

## تأثیر استفاده ترکیبی از خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم

رحمت مدندوست<sup>1</sup>، سید یاسین موسوی<sup>2</sup>

1- عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه گیلان، رشت

تلفن: 09113314970، [rmadandoust@yahoo.com](mailto:rmadandoust@yahoo.com)

کد مقاله: E، کد انجمن: 4E

### خلاصه

در این مطالعه تأثیر دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر خواص بتن خودتراکم مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا، سیزده طرح اختلاط بتن خودتراکم با درصدهای متفاوت جایگزینی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در یک نسبت های ثابت آب به چسباننده (0/38) در نظر گرفته شد. خواص بتن تازه خودتراکم توسط جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر 50 سانتیمتر، قیف V شکل و جعبه L شکل مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین جریان اسلامپ بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقال مورد توجه می‌باشد. خواص بتن سخت شده توسط مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، جذب آب اولیه (30 دقیقه) و جذب آب نهایی مورد سنجش قرار گرفته خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد بتن خودتراکم با پایداری و قابلیت تراکم مطلوب با استفاده ترکیبی از دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج قابل تولید می‌باشد. همچنین ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج می‌تواند مقاومت فشاری را تا 33 درصد افزایش دهد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، متاکائولن، خواص بتن تازه، زمان انتقال بتن

### 1. مقدمه

بتن خودتراکم از گروه بتن با کارایی بالا (بتن توانمند) محسوب می‌گردد. بتن خودتراکم قادر است بدون احتیاج به لرزاندن خارجی، در مکان‌هایی با حجم بالای آرماتور بدون جداشدگی و آب انداختگی جریان پیدا نموده، قالب را پر نماید، و فضای اطراف آرماتورها را در برگیرد. بتن خودتراکم مزایا و برتری‌های فراوانی نسبت به بتن معمولی دارد، که از آن جمله می‌توان به افزایش سرعت اجرای سازه‌های بتنی، کاهش نیروی انسانی، سهولت بتن ریزی، بهبود کیفیت مکانیکی و مشخصه‌های دوام، امکان اجرای سازه‌های بتنی با تراکم

آرمتور بالا و انتخاب مقاطع کوچک با میلگرد های فشرده (آزادی عمل بیشتر در طراحی)، امکان ایجاد مقاطع ظریفتر بتنی، کاهش آلودگی صوتی بدلیل حذف عمل ویبراسیون، کاهش مصرف انرژی و محیط کاری ایمن تر اشاره نمود.

جهت تولید بتن خودتراکم با پایداری و قابلیت تراکم مطلوب استفاده از افزودنی های شیمیایی، افزایش میزان پودر و همچنین کاهش حجم درشت دانه توصیه شده است. بر طبق EFNARC [1]، عبارت پودر به عناصری از بتن خودتراکم که دارای قطر کوچکتر از  $125 \mu\text{m}$  می باشند شامل کسری از ماسه، سیمان و پرکننده اطلاق می شود.

به سه دلیل اصلی در مطالعات جهت افزایش میزان پودر معمولاً افزایش میزان سیمان توصیه نمی گردد. (1) استفاده از میزان بالای سیمان می تواند سبب تنزل خواص مهندسی بتن گردد. (2) در حدود 7 درصد از کل انتشار گاز  $\text{CO}_2\text{eq}$  (از عوامل گرم شدن کره زمین و تغییر در شرایط آب و هوایی) بر اثر تولید کلینکر در کارخانجات سیمان می باشد که نشان دهنده این واقعیت می باشد که استفاده از میزان بالای سیمان سبب افزایش آلودگی زیست محیطی می گردد. (3) برای تولید کلینکر احتیاج به استفاده از مقادیر بالایی از انرژی می باشد که کاهش مصرف سیمان می تواند در کاهش مصرف انرژی مفید واقع گردد. لذا با توجه به نکات ذکر شده که نشان دهنده ضرورت استفاده بهینه از سیمان در ساخت بتن خودتراکم دارد، معمولاً افزایش میزان پودر در ساخت بتن خودتراکم شامل افزایش میزان پرکننده ها می گردد.

در سالیان اخیر توجه خاصی به استفاده از مواد ضایعاتی صنعتی و یا کشاورزی به عنوان پرکننده در بتن خودتراکم شده است. از جمله مهمترین مواد ضایعاتی کشاورزی پوسته برنج می باشد که در منطقه شمال کشور نیز شاهد تولید آن می باشیم. در هنگام عمل شالیکوبی، 22 درصد از وزن شالی بصورت پوسته شلتوک و بقیه بصورت برنج، برنج شکسته و سیوس می باشد. به علت خواص ضعیف تغذیه ای پوسته برنج، از آن به عنوان خوراک دام نمی توان استفاده نمود [2]. از طرفی به علت بافت سیلیسی، این ماده در برابر پوسیدگی طبیعی از خود مقاومت نشان می دهد [2]. لذا می بایست توجه خاصی به بازیافت این محصول کشاورزی نمود. در بعضی از نقاط دنیا از خاکستر پوسته برنج به عنوان سوخت در نیروگاه های تولید انرژی و یا در کارخانه های آسیاب برنج به عنوان روشی مناسب جهت کاهش حجم ضایعات پوسته برنج استفاده می شود. در یک برآورد ساده برای تولید هر تن برنج، در حدود 200 کیلوگرم پوسته برنج تولید می شود که سوزاندن آن منجر به تولید 40 کیلوگرم خاکستر پوسته برنج می گردد. خاکستر به جا مانده از سوزاندن پوسته برنج در دمای کنترل شده را می توان در ساختار بتن خودتراکم استفاده نمود.

مطالعاتی متفاوتی در راستای استفاده از خاکستر پوسته برنج بصورت تنها پرکننده موجود در ترکیب بتن صورت پذیرفته است. به عنوان مثال، Memon و همکاران [3] از خاکستر پوسته برنج به جای اصلاح کننده لزجت در ساخت بتن خودتراکم استفاده نمودند. نتایج آنان نشان می دهد که می توان خاکستر پوسته برنج را به عنوان اصلاح کننده لزجت بتن به کار برد در حالیکه شاهد کاهش قیمت نهایی بتن نیز باشیم. همچنین توسط Safiuddin [4] تولید بتن توانمند خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج مورد بررسی قرار گرفت. اخیراً مقاومت و دوام بتن حاوی خاکستر پوسته برنج توسط Madandoust و همکاران [5] مورد بررسی قرار گرفته است. آنان گزارش نمودند که هرچند استفاده از خاکستر پوسته برنج در کوتاه مدت سبب بهبود دوام بتن خودتراکم می گردد، ولی مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن را کاهش می دهد. کاهش مقاومت فشاری اولیه بتن می تواند در پروژه های اجرایی باعث ایجاد مشکلاتی شود. به عنوان مثال کاهش مقاومت اولیه برای پروژه هایی که در آنها نیاز به کاهش زمان اجرا می باشد غیر قابل قبول است. لذا می بایست برای جبران کاهش مقاومت اولیه تمهیدات خاصی اندیشید. در این مطالعه برای حل این مشکل استفاده ترکیبی از خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس پیشنهاد خواهد گردید. متأسفانه بر طبق اطلاعات نویسنده مطالعه جامعی در ارتباط با تاثیر ترکیبی افزودن دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم صورت نپذیرفته است که در این مطالعه در این راستا برنامه ریزی شده است. جهت ارزیابی خواص بتن تازه خودتراکم، آزمایش های جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر 50 سانتیمتر ( $T_{50}$ )، شاخص پایداری چشمی، قیف V شکل و جعبه L شکل انتخاب شده اند. از طرفی تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم با تاخیر در زمان انتقال بتن نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین، خواص بتن سخت شده توسط مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، جذب آب اولیه (30 دقیقه) و جذب آب نهایی مورد سنجش قرار خواهد گرفت.

## 2. برنامه آزمایشگاهی

### 1.2. مصالح مصرفی

در این مطالعه سیمان پرتلند معمولی تیپ 1 و همچنین دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج به عنوان مواد چسباننده استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی مربوط به مواد چسباننده در جدول 1 موجود می‌باشد. ماسه از نوع رودخانه‌ای و همچنین شن از نوع شکسته با بزرگترین اندازه اسمی 12/5 میلیمتر و درصد جذب آب 0/73 می‌باشد. همچنین به جهت ایجاد روانی در محدوده مطلوب از کاهنده قوی آب (High Range Water Reducer) با نام تجاری Glenium51 با چگالی مابین  $1/06\text{g/cm}^3$  و  $1/08\text{g/cm}^3$  استفاده شده است.

جدول 1- ترکیبات شیمیایی سیمان، دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج

خاکستر پوسته برنج	دوده سیلیس	سیمان	ترکیبات شیمیایی (%)
90/9	52/1	21/46	SiO <sub>2</sub>
0/83	42/8	5/55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0/6	1/6	3/46	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0/8	0/2	63/95	CaO
0/56	0/21	1/86	MgO
-	0/00	1/42	SO <sub>3</sub>
1/55	0/43	0/8	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O

### 2.2. طرح‌های اختلاط بتن و آماده سازی نمونه‌ها

جهت رسیدن به اهداف این مطالعه، در مجموع سیزده اختلاط بتن خودتراکم طراحی شده است که شامل یک اختلاط بتن خودتراکم مینا، سه اختلاط بتن خودتراکم حاوی درصد‌های متفاوت دوده سیلیس (5، 10 و 15 درصد)، سه اختلاط بتن خودتراکم حاوی درصد‌های متفاوت خاکستر پوسته برنج (10، 15 و 20 درصد) و شش اختلاط بتن خودتراکم حاوی ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج می‌باشد. جزئیات اختلاط‌های طراحی شده در جدول 2 ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نسبت آب به چسباننده در تمامی سیزده اختلاط ثابت و به میزان 0/38 در نظر گرفته شده است. درصد جایگزینی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج نیز بر مبنای مطالعات گذشته و همچنین طرح‌های آزمایشگاهی اولیه انتخاب شده است.

در بتن خودتراکم جریان اسلامپ به تنهایی پارامتر کنترل کننده روانی نمی‌باشد. لذا در مطالعات معمولاً جریان اسلامپ را در محدوده کنترل شده نگاه داشته و تاثیر پارامترهای موجود را در دیگر خواص بتن تازه خودتراکم جستجو می‌نمایند. محدوده‌ای که در این مطالعه انتخاب گردیده است، جریان اسلامپ مابین 650 تا 750 میلیمتر بر اساس رده دوم (SF2) EFNARC [1] است. برای رسیدن به این محدوده از جریان اسلامپ میزان کاهنده قوی آب بین 2/19 تا  $8/17\text{ kg/m}^3$  تنظیم شده است.

برای ساخت نمونه‌ها روندی مشابه با آنچه که Khayat و همکاران [6] استفاده نموده‌اند، بکار گرفته شد. بر این مینا، ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه بمدت 30 ثانیه در بتونیر مخلوط شد. پس از آن، نصف آب مصرفی بمدت 1 دقیقه در حالیکه که بتونیر روشن بود به مخلوط اضافه گردید. بعد از این مرحله بتونیر 1 دقیقه خاموش شده و سپس مواد چسباننده شامل دوده سیلیس، خاکستر پوسته

برنج و سیمان اضافه گردید و بمدت 1 دقیقه دیگر در بتونیر مخلوط شد. درحالیکه که بتونیر بمدت 3 دقیقه روشن بود، آب باقیمانده و ماده افزودنی کاهنده قوی آب به مخلوط اضافه گردید. در نهایت بعد از 2 دقیقه استراحت، بتن به میزان 3 دقیقه دیگر مخلوط گردید.

جدول 2- جزئیات طرح اختلاط بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج ( $\text{kg/m}^3$ )

اصلاح کننده لزوجت	کاهنده قوی آب	شن	ماسه	آب	خاکستر پوسته برنج	دوده سیلیس	سیمان	نام اختلاط
1/24	2/85	810	937	179	-	-	470	SCC
-	2/19	807	937	179	-	23/5	446/5	SF5
-	3/3	802	931	179	-	47	423	SF10
-	5/23	795	927	179	-	70/5	399/5	SF15
-	4/15	800	933	179	47	-	423	RHA10
-	6/35	795	927	179	70/5	-	399/5	RHA 15
-	8/17	790	922	179	94	-	376	RHA 20
-	6/04	800	920	179	46	23/5	399/5	RH10SF5
-	6/55	795	917	179	23/5	47	399/5	RH5SF10
-	8/17	793	913	179	70/5	23/5	376	RH15SF5
-	7/85	790	911	179	46	47	376	RH10SF10
-	4/47	794	918	179	23/5	23/5	423	RH5SF5
-	5/87	788	918	179	23/5	70/5	376	RH5SF15

### 3.2. آزمایش های انجام شده

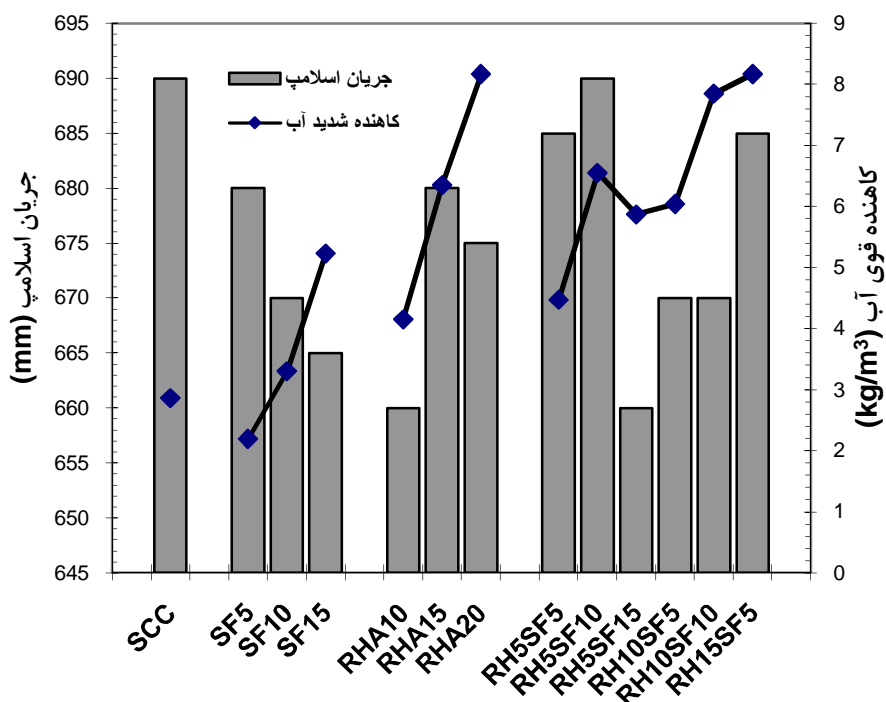
آزمایش های انجام پذیرفته در این مطالعه به سه قسمت آزمایش های بتن تازه، آزمایشات بتن خودتراکم با تاخیر زمانی در انتقال بتن و آزمایش های بتن سخت شده طبقه می شوند. آزمایش های بتن تازه خودتراکم شامل جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی، قیف V شکل و جعبه L شکل بر مبنای EFNARC انجام شده است [1]. معمولاً بلافاصله بعد از ساخت، می بایست بتن را با حفظ خواص بتن تازه از محل ساخت به محل بتن ریزی نهایی منتقل نمود. بتن خودتراکم به علت نسبت کم آب به سیمان و همچنین مقدار مواد سیمانی بالا احتیاج به توجه بالاتری در مقوله تاخیر زمانی در انتقال بتن دارد. در این مطالعه تاثیر استفاده از دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در میزان کاهش جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال مورد بررسی قرار گرفت. پس از اتمام آزمایش های بتن تازه نمونه ها در داخل قالب ها مربوطه بدون هرگونه تراکم خارجی ریخته شدند. مقاومت فشاری بتن خودتراکم در سنین مختلف شامل 3، 7، 14، 28 و 90 روزگی بر روی نمونه های مکعبی 10 سانتیمتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر مقاومت فشاری، نمونه های استوانه ای 15×30cm جهت بررسی مقاومت کششی بتن خودتراکم در سن 28 روزگی بر مبنای آزمایش شکافت استفاده گردید. برای هر طرح اختلاط میانگین مقاومت فشاری و کششی 3 نمونه ملاک قرار گرفته است. جذب آب بتن خودتراکم در سن 28 روزگی اندازه گیری شد. بر این مبنای، برای هر اختلاط 3 نمونه در اون در دمای 100-110 درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری شدند و سپس جذب آب اولیه (30 دقیقه) و نهایی (زمانی که تفاضل جرم بعد از فاصله های زمانی 12 ساعته قابل چشم پوشی است) گزارش شده است.

### 3. نتایج آزمایش ها و بررسی آنها

## 1.3. خواص بتن تازه

## 1.1.3. جریان اسلامپ

تغییرات میزان جریان اسلامپ و کاهنده قوی آب در اختلاط های بتن خودتراکم حاوی ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در شکل 1 نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود مقدار جریان اسلامپ در تمامی نمونه ها در محدوده 660 تا 690 میلیمتر متغییر می باشد. بر طبق EFNARC [1] اختلاط های این مطالعه را می توان در رده دوم بتن خودتراکم (SF2) طبقه بندی نمود. این رده از بتن خودتراکم را می توان در بسیاری از کاربردهای معمولی مهندسی مانند تیر و یا ستون استفاده نمود.



شکل 1- جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در مقابل کاهنده شدید آب

میزان جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم معمولی به میزان 690 سانتیمتر تخمین زده شده است که با افزودن 5، 10 و 15 درصد دوده سیلیس به ترتیب به میزان 680، 670 و 665 میلیمتر تغییر خواهد نمود. در نمونه های حاوی دوده سیلیس به علت ریزی بالاتر آن نسبت به سیمان، تقاضای آب نسبت به بتن خودتراکم معمولی افزایش می یابد. لذا در این مطالعه برای حفظ جریان اسلامپ با افزایش میزان دوده سیلیس، میزان کاهنده قوی آب افزایش یافته است. از طرفی افزودن خاکستر پوسته برنج سبب کاهش میزان جریان پذیری بتن خودتراکم گردیده است. هرچند همچنان قادر به تولید رده دوم بتن خودتراکم (SF2) هستیم.

جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی ترکیب سه گانه سیمان و دو پرکننده دیگر در مقابل با فوق روان کننده مصرفی نیز در شکل 1 نمایش داده شده است. نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس در کنار یکدیگر روند مشابه با آنچه در استفاده مجزا از هر کدام دیده شد را دنبال می نماید. شایان ذکر است در نمونه هایی که این روند وجود ندارد، احتمالاً استفاده از مقادیر بالاتر کاهنده قوی آب باعث بوجود آمدن رفتاری متناقض شده است. استفاده همزمان از خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس توانسته است باعث بهبود روانی در مقایسه با استفاده تنها از خاکستر پوسته برنج گردد. به عنوان مثال، در میزان ثابت کاهنده قوی آب و میزان جایگزینی 20 درصدی پرکننده، اختلاط RH15SF5 دارای جریان اسلامپ بالاتری از RH20 با 20 درصد خاکستر پوسته است.

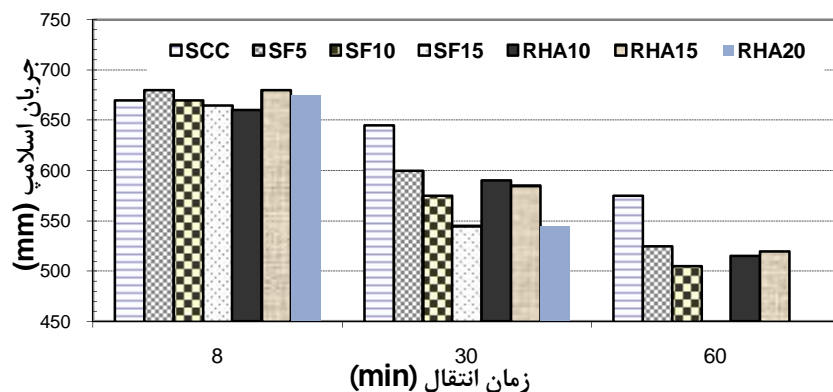
### 2.1.3. شاخص پایداری چشمی

در این مطالعه، از شاخص پایداری چشمی به عنوان یکی از ساده ترین و مشهورترین روش ها برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم استفاده شده است. بر این اساس تمامی نمونه ها دارای شاخص پایداری چشمی صفر و یا 1 می باشند که نشان دهنده پایداری مناسب بتن خودتراکم حاوی انواع پرکننده ها است.

### 3.1.3. تغییرات جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال

تأثیر استفاده مجزا و ترکیبی از دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقال به ترتیب در شکل های 2 و 3 نمایش داده شده است. صرفنظر از حضور و یا عدم حضور پرکننده با گذشت زمان انتقال، میزان جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال کاهش می یابد. بر طبق مطالعه انجام پذیرفته توسط Lachemi و Bouzoubaa، عموماً بتن خودتراکم با جریان اسلامپ زیر 50 سانتیمتر نمی تواند از بین آرماتوربندی حجیم عبور نماید و بنابراین نمی توان در عمل آن را در رده بتن خودتراکم تقسیم بندی نمود [7]. در این مطالعه نیز فقط جریان اسلامپ بالای 50 سانتیمتر ملاک قرار داده شده است.

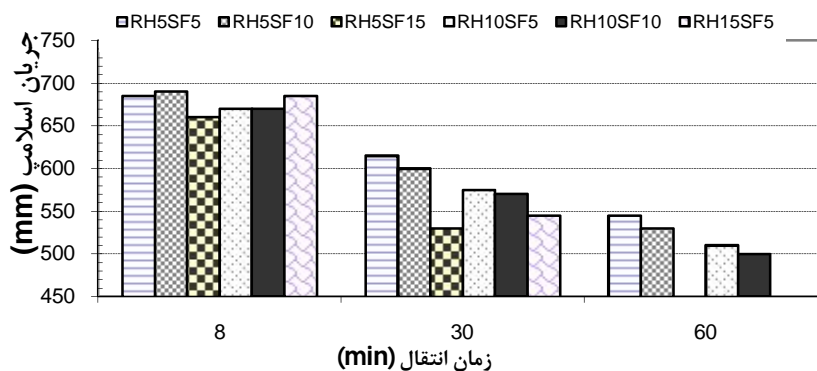
میزان کاهش جریان اسلامپ در بتن خودتراکم مینا بعد از 30 دقیقه در حدود 11 درصد می باشد که در صورت وجود 5، 10 و 15 درصد دوده سیلیس در بتن خودتراکم به ترتیب به میزان 12، 14 و 18 درصد افزایش می یابد. لذا می توان نتیجه گرفت که وجود دوده سیلیس می تواند باعث کاهش ابقاء جریان اسلامپ گردد. همچنین با گذشت 60 دقیقه از زمان انتقال بتن خودتراکم حاوی 5 و 10 درصد دوده سیلیس قادر هستند 77 و 75 درصد از جریان اسلامپ خویش را حفظ نمایند. این درحالیست که میزان جریان اسلامپ در جایگزینی 15 درصد دوده سیلیس با گذشت 60 دقیقه از زمان انتقال پایین تر از 500 میلیمتر می باشد که در نتیجه نمی توان آن را به عنوان بتن خودتراکم در نظر گرفت. بر مبنای نتایج نمایش داده شده در شکل 2، مقادیر بالاتری از کاهش جریان اسلامپ در نمونه های حاوی مقادیر بالاتری از خاکستر پوسته برنج وجود دارد. به عنوان مثال، میزان ابقاء جریان اسلامپ در نمونه RHA10 با وجود 10 درصد خاکستر پوسته برنج بعد از گذشت 60 دقیقه از زمان انتقال در حدود 78 درصد می باشد، در حالی که نمونه حاوی 20 درصد خاکستر پوسته برنج بعد از گذشت 60 دقیقه نمی تواند به عنوان بتن خودتراکم طبقه بندی گردد.



شکل 2- تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج با گذشت زمان انتقال

شکل 3 نمایش دهنده تأثیر ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر جریان اسلامپ بتن خودتراکم می باشد. بر این مبنای تقریباً تمامی اختلاط ها توانسته اند تا 30 دقیقه جریان اسلامپ بالای 500 میلیمتر داشته باشند. از شکل 3، اختلاط های RH5SF5،

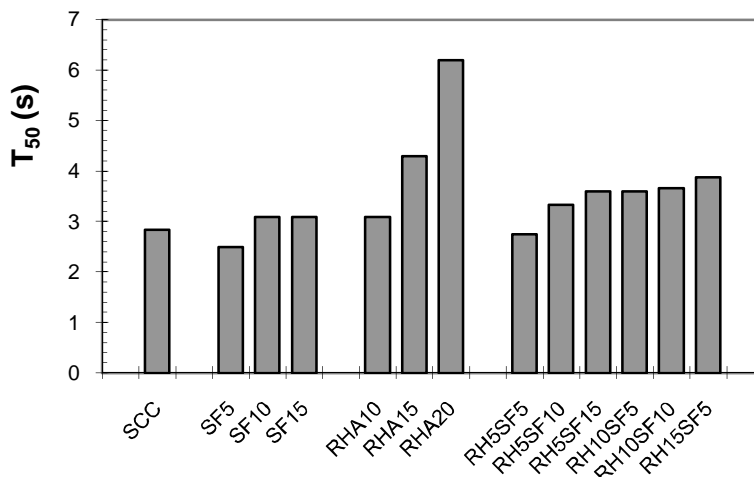
RH10SF5 و RH5SF10 می تواند حتی با گذشت 60 دقیقه زمان انتقال اسلامپ خویش را حفظ نمایند. با مقایسه اشکال 2 و 3 می توان نتیجه گرفت همان روندی که دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بصورت مجزا در ساختار بتن خودتراکم دارا بودند، در حالت ترکیبی نیز همان نقش را ایفاء می نمایند.



شکل 3- تأثیر ترکیب خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس بر تغییرات جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال

#### 4.1.3. زمان $T_{50}$

تأثیر میزان های متفاوت جایگزینی پرکننده ها بر زمان  $T_{50}$  در شکل 4 نمایش داده شده است.



شکل 4- تأثیر میزان های متفاوت جایگزینی پرکننده ها بر زمان  $T_{50}$

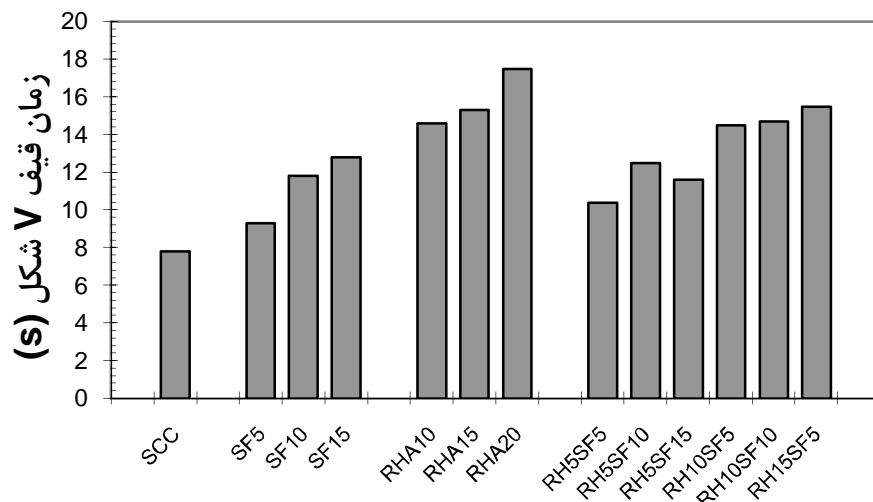
همانگونه که ملاحظه می گردد، میزان زمان  $T_{50}$  در بتن خودتراکم مینا به میزان 2/84 ثانیه نتیجه گردیده است. زمان  $T_{50}$  در محدوده 2/5 تا 3/1 ثانیه برای نمونه های حاوی دوده سیلیس، در محدود 3/1 تا 6/2 ثانیه برای نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج و همچنین در محدوده 2/75 تا 3/88 ثانیه برای نمونه های حاوی ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج متغییر است. بر این مینا زمان رسیدن به قطر 50 سانتیمتر در اغلب اختلاط ها بین 2 تا 5 ثانیه است. در این محدوده از زمان  $T_{50}$ ، لزجت مخلوط به اندازه کافی بالا می باشد تا باعث افزایش مقاومت در برابر جداسدگی و همچنین محدود نمودن فشار بیش از حد به قالب شود [8]. زمان  $T_{50}$

کمتر از 2 ثانیه می تواند باعث جداسدگی و زمان بالاتر از 5 ثانیه می تواند باعث افزایش احتمال انسداد گردد. شکل 4 همچنین نشان می دهد که در اغلب موارد افزایش انواع پرکننده های مورد مطالعه شامل دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج باعث افزایش زمان  $T_{50}$  می گردد. در این حالت نیز پرکننده ها از رفتاری مشابه با آنچه در حالت ترکیب دوگانه از خود نشان داده بودند، تبعیت خواهند نمود. لازم به ذکر می باشد درحالیکه افزودن خاکستر پوسته برنج سبب افزایش مقدار لزجت ماتریس می گردد یا به عبارتی زمان  $T_{50}$  را تا 6/12 ثانیه افزایش می دهد، ترکیب آن با دوده سیلیس این مقدار را به زیر 5 ثانیه کاهش می دهد.

### 5.1.3. زمان عبور از قیف V شکل

زمان عبور از قیف V شکل برای تمامی اختلاط های بتن خودتراکم در شکل 5 نشان داده شده است. بر مبنای این شکل، زمان عبور از قیف V شکل برای بتن خودتراکم مینا به میزان 7/8 ثانیه محاسبه شده است. این مقدار برای بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس، خاکستر پوسته برنج و ترکیب آن ها به ترتیب در محدوده 9/3-12/8 ثانیه، 7/9-14/7 ثانیه و 6/6-17/5 ثانیه متغییر می باشد، بالاتر می باشد. توصیه نامه EFNARC [1] زمان عبور از قیف V شکل بالاتر از 25 ثانیه را توصیه نمی کند. با اینحال اختلاط های بتن خودتراکم دارای زمان عبور از قیف V شکل پایین تر از 20 ثانیه هستند.

مشابه با آنچه در بخش زمان رسیدن به قطر 50 سانتیمتر ملاحظه گردید، زمان عبور از قیف V شکل تقریباً در تمامی نمونه های بتن خودتراکم با حضور پرکننده افزایش می یابد. به عنوان مثال، حضور 5، 10 و 15 درصدی دوده سیلیس باعث افزایشی به ترتیب 20، 51 و 62 درصدی در زمان عبور از قیف V شکل شده است. افزایش زمان عبور از قیف V شکل با افزودن دوده سیلیس نشان دهنده افزایش لزجت بتن خودتراکم در حضور دوده سیلیس دارد. وجود خاکستر پوسته برنج نیز سبب افزایش زمان عبور قیف V شکل و به عبارتی افزایش لزجت اختلاط شده است. شکل 5 همچنین نشان می دهد که وجود توأم خاکستر پوسته برنج با دوده سیلیس نسبت به وجود خاکستر پوسته برنج به عنوان تنها پرکننده زمان عبور از قیف V شکل را کاهش داده است. روندی مشابه ای توسط Kannan و Ganesan [9] برای ترکیب خاکستر پوسته برنج و متاکائولن نیز گزارش شده است.



شکل 5- تأثیر وجود دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر زمان عبور از قیف V شکل

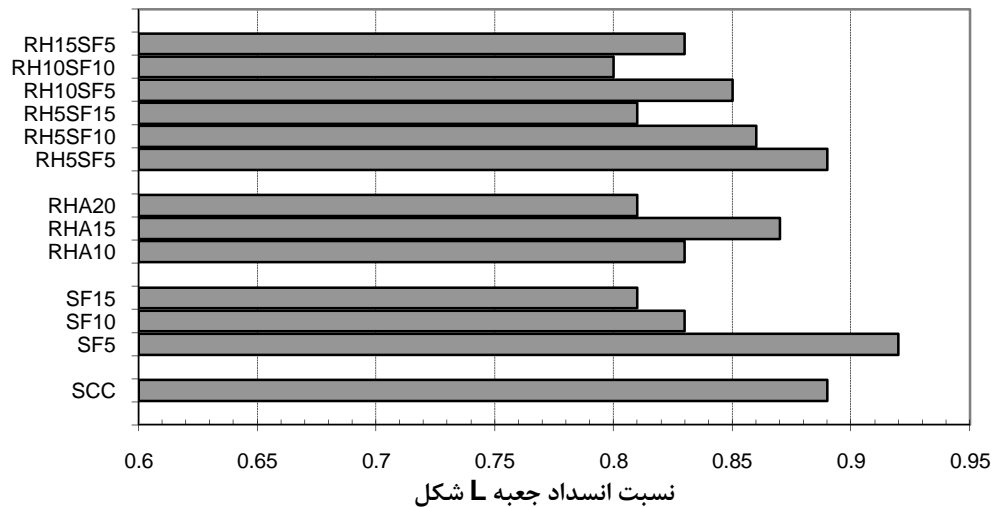
بر مبنای جدول 2، در نمونه های حاوی پرکننده برای رسیدن به پایداری مناسب احتیاج به استفاده از هیچ گونه اصلاح کننده لزجت وجود ندارد، در حالیکه در ساخت بتن خودتراکم مینا از اصلاح کننده لزجت استفاده شد. لذا می توان بدین گونه استنباط نمود که



پرکننده ها خود می تواند به عنوان یک اصلاح کننده لزجت عمل نمایند. با توجه به قیمت بالای اصلاح کننده های لزجت، این امر می تواند سبب کاهش قیمت نهایی بتن خودتراکم گردد. به عنوان مثال، استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان اصلاح کننده لزجت در تولید بتن خودتراکم اقتصادی توسط Memon و همکاران [3] مورد بررسی قرار گرفته است.

### 6.3. شاخص انسداد

شکل 6 نشان دهنده تأثیر انواع پرکننده ها بر میزان نسبت انسداد بتن خودتراکم می باشد. بتن خودتراکم مینا دارای نسبت انسداد 0/89 است که با جایگزینی درصدهای متفاوت دوده سیلیس در محدوده 0/82 تا 0/91 متغییر است. این محدوده با افزودن خاکستر پوسته برنج نیز مابین 0/81 تا 0/87 می باشد. ترکیب خاکستر پوسته برنج با دوده سیلیس نیز توانسته است به میزان نسبت انسداد بالاتر از 0/8 برسد. بر طبق EFNARC [1]، میزان نسبت انسداد بالای 0/8 توصیه نمی گردد که بر این مینا تمامی اختلاط های حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در این رده قرار می گیرند. توسط Hassan و همکاران [10] نتیجه شده است که افزودن دوده سیلیس باعث افزایش قابلیت عبورکنندگی بتن خودتراکم می گردد که البته این روند در بعضی از اختلاط های ارائه شده در این مطالعه برقرار نمی باشد.

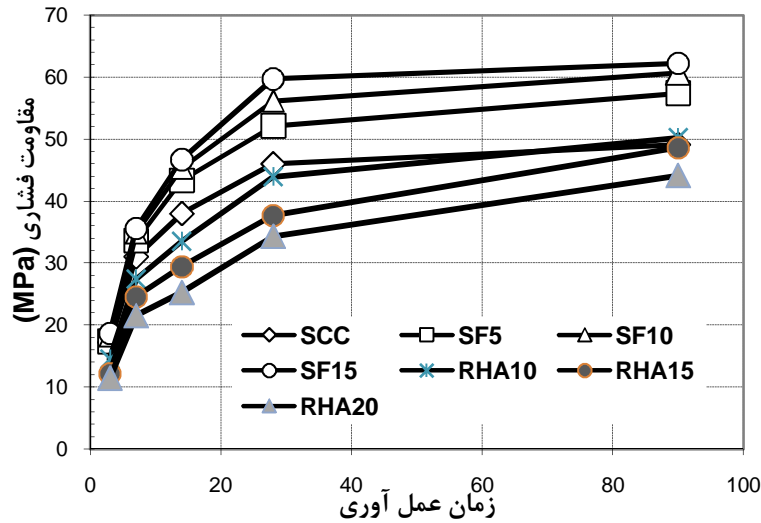


شکل 6- نسبت انسداد بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج

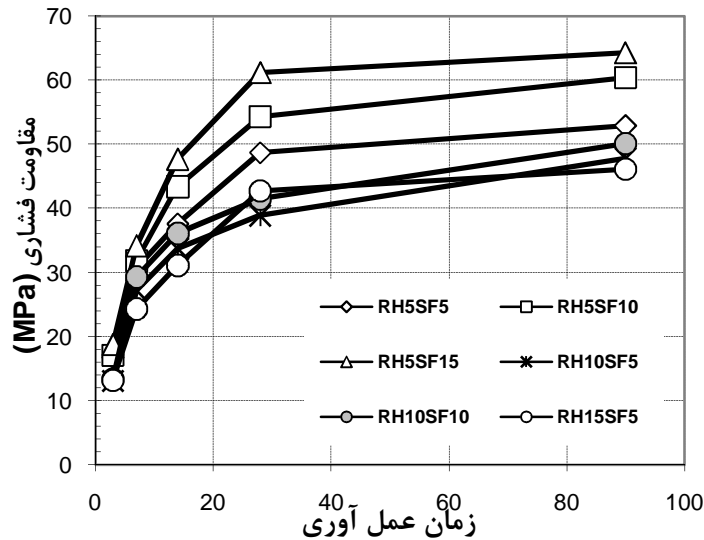
### 2.3. خواص بتن سخت شده

#### 1.2.3. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در سنین مختلف شامل 3، 7، 14، 28 و 90 روزگی محاسبه گردیده است و نتایج در شکل های 7 و 8 نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، در تمامی نمونه ها شاهد افزایش مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه ها هستیم. هرچند این افزایش مقاومت در سنین اولیه بالاتر می باشد.



شکل 7- مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بصورت مجزا



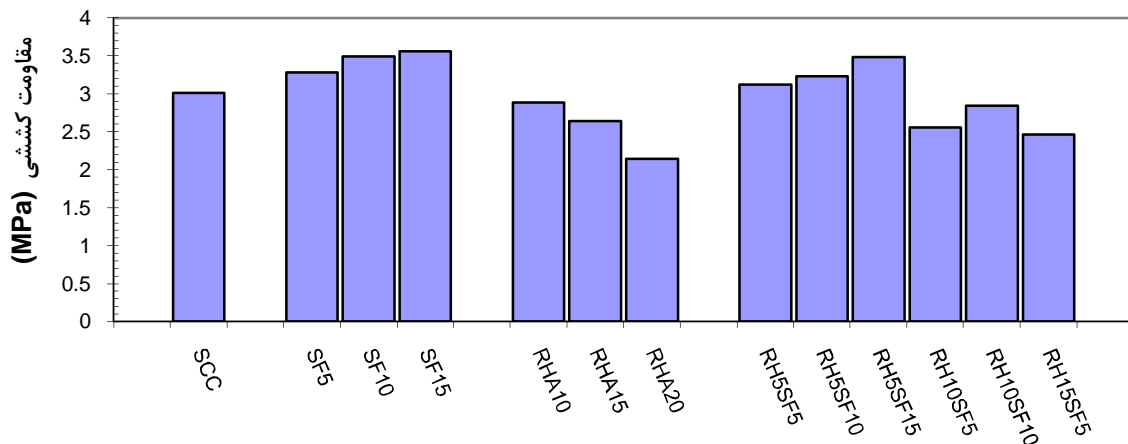
شکل 8- مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بصورت ترکیبی

وجود دوده سیلیس در بتن خودتراکم باعث افزایش چشمگیری در مقاومت فشاری بتن شده است (شکل 7). بیشترین رشد افزایش مقاومت فشاری در سن 28 روزگی، برای 15 درصد جایگزینی و به میزان 30 درصد نتیجه گردیده است. این میزان برای بتن پرمقاومت حاوی دوده سیلیس (6، 10 و 15 درصد) نیز توسط Mazloom و همکاران [11] برای 15 درصد جایگزینی و به میزان 21 درصد گزارش شده است. افزایش مقاومت فشاری با افزودن دوده سیلیس را می توان به بهبود ریزساختار بتن خودتراکم مرتبط دانست. تاثیر افزودن خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم نیز در شکل 7 نمایش داده شده است. همانگونه که انتظار می رود در سنین اولیه و در تمامی درصدهای جایگزینی مقاومت فشاری نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج از بتن خودتراکم مینا کمتر

است. میزان کاهش مقاومت فشاری تا 34 درصد هم نتیجه شده است. این موضوع توسط Naji Givi و همکاران [12] به فعالیت پوزولانی پایین خاکستر پوسته برنج به علت شکل و اندازه ذرات آن، مرتبط شده است. مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در محدوده 13/1 تا 64/3 MPa متغیر می باشد. ترکیب این دو پرکننده با یکدیگر توانسته در اختلاط RH5SF15 سبب افزایش مقاومت فشاری در تمامی سنین نسبت به بتن خودتراکم مبنا گردد. بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری این اختلاط 33 درصد می باشد. از شکل 8 استنباط می گردد که می توان با ترکیب دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بتن خودتراکمی تولید نمود که مقاومت فشاری آن نسبت به بتن خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج بالاتر است. چنین وضعیتی در درصدهای بالاتر جایگزینی دوده سیلیس اتفاق می افتد.

### 2.2.3. مقاومت کشش (شکافت)

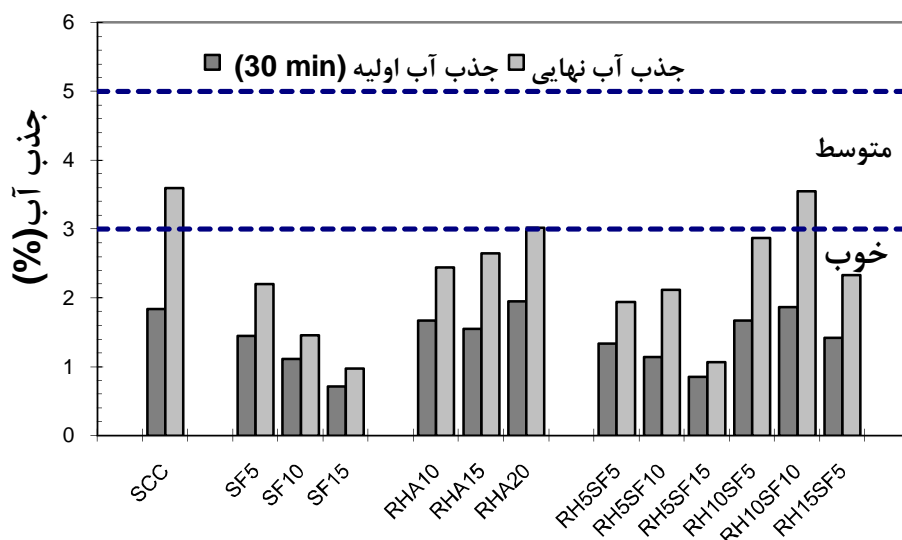
مقاومت کششی نمونه های بتن خودتراکم حاوی ترکیب سیمان و دو پرکننده در سن 28 روزگی محاسبه گردیده و نتایج در شکل 9 نمایش داده شده است. مقاومت کششی در تمامی نمونه ها در محدوده 2/14 تا 3/56 MPa متغیر است. تقریباً روندی مشابه با آنچه در مقاومت فشاری دیده شد، در مقاومت کششی نیز برقرار است. به عنوان مثال همانند مقاومت فشاری در هر سه نسبت جایگزینی دوده سیلیس هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی افزایش می یابد. همچنین اختلاط های RH5SF5، RH5SF10 و RH5SF15 مقاومت کششی 28 روزگی بالاتری نیز نسبت به بتن مبنا دارند.



شکل 9- مقاومت کششی بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در 28 روزگی

### 2.2.3. جذب آب اولیه و نهایی

در این مطالعه جذب آب اولیه و نهایی بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در سن 28 روزگی محاسبه گردید و نتایج به ترتیب در شکل 10 نشان داده شده است. توسط CEB [13] کیفیت بتن بر اساس جذب آب اولیه آن طبقه بندی شده است. بر این مبنا بتن به سه رده "ضعیف"، "متوسط" و "خوب" به ترتیب بر مبنای جذب آب اولیه 5 درصد و بالاتر، بین 3 تا 5 درصد و کمتر از 3 درصد تقسیم بندی شده است. تمامی نمونه های بتنی حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در تمامی درصد های جایگزینی دارای جذب آب اولیه در رده کیفیتی "خوب" هستند. همچنین جذب آب نهایی بتن خودتراکم نیز در 28 روزگی در محدوده 0/97 تا 3/59 درصد متغیر می باشد که نسبتاً پایین می باشد. جذب آب کمتر از 5 درصد، نشانه بتن با کیفیت بالا معرفی می گردد. همچنین دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج سبب کاهش میزان جذب آب در بتن خودتراکم شده اند. شاید بتوان دلیل این موضوع را در خاصیت پرکنندگی آنان و همچنین کاهش میزان تخلخل به علت تشکیل ژل سیلیکاتی عنوان نمود.



شکل 10- جذب آب 28 روزگی بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج

#### 4. نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر استفاده از دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بر خواص بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج زیر قابل استنباط می باشد.

- 1- استفاده از دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بصورت مجزا و ترکیبی باعث کاهش میزان جریان پذیری بتن خودتراکم می شود. با اینحال با تنظیم میزان کاهنده قوی آب قادر به تولید بتن خودتراکم در محدوده رده دوم EFNARC می باشیم. این رده از بتن خودتراکم در بسیاری از کاربردهای معمولی مهندسی مانند تیر و یا ستون استفاده می شود.
- 2- اساساً تمامی نمونه های بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج بصورت مجزا و ترکیبی دارای شاخص پایداری صفر و یا 1 هستند.
- 3- صرفنظر از وجود و یا عدم وجود پرکننده، جریان اسلامپ بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقا کاهش می یابد. دوده سیلیس و یا خاکستر پوسته برنج در ساختار بتن خودتراکم سبب کاهش میزان ابقاء جریان اسلامپ می گردد.
- 4- با حضور دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج زمان عبور بتن از قیف V شکل و همچنین زمان  $T_{50}$  افزایش می یابد. از طرفی وجود این پرکننده ها نیاز به استفاده از اصلاح کننده لزجت را از بین می برد.
- 5- در تمامی اختلاط های این مطالعه نشانه ای از انسداد و یا جمع شدگی سنگدانه ها در اطراف آرماتورهای موجود در آزمایش جعبه L شکل دیده نشد.
- 6- در حضور دوده سیلیس به عنوان تنها پرکننده، بیشترین رشد مقاومت فشاری (نسبت به بتن مینا) در سن 28 روزگی، برای 15 درصد جایگزینی و به میزان 30 درصد نتیجه گردیده است. بتن خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج در تمامی سنین مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن خودتراکم مینا کسب می نماید. از طرفی استفاده از دوده سیلیس می تواند کاهش مقاومت بتن خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج را تا حدودی جبران نماید.
- 7- دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در ساختار بتن خودتراکم چه بصورت ترکیبی و یا مجزا روند مشابه با آنچه در مقاومت فشاری از خود نشان دادند را در مقاومت کششی دنبال می نمایند.
- 8- نمونه های بتنی خودتراکم حاوی دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج در تمامی درصد های جایگزینی دارای جذب آب اولیه بر مبنای CEB در رده کیفیتی "خوب" می باشند. همچنین جذب آب نهایی آنان نیز نسبتاً پایین می باشد.

## 5. مراجع

- [1] The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use. EFNARC; May 2005.
- [2] Zerbino R, Giaccio G, Isaia GC. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. *Construction and Building Materials*, 25, 371-378, 2011.
- [3] Memon SA, Shaikh MA, Akbar H. Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self compacting concrete. *Construction and Building Materials* 2011;25:1044-8.
- [4] Safiuddin Md. Development of Self-consolidating High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash. PhD thesis. University of Waterloo, Ontario, Canada.2008.
- [5] Madandoust R, Ranjbar MM, Ahmadi Moghadam H, Mousavi SY. Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. *Biosystems Engineering* 2011;110:144 -52.
- [6] Khayat KH, Bickley J, Lessard M. Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls. *ACI Material Journal*, 97, 374-380, 2000.
- [7] Bouzoubaa, N. and Lachemi, M., (), "Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results. *Cement and Concrete Research*, 31, 413-420, 2001.
- [8] Barfield M, Ghafoori N. Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources. *Construction and Building Materials* 2012;26:490-6.
- [9] Kannan V, Ganesan K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials* 2014;51:225-34.
- [10] Hassan AAA, Lachemi M, Hossain KMA. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites* 2012;34:801-7.
- [11] Mazloom M, Ramezaniapour AA, Brooks JJ. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites* 2004;26:347-57.
- [12] Naji Givi A, Rashid SA, Aziz FNA, Salleh MAM. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials* 2010;24:2145-50.
- [13] CEB-FIP. Diagnosis and assessment of concrete structures-"state of the art report". *CEB Bull* 192;1989:83-5.