاومت فشاری بعد از کاهش تا نسبت SCC-S50 روند صعودی را طی می‌کند. در بتن ساخته شده با ۲۵ درصد ماسه استاندارد شکسته در سن ۲۸ روز بتن، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقدار ۷ روزه

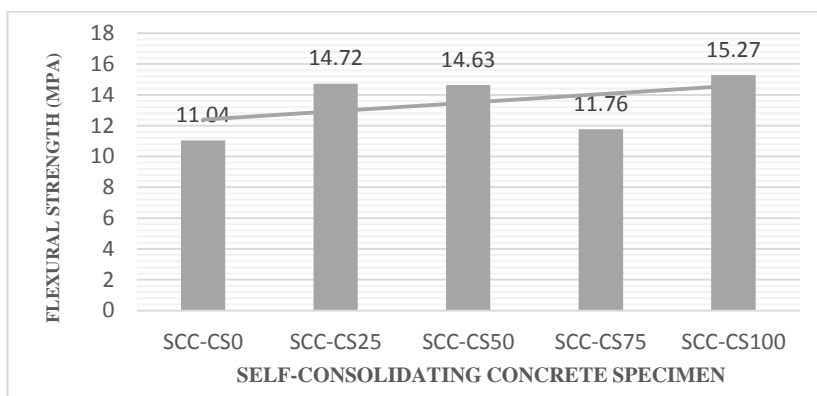


شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری

خمشی) و کمترین آن برای نسبت SCC-S0 می‌باشد. این نتیجه نشان دهنده این مطلب است که جایگزینی ماسه شکسته در همه نسبت‌ها برای مقاومت خمشی مطلوب بوده و علت آن هم احتمالاً درگیری و اصطکاک بیشتر دانه‌های ماسه در نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته نسبت به نمونه‌های ساخته شده با ماسه طبیعی است.

۸. نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده این آزمایش بر روی نمونه‌های به شکل تیر بتنی با ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر و برای بتن ۲۸ روزه و مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۷۷۳۱ (۱۳۹۲) انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج موجود در این نمودار، بیشترین مقاومت خمشی برای نسبت SCC-S100 (۳۸ درصد افزایش مقاومت

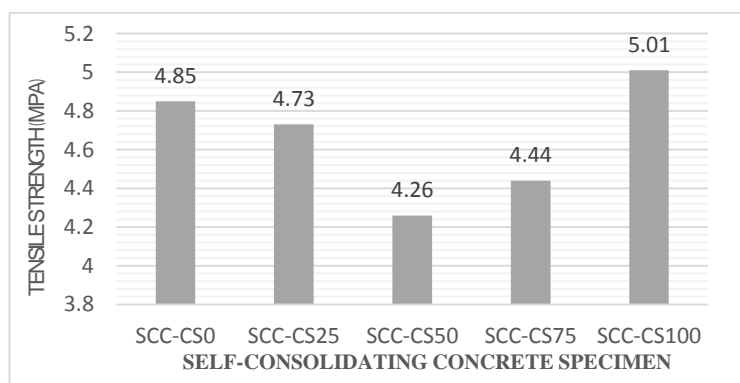


شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

۹. نتایج آزمایش کشش (دونیم شدن)

این آزمایش بر روی آزمون‌های به شکل استوانه با ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر و برای بتن ۲۸ روزه و مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷ (۱۳۹۴) انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج موجود در شکل ۱۱، بیشترین مقاومت کششی برای نسبت SCC-S100 و کمترین آن برای نسبت SCC-S50 می‌باشد.

با مقایسه مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ماسه شکسته مشاهده می‌شود که علیرغم افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ماسه شکسته در قیاس با بتن شاهد، مقاومت خمشی ۲۸ روزه در این نمونه‌ها تا حدودی افزایش یافته است. این درحالی است که در درصد جایگزینی ۲۵ درصد ماسه شکسته بجای ماسه طبیعی در زمان ۲۸ روزه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت کششی

افزایش فضای خالی در کوتاه مدت بعلت کامل نبودن عمل هیدراتاسیون (در بلند مدت بعلت کامل شدن عمل هیدراتاسیون فضاهای خالی پر می‌شود) و از سوی دیگر باعث درگیری بیشتر بین اجزای بتن می‌شود (افزایش قفل و بست مکانیکی). در نسبت SCC-S25 درصد شکستگی زیاد بوده و فضای خالی کمتری ایجاد می‌شود از سوی دیگر قفل

. این نتیجه نشان دهنده این مطلب است که جایگزینی ماسه شکسته در تمامی طرح‌های مورد مطالعه برای مقاومت کششی مطلوب نبوده است (SCC-S50 با ۱۳ درصد کاهش نسبت به SCC-S0). نسبت SCC-S100، به مقدار ۳/۳ درصد باعث افزایش مقاومت کششی شده است. این مقدار افزایش در طرح SCC-S25 ۲/۵ درصد بوده است. شکستگی از یک سو باعث

اساس نظریات ریلیم (RILEM, 1994) ارائه شده است. در جدول ۵ نتایج مربوط به جذب آب مویینه ۲۸ روزه به همراه ثابت جذب مویینه، ضرایب جذب مویینه ارائه شده است. با توجه به جدول ۴ (۷ روزه) و شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ضریب جذب مویینه برای نسبت SCC-S0 (ماسه طبیعی) از همه نسبت‌های اختلاط کمتر شده است. بعد از آن نسبت SCC-S100 قرار دارد. اما نسبت SCC-S25 دارای بیشترین شیب بوده که نشان‌دهنده بالاترین ضریب جذب مویینه می‌باشد. همچنین دو نسبت SCC-S50 و نسبت SCC-S75 دارای ضریب جذب یکسانی هستند.

و بست بهتری نسبت به نسبت SCC-S0 داشته و باعث افزایش مقاومت شده است. در نسبت SCC-S50 شکستگی بیشتر باعث فضای خالی بیشتری شده و مقاومت کاهش پیدا کرده است. اما با افزایش شکستگی و بیشتر شدن درگیری و اصطکاک بیشتر دانه‌ها افزایش مقاومت در نسبت SCC-S100 مشاهده می‌شود.

۱۰. نتایج آزمایش جذب آب مویینه

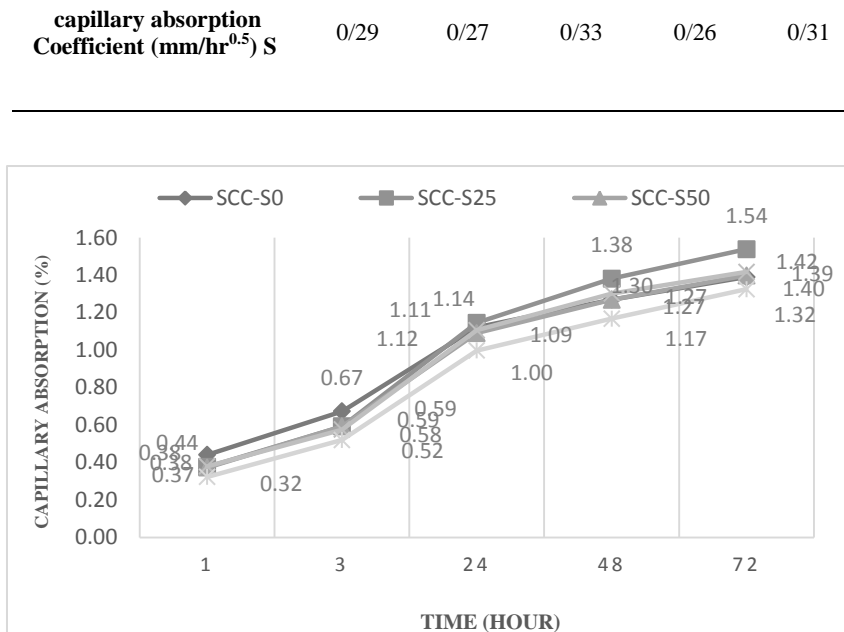
در جدول ۴ نتایج مربوط به جذب آب مویینه هفت روزه به همراه ثابت جذب مویینه (C)، ضریب جذب مویینه (S)، بر

جدول ۴. نتایج جذب آب مویینه ۷ روزه (در واحد سطح i (mm))

Time (hr.)	SCC-S0	SCC-S25	SCC-S50	SCC-S75	SCC-S100
1	1/00	0/85	0/85	0/85	0/73
3	1/52	1/34	1/35	1/29	1/17
24	2/54	2/59	2/48	2/47	2/24
48	2/87	3/13	2/88	2/91	2/62
72	3/14	3/48	3/18	3/17	2/98
capillary absorption constant (C)	0/94	0/67	0/74	0/71	0/59
capillary absorption Coefficient (mm/hr0.5) S	0/28	0/35	0/31	0/31	0/29

جدول ۵. نتایج جذب آب مویینه ۲۸ روزه جذب در واحد سطح، اصغر سلیمانی (۱۳۹۵)

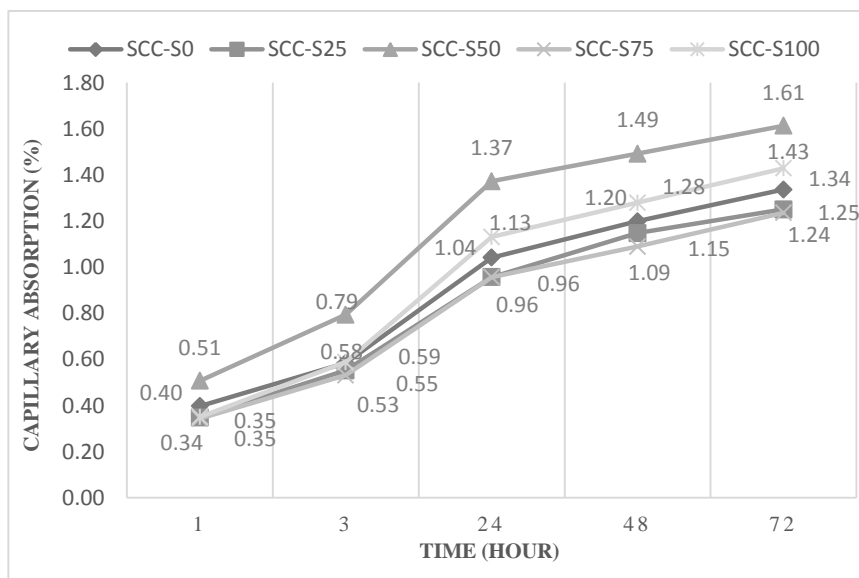
Time (hr.)	SCC-S0	SCC-S25	SCC-S50	SCC-S75	SCC-S100
1	0/92	0/79	1/16	0/78	0/78
3	1/36	1/25	1/81	1/2	1/31
24	2/42	2/17	3/13	2/17	2/52
48	2/78	2/6	3/41	2/47	2/85
72	3/1	2/83	3/68	2/8	3/18
capillary absorption constant (C)	0/8	0/69	1/13	0/68	0/68



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج نرخ جذب مویینه آب ۷ روزه

همچنین برای نمونه‌های ۲۸ روزه (با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۳) مشاهده می‌شود، ضریب جذب مویینه برای نسبت SCC-S75 از همه نسبت‌ها کمتر شده است بعد از آن نسبت SCC-S25 قرار دارد در حالیکه این نسبت در نمونه‌های ۷ روزه دارای بیشترین ضریب جذب بود. همچنین نسبت‌های ضریب جذب مویینه در بین طرح‌های مخلوط می‌باشد.

SCC-S0 و SCC-S100 به ترتیب بعد از نسبت SCC-S25 دارای ضریب جذب بیشتری هستند در حالیکه این دو نسبت در کوتاه مدت دارای کمترین ضریب جذب بودند. اما نسبت SCC-S50 دارای بیشترین شیب بوده که نشان‌دهنده بالاترین ضریب جذب مویینه در بین طرح‌های مخلوط می‌باشد.

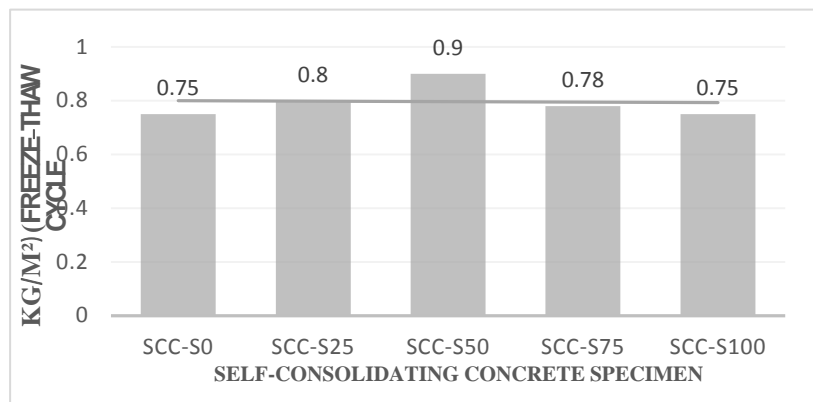


شکل ۱۳. مقایسه نتایج نرخ جذب مویینه آب ۲۸ روزه راهنمای اروپایی (The European Guidelines, 2005)

برای بتن ۲۸ روزه و مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۲۷۲۸ (۱۳۸۹) انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود.

۱۱. نتایج آزمایش چرخه یخ‌زدن و ذوب‌شدن

بر اساس آزمایش شریفی و همکاران (۱۳۹۲)، چرخه یخ‌زدن و ذوب‌شدن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری و



شکل ۱۴. نتایج چرخه ذوب‌شدن و یخ‌زدن

موئینه طرح‌های مورد مطالعه ارائه گردیده‌است. مطابق این جدول از اختلاف بین نتایج و نحوه تغییرات آن روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. همانگونه که از این جدول ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد ماسه شکسته جایگزین شده مقدار جزئی از مقادیر نمونه‌های با ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزینی کمتر است. این در حالی است که مقاومت خمشی و کششی این طرح‌ها در حد طرح‌های با درصد بالای جایگزینی سنگدانه‌های شکسته بوده و حتی در مواردی بیشتر نیز می‌باشد. در مجموع و با مقایسه نتایج هر دو جدول ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود که طرح‌های مخلوط با ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی ریزدانه شکسته بجای ریزدانه طبیعی علاوه بر دارا بودن مشخصات روانی مناسب و قابل قبول که جزو ویژگی‌های ذاتی و اصلی بتن‌های خودتراکم می‌باشد، دارای مشخصات مکانیکی مطلوبی در ساخت اعضا و قطعات بتن مسلح می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۴، نسبت SCC-S0 و SCC-S100 بهترین عملکرد را در بین نسبت‌ها در مقابل چرخه داشته است. اما نسبت SCC-S50 با ۲۰ درصد رشد نسبت به نسبت SCC-S0 دارای بیشترین کاهش وزن در مقابل چرخه ذوب و یخ می‌باشد. جمع‌بندی نتایج ویژگی‌های بتن تازه (مشخصات رئولوژی) و بتن سخت شده (مشخصات مکانیکی و دوام) مربوط به طرح‌های مورد مطالعه در جداول شماره ۶ و ۷ ارائه شده است. مطابق جدول ۶، اکثر مشخصه‌های روانی طرح‌های مخلوط حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد ماسه شکسته در محدوده پیشنهادی EFNARC قرار نداشته و عموماً در طرح‌های فوق و به ویژه SCC-S100 جداشدگی و پدیده انسداد مشاهده شده است. با توجه به این جدول و نتایج بدست آمده استفاده از مقادیر بالای جایگزینی ریزدانه شکسته بجای طبیعی از لحاظ تاثیرگذاری بر روی رئولوژی بتن مناسب نمی‌باشد. در جدول ۷ نتایج آزمون‌های مشخصات مکانیکی ۲۸ روزه و جذب

جدول ۶. مقایسه نتایج آزمون‌های ارزیابی مشخصات رئولوژیکی طرح‌های مورد مطالعه

Test	Studied Mixture					Acceptable range of EFNARC
	SCC-S0	SCC-S25	SCC-S50	SCC-S75	SCC-S100	
Slump flow (mm)	755	745	740	680	655	550-850
T50cm (S)	2/32	2/46	2/83	6/22	10/34	2-5

J Ring(mm)	2/45	2/65	2/75	4/67	9/5	<10
V-funnel (s)	10/35	9/62	6/6	10/58	38/54	6-12
L Box	0/97	0/97	0/97	0/97	Blockage	0/8-1
Summary	Proper rheological properties (Suitable for producing self-compacting concrete)			Occurrence of blockage and segregation (Improper for producing self-compacting concrete)		

جدول ۷. مقایسه نتایج آزمون‌های مشخصات مکانیکی و جذب آب مؤئینه طرح‌های مورد مطالعه

Test	Mix-design				
	SCC-S0	SCC-S25	SCC-S50	SCC-S75	SCC-S100
Compressive strength (MPa)	60/8	58/4	58/03	61/93	62/13
Flexural strength (MPa)	15/27	11/76	14/63	14/72	11/04
Tensile strength (MPa)	5/01	4/44	4/26	4/73	4/85
Capillary Absorption (72 hours)	3/18	2/8	3/68	2/83	3/1

۱۲. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

افزایش مقاومت فشاری نسبت‌های دارای ماسه شکسته شده است. بیشترین افزایش مقاومت برای نسبت SCC-S100 با افزایش ۸/۳ درصدی مشاهده شده است. بدلیل این که در کوتاه مدت، فرآیند هیدراتاسیون به طور کامل انجام نشده است، فضاهای خالی در بتن و عدم یکپارچگی کامل مصالح تشکیل دهنده آن منجر به عملکرد نامطلوب مقاومتی بتن در سنین کوتاه می‌شود. ضمن اینکه دانه‌های ماسه شکسته، علاوه بر شکستگی‌های مشهود در ابعاد ظاهری، ریز ترک‌هایی را در اثر وارد آمدن فشار و ضربه (برای شکسته شدن) در خود دارند. به جهت عدم اتمام فرآیند هیدراتاسیون و عملکرد منحصر به فرد بعضی از مصالح تشکیل دهنده بتن، مقاومت پایین نمونه‌ها در سنین کم مشاهده شد. در طولانی مدت، با توجه به تکمیل فرآیند گیرش و افزایش یکپارچگی اجزای تشکیل دهنده بتن، درگیری و اصطکاک بیشتر دانه‌های ماسه در نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته نسبت به نمونه‌های ساخته شده با ماسه طبیعی، باعث افزایش مقاومت شده است.

نتایج حاصل از آزمون چرخه یخبندان و ذوب شدن در کلیه نسبت‌های اختلاط تقریباً یکسان بوده است. به عبارت دیگر با

بر اساس نتایج بدست آمده از این پژوهش، تنش تسلیم تمامی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در محدوده مجاز بتن خودمترکم قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش‌ها طرح‌های با جایگزینی صد در صد ماسه شکسته (SCC-S100) دارای خاصیت پرکنندگی و جریان پذیری مناسبی نبوده و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش جعبه L، با پدیده انسداد روبه‌رو شده‌اند. در حالیکه طرح SCC-S25، بهترین عملکرد رئولوژیکی را در بین نمونه‌های ساخته شده را دارد. با بررسی نتایج آزمایش‌های جعبه L و قیف V نتیجه می‌شود، طرح‌های که یک چهارم ماسه آن را ماسه استاندارد شکسته تشکیل می‌دهد، پرکنندگی و قابلیت عبور بهتری در مقایسه با سایر طرح‌ها دارد.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، نشان می‌دهد جایگزینی ماسه شکسته با ماسه طبیعی در کوتاه مدت اثر مطلوبی ندارد. البته نسبت‌های SCC-S100 و SCC-S25 در کوتاه مدت مقاومت نسبتاً مطلوبی داشتند، ولی نسبت SCC-S50 دارای بیشترین کاهش (تقریباً هشت درصد) در کوتاه مدت می‌باشد. اما نتایج در بلند مدت نشان دهنده امکان جایگزینی ماسه شکسته با ماسه طبیعی بوده و حتی باعث

نشان می‌دهد، ولی در بلند مدت برای نسبت‌های SCC-S75 و SCC-S25 این ضریب کاهش پیدا کرده است. در نهایت جایگزین کردن ماسه شکسته با ماسه طبیعی مقدار ضریب جذب مویینه را افزایش داده است.

جایگزینی ماسه شکسته با ماسه طبیعی تفاوت قابل ملاحظه‌ای در نتایج حاصل از آزمون چرخه‌یخ‌زدن و ذوب‌شدن مشاهده نگردیده است. ضریب جذب مویینه برای تمامی نسبت‌ها در کوتاه مدت افزایش را نسبت به طرح‌های دارای ماسه طبیعی

منابع

- نویل، آدام، (۱۳۷۸). «خواص بتن»، ترجمه هرمز فامیلی، بازرگری چهارم، تهران، ایران، ابوریحان بیرونی.
- تدین، م.، مهاجری، پ.، شعبانیان، م.ر.، (۱۳۹۱). «بررسی تاثیر شکل سنگدانه بر مقاومت فشاری بتن»، چهارمین کنفرانس بین‌المللی ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
- حقوق طلب، م.، تدین، م.، دریایی، د.، (۱۳۹۰). «تاثیر درصد شکستگی سنگدانه‌ها بر روی عیار سیمان مصرفی طبق روش ملی نسبت مخلوط بتن»، سومین کنفرانس بین‌المللی ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
- کریمی‌نیا، نوری، پ.، (۱۳۸۹). «بررسی اثرات استفاده از درصد‌های مختلف ماسه شکسته بر جذب آب بتن‌های آماده»، اولین کنفرانس بین‌المللی بتن‌های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ایران.
- شریفی، ج.، نیکودل، م. ر.، یزدانی، م.، (۱۳۹۲). «تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن»، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۶۷ تا ۸۲.
- اسماعیلی، ج.، کسائی، ج.، علی‌زاده، غ.، (۱۳۸۹). «بررسی اثر مصالح سنگی ریزدانه شکسته و گردگوشه همجنس بر نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن»، اولین کنفرانس بین‌المللی بتن‌های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ایران.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۳۰۲، (۱۳۹۴). با عنوان: سنگدانه‌های بتن - ویژگی‌ها - و اصلاحیه مربوطه. ص ۴۵.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO 4980، (۱۳۹۶). با عنوان: تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگدانه‌ریز.
- استاندارد ملی ایران شماره INSO 4982، (۱۳۹۶). با عنوان: تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگدانه درشت.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۳۲۰۳-۱۰، (۱۳۹۲). با عنوان: آزمون بتن تازه - قسمت ۱۰- بتن خود تراکم آزمون قیف جعبه L شکل - ص ۱۱.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۳۲۰۳-۹، (۱۳۹۲). با عنوان: آزمون بتن تازه - قسمت ۹- بتن خود تراکم آزمون قیف V شکل - ۱۳۹۲. ص ۹.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۱۱۲۷۰، (۱۳۹۳). با عنوان: بتن - اندازه‌گیری جریان اسلامپ بتن خود تراکم - روش آزمون - ۱۶ ص.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۱۱۲۷۱، (۱۳۹۳). با عنوان: بتن - اندازه‌گیری قابلیت عبور بتن خود تراکم با استفاده از حلقه J - روش آزمون - ۱۴ ص.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۱۶۰۸-۳، (۱۳۹۳). با عنوان: بتن سخت شده - قسمت ۳- تعیین مقاومت فشاری آزمون‌ها - روش آزمون - ص ۲۵.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۶۰۴۷، (۱۳۹۴). با عنوان: بتن - تعیین مقاومت کششی دو نیم کردن آزمون‌های استوانه ای بتن - روش آزمون - ۱۵ ص.
- استاندارد ملی ایران با شماره: INSO ۱۷۷۳۱، (۱۳۹۲). با عنوان: مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده با بارگذاری نقطه‌ای در مرکز - روش آزمون - ۱۲ ص.
- استاندارد ملی ایران با شماره: ISIRI ۱۲۷۲۸، (۱۳۸۹). با عنوان: جداول بتنی پیش ساخته - ویژگیها و روشهای آزمون و اصلاحیه مرتبط - ۸۹ ص.
- سلیمانی، ا.، (۱۳۹۵). «تعیین تاثیر درصد شکستگی سنگدانه‌های استاندارد بر روی دوام بتن»، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، صفحه ۱۰۵ تا ۱۱۱.

P. Kumar Mehta Paulo J. M. Monteiro, October 20, 2001. "Concrete Microstructure, Properties and Materials", Third Edition, McGraw-Hill.

- Poon CS, Shui ZH, Lam L, Fok H, and Kou SC, (2004). "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", Department of Civil and Structural Engineering, PP. 31-36.
- Cordeiro CGC, Alvarenga LMSC, and Rocha CAA, (2016). "Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate", Construction and Building Materials, No 111: pp. 766-773.
- Sata V, Jaturapitakkul C, and Kiattikomol K, (2007). "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", Construction and Building Materials, No 21. pp. 1589-1598.
- Manguriu GN, Karugu CK, Oyawa WO, Abuodha SO, and Mulu PU. "Partial replacement of natural river sand with crushed sand in concrete production", Global Engineers & Technologists Review, Volume 3. No 4: pp. 7-14, (2013).
- Vijayaraghavan N, and Wayal AS. "Effects of manufactured sand on compressive strength and workability of concrete". International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Volume 2. No 2: pp. 228-232, (2013).
- Ilangovana R, Mahendrana N, and Nagamanib K. "Strength and Durability properties of Concrete Containing Quarry Rock Dust as Fine Aggregate", Journal of Engineering and Applied Sciences, pp. 20-26, (2008).
- BS EN 12390-3, 2009. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 22P.
- ASTM C496, 2004, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 5P.
- ASTM C293, 2007 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), 3P.
- RILEM, CPC 11.2, "Absorption of water by concrete by capillarity", RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, E & FN SPON, Pages: 34 - 35, 1994.
- The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use, May 2005.