تحقیقات بتن
سال سیزدهم، شمارهٔ اول
بهار ۹۹
ص ۶۴ – ۵۳
تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۸/۵/۱۴

تأثیر پودر ولاستونیت بر خواص بتن تازه خودتراکم

علیرضا عبدالرسول
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
سید یاسین موسوی *
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

چکیده

استفاده از افزودنی‌های معدنی در بتن خودتراکم به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان نه تنها می‌تواند خواص مهندسی و دوام بتن را بهبود بخشد، بلکه در کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان مؤثر می باشد. با اینحال، با توجه به حساسیت بالای بتن خودتراکم نسبت به مواد تشکیل‌دهنده آن، مطالعه دقیق عملکرد افزودنی‌های معدنی در ساختار بتن خودتراکم امری کاملا ضروری است. هدف از انجام این مطالعه ارزیابی خواص بتن تازه خودتراکم حاوی پودر ولاستونیت در مقایسه با دوده سیلیس و زئولیت می باشد. لذا ۱۸ اختلاط بتن خودتراکم در چهار گروه با نسبت های مختلف آب به چسباننده و میزان افزودنی طراحی و تولید شد. بلافاصله پس از ساخت مخلوط های بتن خودتراکم، خواص بتن تازه توسط جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر (T50)، قیف V شکل، حلقه J و شاخص الک پایداری ارزیابی شد. نتایج بتن تازه خودتراکم نشان می دهد هرچند صرفنظر از میزان آب به چسباننده، استفاده از ولاستونیت سبب کاهش میزان جریان اسلامپ می گردد، ولاستونیت در مقایسه با زئولیت و دوده سیلیس تقاضا برای مصرف کاهنده شدید آب را کاهش داده است. همچنین افزایش لزجت و بهبود قابلیت عبورکنندگی در صورت استفاده از ولاستونیت در بتن خودتراکم مشاهده شد. نتایج شاخص الک پایداری نیز نشان از مقاومت مطلوب در برابر جداشدگی در صورت حضور ولاستونیت در بتن خودتراکم دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن تازه خودتراکم، ولاستونیت، افزودنی های متداول، کارایی.

* نویسنده مسئول: s.yasinmousavi@yahoo.com

۱- مقدمه

کارخانه‌های سیمان و بتن مسئول انتشار ۷ درصد از گاز CO_{2eq} موجود در اتمسفر از عوامل گرم شدن کره زمین و تغییر در شرایط آب و هوایی می باشد. از طرفی نیاز به استخراج مواد خام طبیعی برای تولید سیمان و همچنین مصرف بالای انرژی در فرایند تولید کلینکر باعث گردیده است که سیمان به‌عنوان یک ماده دوستدار محیط زیست در نظر گرفته نشود. لذا استفاده از انواع مواد مکمل سیمانی مانند دوده سیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و ... به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان مصرفی همواره مورد توجه مهندسین صنعت ساخت و ساز قرار گرفته است. در مطالعه Yang و همکاران [۱]، جایگزینی ۱۵-۲۰٪ سیمان توسط مواد مکمل سیمانی منجر به کاهش شدید انتشار CO_2 می‌گردد. همچنین، Blankendaal و همکاران [۲] گزارش نمودند، استفاده از خاکستر بادی و سرباره در مخلوط‌های بتنی، می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان را تا ۳۹٪ کاهش دهد. لازم به ذکر است علاوه بر تأثیرات مثبت زیست محیطی و اقتصادی، حضور مواد مکمل سیمانی می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی و شاخصه های دوام بتن گردد.

از جمله مواد مکمل سیمانی که توسط برخی از محققان مورد بررسی قرار گرفته است ولاستونیت می باشد. ولاستونیت ماده ای با پایه سیلیکات کلسیم ($CaSiO_3$) است که ممکن است شامل مقدار کمی آهن و منیزیم باشد [۳]. این ماده طبیعی در دمای ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد در ماگمای داغ زمین از واکنش سیلیس و سنگ آهک حاصل می شود. ولاستونیت دارای کریستال‌های سوزنی شکل است که معمولا به رنگ سفید ظاهر می گردد. وزن مخصوص این ماده معدنی در حدود ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سختی در مقیاس mohs آن بین ۴/۵ تا ۵ است. این خواص ممتاز باعث می‌گردد که ولاستونیت در صنایع مختلفی از جمله تولید سرامیک، چسب، فلزات، رنگ، پلاستیک و لاستیک کاربرد داشته باشد. در ارتباط با کاربرد ولاستونیت به‌عنوان ماده مکمل سیمانی در تولید بتن، نتایج مطالعه انجام پذیرفته توسط Kalla و همکاران [۴] نشان می‌دهند جای‌گزینی ۱۰٪ ولاستونیت به جای سیمان در سه نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ موجب افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزگی در بتن معمولی می‌گردد. از طرفی، Mathur و همکاران [۵] نشان دادند افزودن ۱۰٪ ولاستونیت در بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی سبب بهبود مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۵۶ روزگی می‌گردد. علاوه بر بررسی خواص مکانیکی ناشی از افزودن ولاستونیت در بتن معمولی، مشخصه‌های دوام آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. توسط Misra و همکاران [۶] اشاره شده است که افزایش ولاستونیت باعث کاهش جذب آب می گردد. در همین راستا، نتایج مطالعه Sato و Beaudoin [۷] نشان می دهند استفاده از ولاستونیت مقاومت در برابر چرخه ذوب و انجماد را بهبود می بخشد. همچنین از ترکیب ولاستونیت و افزودنی های رایج به‌عنوان جای‌گزین سیمان در بتن معمولی نیز توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه Kalla و همکاران [۸] گزارش شد که با افزایش سطح جای‌گزینی سیمان با ترکیب خاکستر بادی و پودر ولاستونیت (۴۵٪ تا ۵۵٪)، خواص مکانیکی و دوام افزایش می یابد. در همین راستا، نتایج Zhang [۹] نشان می دهد که افزودن ولاستونیت و خاکستر بادی سبب افزایش دوام و خواص مکانیکی بتن می شود. همچنین آنان نشان دادند که افزودن مخلوط خاکستر بادی و ولاستونیت بهتر از مخلوط خاکستر بادی به تنهایی می باشد. با این حال هرچند ولاستونیت در بتن معمولی مورد توجه قرار گرفته است، بر اساس اطلاعات نویسندگان تأثیر آن بر روی خواص بتن خودتراکم مورد توجه قرار نگرفته است.

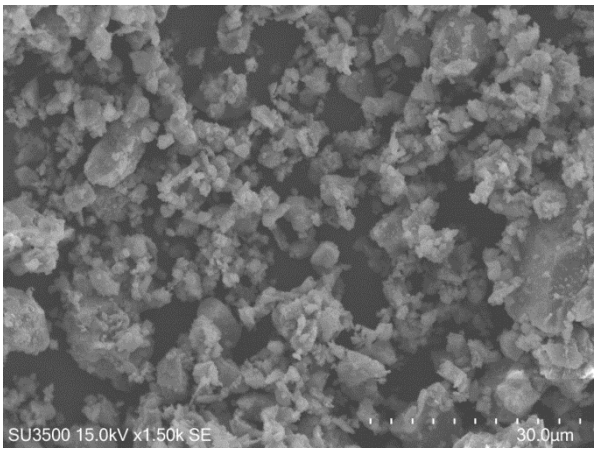
بتن خودتراکم که در ابتدا در اواخر دهه ۱۹۸۰ در ژاپن توسعه یافت، بتنی است با قابلیت جریان‌پذیری بالا، که قادر است تحت وزن خود بدون جداشدگی و آب انداختگی به‌راحتی قالب را پر نماید و بدون هیچ عوامل ارتعاشی فضای اطراف آرماتورها را در برگیرد. از مزایای این نوع بتن نسبت به بتن معمولی می‌توان به کوتاه‌تر شدن دوره‌های ساخت وساز، کمتر شدن هزینه‌های ساخت، بهبود توانایی پمپ کردن، افزایش ایمنی محل کار با حذف نیاز به تحکیم و کاهش آلودگی صوتی با حذف ویبراتور اشاره نمود [۱۰]. در طرح بتن خودتراکم نیاز به کاهش حجم درشت‌دانه، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و همچنین افزایش میزان پودر می باشد. پودر بر اساس EFNARC [۱۱] به ذراتی کوچکتر از ۰/۱۲۵ میلیمتر شامل سیمان، افزودنی و کسری از ماسه اطلاق می گردد. با توجه به مشکلات مصرف بالای سیمان، نیاز ذاتی بتن خودتراکم به افزایش پودر، معمولاً با افزایش میزان افزودنی تامین می گردد. لذا شناخت دقیق افزودنی و تاثیر آن بر عملکرد بتن خودتراکم از اهمیت بسیار

بالایی برخودار می باشد. هدف از این مطالعه بررسی خواص بتن تازه خودتراکم ناشی از افزودن پودر ولاستونیت در مقایسه با افزودنی های متداول مانند دوده سیلیس و زئولیت می باشد. جهت رسیدن به اهداف این مطالعه ۱۸ طرح اختلاط بتن خودتراکم طراحی و خواص بتن تازه خودتراکم توسط آزمایشات جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر (T_{50})، شاخص پایداری چشمی، زمان عبور از قیف V شکل، حلقه J و شاخص الک پایداری بررسی گردید. نتایج این مطالعه می تواند اطلاعات لازم را در اختیار مهندسان و پیمانکاران صنعت ساخت و ساز جهت به‌کارگیری بتن خودتراکم حاوی پودر ولاستونیت در پروژهایی اجرایی فراهم آورد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید شده در شرکت سیمان بجنورد در ساختار تمامی مخلوط‌های بتن خودتراکم استفاده شده است که وزن مخصوص و مساحت سطح ویژه (روش بلین) آن بر اساس کاتالوگ شرکت، به ترتیب برابر با ۳/۱۶۴ و ۳۱۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بودند. همچنین پودر ولاستونیت به‌عنوان ماده جای‌گزین سیمان با وزن مخصوص ۲/۷۲۸ استفاده گردید. همچنن شکل ۱ نشان دهنده تصویر میکروسکوپی ذرات ولاستونیت می باشد.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی ذرات ولاستونیت

از طرفی از دوده سیلیس و زئولیت با وزن مخصوص ۲/۱۲ و ۲/۲۵ در ساخت برخی از مخلوط‌های بتن خودتراکم بهره گرفته شده است. در این مطالعه از سنگ‌دانه‌های طبیعی شامل شن با بزرگ‌ترین اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر و همچنین ماسه با وزن مخصوص ۲/۶۹ استفاده گردید. جهت رسیدن به کارایی مطلوب در تمامی مخلوط های بتن خودتراکم، کاهنده شدید آب[1] برپایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری PIX-MIX و وزن مخصوص ۱/۰۵ ±۰/۰۱ استفاده شد. از خواص این کاهنده شدید آب می توان به رنگ روشن و pH آن که ۵ الی ۶ می باشد، اشاره نمود. از طرفی از اصلاح‌کننده لزجت بر پایه پلی ساکارید جهت کنترل ثبات و مقاومت در برابر جداشدگی در پاره ای از اختلاط های بتن خودتراکم استفاده شده است.

۲-۲- نسبت های اختلاط

برای رسیدن به اهداف این مطالعه ۱۸ اختلاط بتن خودتراکم با جزئیات نشان داده شده در جدول ۱ طراحی و ساخته شد. این اختلاط‌ها را می توان در موارد زیر طبقه بندی نمود.

۱- گروه اول : شامل ۵ مخلوط بتن خودتراکم با نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵ می باشد. در این گروه علاوه بر بتن خودتراکم مبنا که در ساخت آن از هیچ‌گونه افزودنی استفاده نشد، ۴ اختلاط بتن خودتراکم که با جای‌گزینی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ درصد وزنی از مواد سیمانی با پودر ولاستونیت ساخته شده اند، موجود می باشند.

۲- گروه دوم : شامل ۵ مخلوط بتن خودتراکم با نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ می باشد. در ساخت این گروه از دوده سیلیس استفاده نشد و میزان جایگزینی پودر ولاستونیت از ۰٪ برای بتن خودتراکم مبنا به ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ برای نمونه‌های حاوی پودر ولاستونیت تغییر یافته است.

۳- گروه سوم : در ساخت مخلوط های بتن خودتراکم گروه سوم از ترکیب سه گانه سیمان پرتلند+۱۰٪ دوده سیلیس+ ۰٪ تا۲۰٪ پودر ولاستونیت استفاده شده است. در این گروه که همانند گروه اول از ۵ مخلوط بتن خودتراکم تشکیل شده است، مقدار کل مواد سیمانی kg/cm^3 ۴۳۶ در نظر گرفته شده است.

۴- گروه چهارم : جهت ارزیابی عملکرد ولاستونیت برخواص بتن تازه خودتراکم درمقایسه با افزودنی های متداول، سه مخلوط دیگر بتن خودتراکم نیز در نظر گرفته شد. این سه مخلوط شامل دو اختلاط بتن خودتراکم حاوی ۱۰٪ زئولیت در دو

[1] (High Range Water Reducer)

نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ و ۰/۴۵ و یک اختلاط بتن خودتراکم حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس با نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ است. لازم به ذکر است در ساختار هیچکدام از اختلاط های این گروه، از پودر ولاستونیت استفاده نشده است. از طرفی، مخلوط بتن خودتراکم حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس با نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵ در حقیقت همان اختلاط مبنا در گروه سوم می باشد.

بیان این نکته ضروری است که میزان درصد جای‌گزینی افزودنی‌ها شامل دوده سیلیس، ولاستونیت و زئولیت بر مبنای مطالعات گذشته و ساخت اختلاط های اولیه به دست آمده است. علاوه بر این نسبت شن به ماسه در تمامی اختلاط ها ثابت و به میزان ۰/۸۴ می باشد. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می شود، در اختلاط های مبنا که در آن از ولاستونیت، دوده سیلیس و یا زئولیت استفاده نشده است، از اصلاح کننده لزجت جهت حفظ خواص رئولوژیک بتن خودتراکم بهره برده شد. نام‌گذاری اختلاط ها بر مبنای نسبت آب به چسباننده، مقدار ولاستونیت، دوده سیلیس و زئولیت انجام شده است. برای مثال، C45W10SF10 یک مخلوط با نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵ (C45)، مقدار ۱۰٪ ولاستونیت (W10) و ۱۰٪ دوده سیلیس (SF10) می باشد.

جهت حفظ یکنواختی مخلوط های بتن خودتراکم، روند ساخت تمامی اختلاط ها یکسان و به ترتیب زیر می باشد که (۱) ابتدا سنگ‌دانه‌ها شامل شن و ماسه بمدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شد و سپس، یک سوم آب مصرفی بمدت ۱ دقیقه در حالیکه که بتونیر روشن بود به مخلوط اضافه گردید. (۲) بعد از این مرحله عمل اختلاط به مدت ۱ دقیقه متوقف شد و پس از آن مواد سیمانی به همراه مخلوط باقیمانده آب و کاهنده شدید آب در دو مرحله اضافه گردید و بمدت ۱ دقیقه دیگر در بتونیر مخلوط شد. (۳) پس از استراحت ۱ دقیقه، مجدداً عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه انجام گردید.

جدول ۱- جزئیات طرح اختلاط ها

شماره اختلاط	نام اختلاط	سیمان (Kg/m^3)	ولاستونیت (Kg/m^3)	دوده سیلیس (Kg/m^3)	زئولیت (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	آب/چسباننده (٪)	ماسه (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)	کاهنده شدید آب (٪)	اصلاح کننده لزجت (٪)
۱	C45W0	۴۳۶	۰	۰	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۵۱	۷۹۹	۱/۲۱	۰/۲۳
۲	C45W5	۴۱۴/۲	۲۱/۸	۰	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۵۰	۷۹۸	۱/۱۲	۰
۳	C45W10	۳۹۲/۴	۴۳/۶	۰	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۸	۷۹۶	۱/۱۲	۰
۴	C45W15	۳۷۰/۶	۶۵/۶	۰	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۷	۷۹۵	۱/۱۲	۰
۵	C45W20	۳۴۸/۸	۸۷/۲	۰	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۵	۷۹۴	۱/۱۲	۰
۶	C35W0	۵۰۰	۰	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۵۲	۸۰۰	۱/۵۶	۰/۱۳
۷	C35W5	۴۷۵	۲۵	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۵۰	۷۹۸	۱/۵	۰
۸	C35W10	۴۵۰	۵۰	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۴۹	۷۹۷	۱/۵	۰
۹	C35W15	۴۲۵	۷۵	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۴۷	۷۹۵	۱/۵	۰
۱۰	C35W20	۴۰۰	۱۰۰	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۴۵	۷۹۴	۱/۵	۰
۱۱	C45W0SF10	۳۹۲/۴	۰	۴۳/۶	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۱	۷۹۱	۱/۶۱	۰
۱۲	C45W5SF10	۳۷۰/۶	۲۱/۸	۴۳/۶	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۰	۷۸۹	۱/۶۱	۰
۱۳	C45W10SF10	۳۴۸/۸	۴۳/۶	۴۳/۶	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۳۸	۷۸۸	۱/۶۱	۰
۱۴	C45W15SF10	۳۲۶	۶۵/۴	۴۳/۶	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۳۷	۷۸۷	۱/۸	۰
۱۵	C45W20SF10	۳۰۵/۲	۸۷/۲	۴۳/۶	۰	۱۹۶	۰/۴۵	۹۳۵	۷۸۵	۱/۸	۰
۱۶	C35W0SF10	۴۵۰	۰	۵۰	۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۴۱	۷۹۰	۱/۸	۰
۱۷	C45W0ZE10	۳۹۲/۴	۰	۰	۴۳/۶	۱۹۶	۰/۴۵	۹۴۸	۷۹۶	۱/۴	۰
۱۸	C35W0ZE10	۴۵۰	۰	۰	۵۰	۱۷۵	۰/۳۵	۹۴۹	۷۹۷	۱/۵۶	۰

۲-۳- آزمایشات بتن خودتراکم

چهار مشخصه کلیدی بتن تازه خودتراکم که پایداری و پرکنندگی بتن خودتراکم را تعریف می‌نمایند شامل جریان‌پذیری، عبورکنندگی، لزجت و مقاومت در برابر جداشدگی می باشند. هر کدام از این مشخصه‌ها توسط یک و یا چند آزمایش تخمین زده می‌شوند. در این مطالعه از آزمایش‌های جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر، قیف V شکل، حلقه J وشاخص الک پایداری استفاده شده است.

۲-۳-۱- جریان اسلامپ و شاخص پایداری چشمی

یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های انجام شده برای ارزیابی جریان‌پذیری مخلوط بتن خودتراکم، آزمایش جریان اسلامپ است. جریان اسلامپ برای ارزیابی جریان آزاد افقی در صورت عدم وجود مانع استفاده می شود. روش آزمون براساس تعیین اسلامپ در بتن معمولی است که قطر بتن پخش شده در دو جهت عمود بر هم اندازه گیری می شود و میانگین آن به عنوان جریان اسلامپ ثبت می گردد. جریان اسلامپ بالاتر می‌تواند توانایی بیشتر بتن در پرکردن قالب را نشان دهد [۱۲]. جریان اسلامپ بر اساس EFNARC[۱۱]، در سه رده SF1، SF2 و SF3 به ترتیب برای جریان اسلامپ ۵۵۰ تا ۶۵۰ میلیمتر، ۶۶۰ تا ۷۵۰ میلیمتر و ۷۶۰ تا ۸۵۰ میلیمتر طبقه‌بندی می شود. آزمایش جریان اسلامپ می‌تواند اطلاعات اضافی در مورد مقاومت در برابر جداشدگی مخلوط های بتنی ارائه دهد. به این ترتیب که قابلیت تراکم به ۴ رده مابین صفر(پایداری بالا) تا ۳ (بسیار ناپایدار) براساس ارزیابی چشمی آب انداختگی، توزیع ملات در گوشه های بتن پخش شده و یا انباشتگی توده درشت دانه طبقه بندی می گردد [۱۳].

۲-۳-۲- زمان عبور از قیف V شکل و T_{50}

آزمون T_{50} نشان‌دهنده زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی متر می باشد. از طرفی میزان زمان لازم جهت خروج مخلوط بتن تازه از قیف V شکل به عنوان زمان جریان V-funnel ثبت می گردد. لازم به ذکر است علاوه بر مدت زمان خروج بتن از قیف، نحوه و یکنواختی بتن هنگام خروج نیز می تواند اطلاعات لازم را در اختیار قرار دهد. این دو آزمون می توانند توصیفی از لزجت بتن خودتراکم به همراه داشته باشند. بر این مبنا، دو رده از لزجت بتن خودتراکم با توجه به میزان زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر Sec ۲≤ و زمان جریان قیف V شکل Sec ۸≤ برای VS1/VF1 و زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر Sec ۲< و زمان جریان قیف V شکل ۹ تا ۲۵ ثانیه برای VS2/VF2توسط EFNARC[۱۱] ارائه شده است.

۲-۳-۳- حلقه J

این آزمون متشکل از یک مخروط اسلامپ به همراه ه حلقه‌ای با جزئیات ارائه شده در رفرنس [۱۴] می باشد. جهت انجام این آزمایش، نمونه‌ای از بتن تازه خودتراکم در مخروط اسلامپ که به‌صورت هم مرکز با حلقه J قرار دارد، ریخته شده و پس از کشیدن مخروط، اجازه داده می‌شود که بتن خودتراکم از سراسر حلقه J عبور نماید و پخش شود. میانگین دو قطر عمود برهم حاصل از حرکت بتن ثبت می گردد. این آزمایش را می‌توان به‌عنوان مکمل آزمایش های قیفV شکل و جریان اسلامپ استفاده نمود. به عنوان مثال با مقایسه این آزمایش با آزمایش جریان اسلامپ مشخص می شود که چگونه میزان گسترش اسلامپ مهار نشده کاهش می یابد. اگر اختلاف دو اندازه گیری کمتر از ۲۵ میلیمتر باشد، نشان دهنده توانایی عبور بالا، مابین ۲۵ و ۵۰ میلیمتر نشان از عبورکنندگی متوسط و از سوی دیگر، اگر اختلاف بزرگ‌تر از ۵۰ میلیمتر باشد نشان از توانایی عبور پایین دارد.

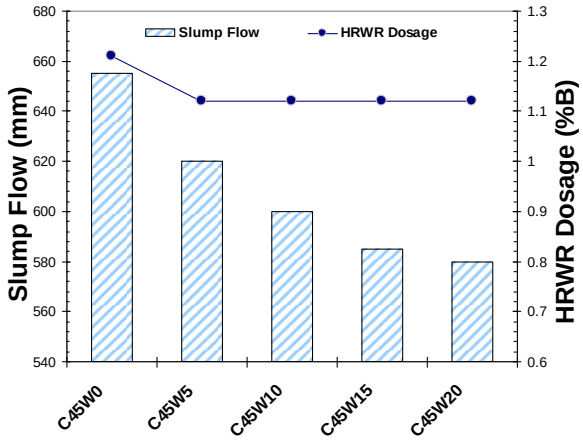
۲-۳-٤- شاخص الک پایداری

پایداری یا مقاومت در برابر جداشدگی یک ویژگی حیاتی بتن خودتراکم است. این آزمون توانایی یک‌نواخت ماندن دائم بتن خودتراکم در طی مخلوط کردن، حمل و نقل و ریختن را نشان می دهد [۱۵]. در این مطالعه، برای اندازه‌گیری مشخصه جداشدگی استاتیکی از آزمایش شاخص الک پایداری بهره گرفته شده است. بدین منظور، تقریبا ۰/۵ ± ۱۰ لیتر از بتن داخل سطل ریخته شده و پس از ۰/۵ ± ۱۵ دقیقه سکون، آن را از ارتفاع تقریبا ۵۰ ± ۵۰۰ میلیمتر به داخل الک شماره ۴ ریخته می‌شود. پس از مدت زمان ۵ ±۱۲۰ ثانیه، درصد عبوری از الک محاسبه شده و به عنوان شاخص الک پایداری در نظر گرفته می‌شود. بر طبق EFNARC[۱۱]، دو رده از میزان شاخص الک پایداری به نام های SR1 و SR2 برای درصد عبوری کمتر از ۲۰٪ و کمتر از ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.

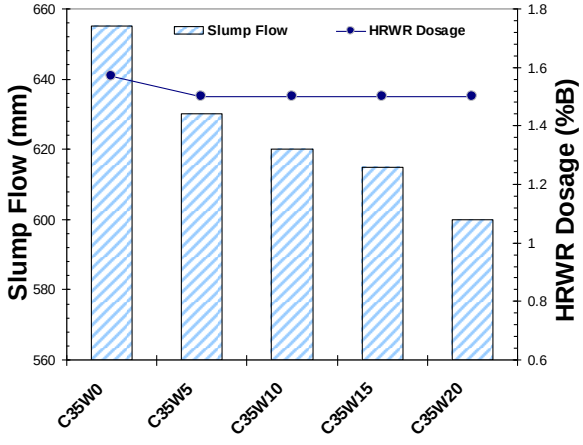
۳- نتایج و تحلیل آزمایش ها

۳-۱- جریان اسلامپ

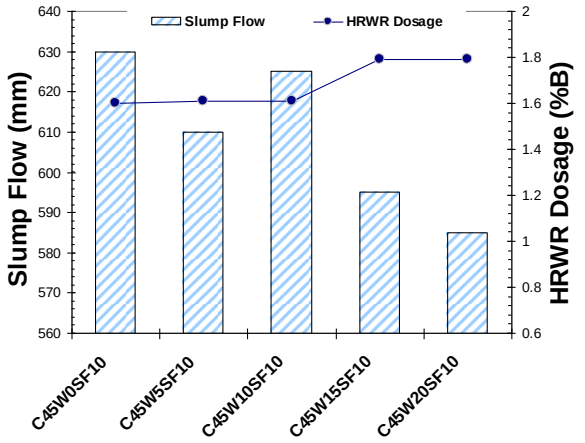
میزان جریان اسلامپ در نمونه‌های مختلف بتن خودتراکم محاسبه گردید و نتایج در شکل‌های ۲ تا ۵ به ترتیب برای اختلاط‌های موجود در گروه‌های ۱ تا ۴ نمایش داده شده است. همچنین مقدار کاهنده شدید آب مصرفی نیز در این اشکال دیده می‌شود. بر این مبنا، میزان جریان اسلامپ در نمونه‌های بتن خودتراکم مورد مطالعه در محدوده ۵۸۰ تا ۶۵۵ میلیمتر محاسبه شده است که این میزان با محدود نمودن مقدار فوق روان کننده در بازه ۱/۱۲ تا ۱/۷۹درصد مواد سیمانی به‌دست آمده است. همه مخلوط‌های بتن خودتراکم مورد بررسی در این مطالعه را می‌توان در رده اول جریان اسلامپ (SF1) طبقه بندی نمود. از بتن‌های حاصل از این رده می‌توان در دال های ساختمانی، شمع ها و شالوده های عمیق استفاده نمود.



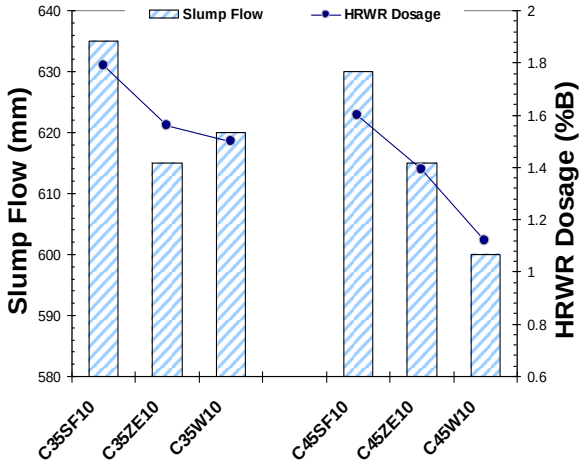
شکل ۲- جریان اسلامپ در مخلوط های گروه اول (W/B=0.45,SF=0)



شکل ۳- جریان اسلامپ در مخلوط های گروه دوم (W/B=0.35,SF=0)



شکل ۴- جریان اسلامپ در مخلوط های گروه سوم (W/B=0.45,SF=10)



شکل ۵- جریان اسلامپ در مخلوط های گروه چهارم

از طرفی با مقایسه اشکال ۲ و ۴ که نشان‌دهنده تأثیر ولاستونیت بر میزان جریان اسلامپ به ترتیب در حضور ۰٪ و ۱۰٪ دوده سیلیس می باشد، می توان نتیجه گرفت که صرف نظر از میزان دوده سیلیس افزودن ولاستونیت سبب کاهش جریان اسلامپ شده است. به‌عنوان مثال، جای‌گزینی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ولاستونیت باعث می‌گردد که جریان اسلامپ از ۶۵۵ میلیمتر برای بتن مبنا (C45W0) به ۶۲۰، ۶۰۰، ۵۸۵ و ۵۸۰ میلیمتر کاهش یابد. علت این موضوع را می توان در شکل ظاهری ذرات ولاستونیت جستجو نمود. همچنین این اشکال نشان می دهند که در یک نسبت ثابت ولاستونیت، میزان مصرف کاهنده شدید آب در اختلاط‌های گروه سوم حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس نسبت به مخلوط‌های گروه اول (بدون دوده سیلیس) افزایش یافته است. در مطالعه Guneyisi و همکاران [۱۶]، افزایش ۴۲ درصدی در میزان کاهنده شدید آب

برای نگاه داشتن جریان اسلامپ در محدوده ۶۷۰ تا ۶۹۵ میلیمتر با افزایش میزان دوده سیلیس تا ۱۵ درصد، گزارش شده است.

از طرفی، مقایسه اشکال ۲ و ۳ نیز نشان می دهد که در هر دو نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ و ۰/۴۵ حضور ولاستونیت سبب کاهش میزان جریان اسلامپ می گردد. لازم بذکر است که در یک میزان ثابت ولاستونیت، نسبت آب به چسباننده بالاتر، جریان اسلامپ کمتری را نتیجه داده است. علت این موضوع افزایش مصرف کاهنده شدید آب که سبب افزایش روان کاری بین ذرات، کاهش تنش تسلیم و بهبود جریان پذیری نمونه ها می گردد، می باشد.

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در درصد جایگزینی مشابه ۱۰٪ انواع افزودنی ها در نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵، درحالی‌که جریان اسلامپ در محدوده ۱۵±۶۱۵ میلیمتر می باشد، میزان مصرف کاهنده شدید آب در مخلوط های حاوی ولاستونیت، زئولیت و دوده سیلیس به ترتیب به میزان ۱/۱۲٪، ۱/۳۹٪ و ۱/۶٪ می باشد. روند مشابه در نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ نیز قابل مشاهده است. این امر به وضوح نشان‌دهندهٔ آن است که برای رسیدن به مقدار جریان اسلامپ مشخص، ولاستونیت به مراتب نیاز به کاهنده شدید آب کمتری دارد.

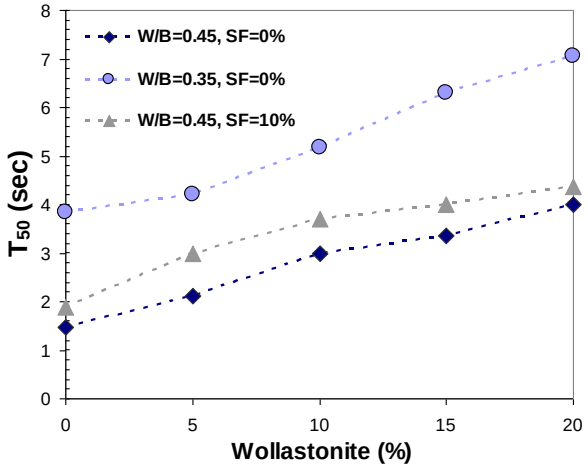
۳-۲- شاخص پایداری چشمی

شاخص پایداری چشمی به‌عنوان یکی از ساده‌ترین و مشهورترین روش‌ها جهت ارزیابی پایداری بتن خودتراکم مورد استفاده قرار می گیرد. همان‌گونه که بیان شد این امر با استفاده از ارزیابی چشمی میزان آب انداختگی و همچنین انباشت درشت دانه صورت می پذیرد. بدین منظور از اشکال نشان داده شده در جدول ۲ جهت ارزیابی شاخص پایداری چشمی استفاده شد. عموماً تمامی نمونه های مورد مطالعه دارای شاخص پایداری صفر و یا یک بودند. بر این اساس می توان بیان نمود که نمونه های مورد مطالعه دارای پایداری مناسب هستند.

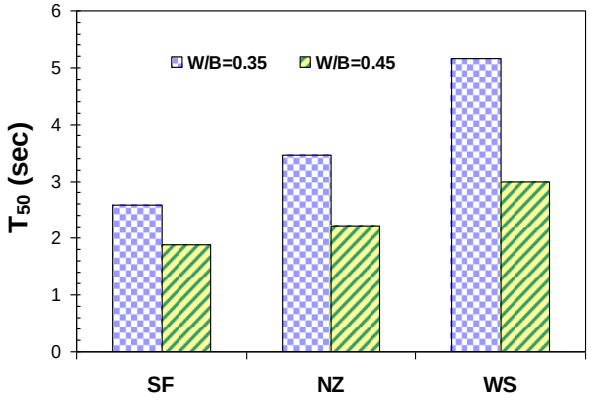
۳-۳- زمان T_{50}

زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر در نمونه‌های بتن خودتراکم نیز تخمین زده شد و نتایج در شکل ۶ برای گروه‌های اول تا سوم و در شکل ۷ برای افزودنی های متفاوت در نسبت های متفاوت آب به چسباننده نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، زمان T_{50} در محدوده ۱/۴۶ تا ۴ ثانیه برای نمونه های گروه اول، در محدوده ۳/۸۵ تا ۷/۰۵ ثانیه برای نمونه‌های گروه دوم و همچنین در محدود ۱/۸۸ تا ۴/۳۷ ثانیه برای نمونه های گروه سوم متغییر است. این اعداد با مقادیر پیشنهادی توسط مطالعات که زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر را بین ۳ تا ۷ ثانیه برای کاربردهای مهندسی متداول و بین ۲ تا ۵ ثانیه برای کاربردهای ساختمانی قابل قبول می داند، قابل مقایسه می باشد.

بر مبنای نتایج شکل ۶ می توان نتیجه گرفت که میزان زمان T_{50} برای مخلوط C45W0 (نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵ و میزان ولاستونیت صفر) ۱/۴۶ ثانیه بدست آمده است که در صورت جایگزینی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ولاستونیت به ترتیب به ۲/۱۱، ۳، ۳/۳۵ و ۴ ثانیه افزایش می یابد. این امر نشان می دهد که افزودن ولاستونیت می تواند سبب افزایش میزان زمان T_{50} شود.

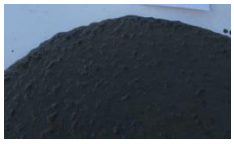
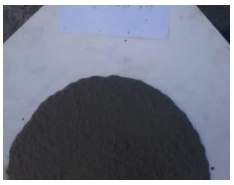
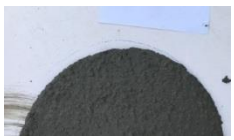


شکل ۶- زمان T_{50} برای درصد های متفاوت پودر ولاستونیت در حضور ۰-۱۰٪ دوده سیلیس و نسبت متفاوت آب به چسباننده



شکل ۷- زمان T_{50} در مخلوط های گروه چهارم

جدول ۲- ارزیابی پایداری چشمی مخلوط های بتن خودتراکم در درصدهای مختلف ولاستونیت

	٪۰	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰
گروه اول					
گروه دوم					
گروه سوم					
	C35SF10	C35ZE10	C45ZE10		
گروه چهارم					

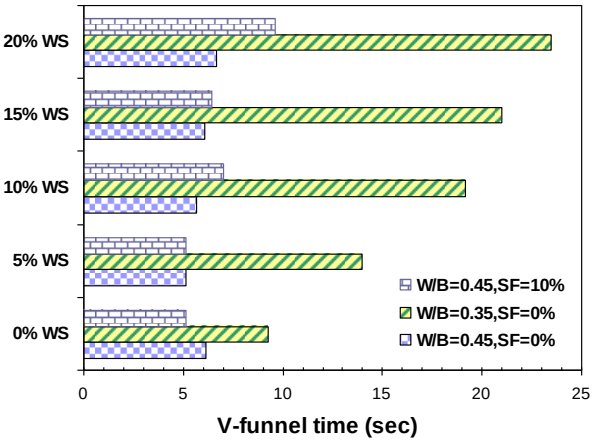
افزایش T_{50} با افزودن پودر ولاستونیت در گروه‌های دوم و سوم نیز وجود دارد. به‌عنوان نمونه، در حضور ۱۰٪ دوده سیلیس (گروه سوم)، زمان T_{50} در بتن مبنا (C45W0SF10) که ۱/۸۸ ثانیه تخمین زده شده بود با جایگزینی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ولاستونیت به ۳، ۳/۷، ۴، ۴/۳۷ ثانیه رسید. البته لازم بذکر است که کاهش میزان نسبت آب به چسباننده در یک نسبت ثابت ولاستونیت سبب افزایش زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتیمتر خواهد شد. در نسبت جای‌گزینی مشابه ۱۰٪ پودر ولاستونیت، زئولیت و دوده سیلیس در هر دو نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ و ۰/۴۵ (شکل ۷)، بیشترین میزان از زمان T_{50} به ترتیب در مخلوط های حاوی پودر ولاستونیت، زئولیت و دوده سیلیس مشاهده شد. این امر می تواند نشانه لزجت بالای مخلوط بتن خودتراکم در حضور ولاستونیت باشد. از طرفی با وجود آنکه در ساختار تمامی مخلوط هایی که حاوی مواد افزودنی های پودر ولاستونیت، زئولیت و دوده سیلیس می باشند، از اصلاح کننده لزجت استفاده نشده است، میزان زمان T_{50} نسبت به اختلاط مبنا بالاتر است. این امر نشان می دهد که استفاده از پودر ولاستونیت می تواند نیاز به استفاده از اصلاح کننده لزجت که عموما دارای قیمت بالایی نیز می باشد را در ساخت بتن خودتراکم مرتفع نماید.

۳-٤- زمان عبور از قیف V شکل

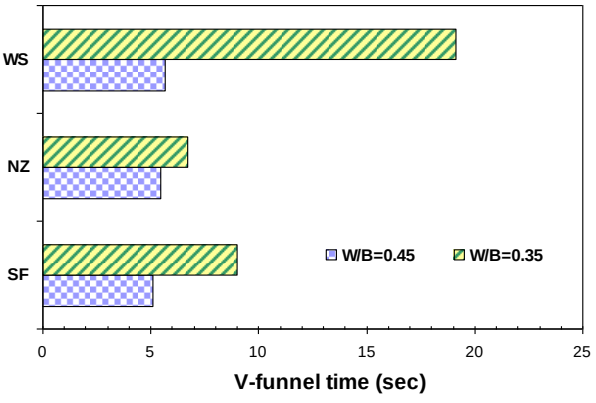
شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده تأثیر استفاده از افزودنی‌های مختلف مورد مطالعه بر زمان عبور از قیف V شکل می باشد. همانگونه که ملاحظه می گردد، زمان عبور از قیف V شکل در محدوده ۵/۱۱

تا ۲۳/۴۵ ثانیه متغییر می باشد. بر طبق مطالعات گذشته [۱۷]، در اختلاط های بتن خودتراکم با زمان عبور از قیف V شکل بالاتر از ۲۰ ثانیه به علت لزجت بالا، تمایل به حبس هوا در درون قابلیت تراکم مطلوب دست یافتی نیست. با اینحال میزان زمان عبور جریان از قیف V شکل در تمامی اختلاط های این مطالعه کمتر از ۲۳/۴۵ ثانیه می باشد. در روندی مشابه با آنچه در زمان رسیدن جریان به قطر ۵۰ سانتیمتر مشاهده شد، در اکثر موارد حضور پودر ولاستونیت سبب افزایش زمان عبور جریان از قیف V شکل شده است. این بدان معناست که وجود ولاستونیت ها لزجت پلاستیک مخلوط را افزایش می دهند. لازم به ذکر است چنین وضعیتی در هر دو نسبت آب به چسباننده‌ها مشاهده می گردد.

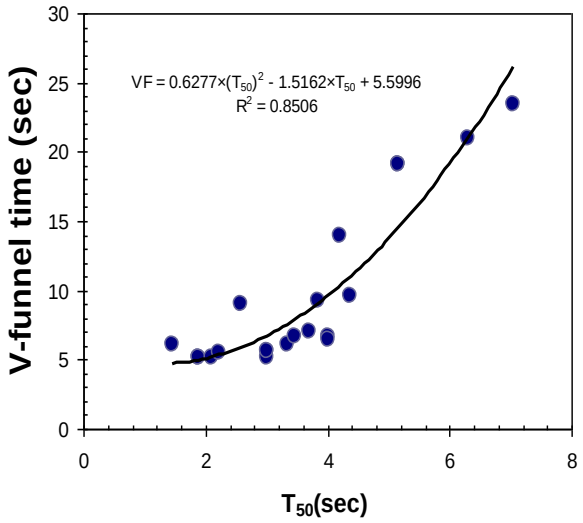
همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است بیشترین میزان زمان عبور از قیف V شکل در مقایسه با بتن حاوی دیگر مواد افزودنی برای نمونه‌های حاوی پودر ولاستونیت تخمین زده شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده ارتباط بین زمان عبور از قیف V شکل و T_{50} با ضریب همبستگی R^2 =۰/۸۵ می باشد.



شکل ۸- تاثیر ولاستونیت بر زمان عبور از قیف V شکل



شکل ۹- تاثیر ولاستونیت، دوده سیلیس و زئولیت بر زمان قیف V شکل

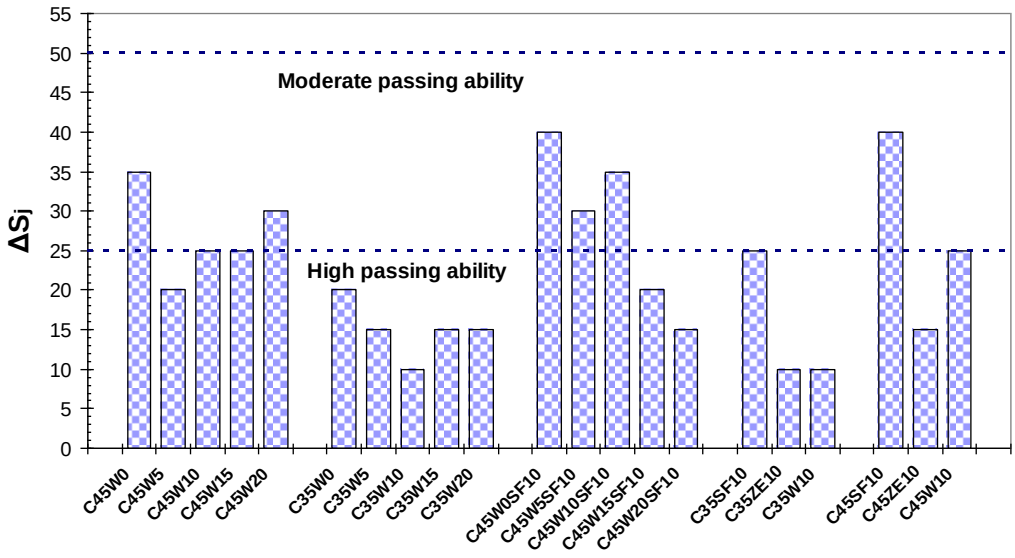


شکل ۱۰- رابطه بین زمان T_{50} و زمان قیف V شکل

۳-۵- حلقه J

تفاوت میزان جریان اسلامپ بدون حضور مانع با میزان جریان اسلامپ در حضور حلقه J (ΔS_j) در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می گردد، در گروه اول، بیشترین میزان ΔS_j برای اختلاط مبنا به میزان ۳۵ میلیمتر بدست آمده است که در صورت حضور ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر ولاستونیت این مقدار به ۲۰، ۲۵، ۲۵ و ۳۰ میلیمتر کاهش پیدا کرده است. چنین روندی در دو گروه دیگر نیز دیده می شود بدین ترتیب که بیشترین میزان اختلاف ΔS_j در نمونه مبنای آن گروه بدست آمده است و حضور پودر ولاستونیت توانسته این اختلاف را کاهش دهد. لذا می توان نتیجه گرفت که حضور پودر ولاستونیت می تواند باعث افزایش قابلیت عبورکنندگی بتن خودتراکم شود. همچنین، در درصد جای‌گزینی مشابه ۱۰٪ انواع افزودنی در هر دو نسبت آب به چسباننده ۰/۴۵ و ۰/۳۵، حضور ولاستونیت نسبت به دوده سیلیس میزان ΔS_j کمتری را نشان داده است.

از طرفی بر مبنای مطالعات انجام شده میزان ΔS_j در تمامی اختلاط به میزان کمتر و یا مساوی از ۴۰ میلیمتر نتیجه شده است که می تواند نشان از توانایی عبورکنندگی "متوسط" و "بالا" داشته باشد. همچنین با بررسی شکل ظاهری نمونه ها پس از آزمایش حلقه J نتیجه گردید که نشانه ای از جداشدگی و یا انسداد بتن خودتراکم قبل و یا پس از عبور از حلقه J دیده نمی شود. نمونه‌ای از انجام آزمایش عبور از حلقه J در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تفاوت میزان جریان اسلامپ بدون حضور مانع با میزان جریان اسلامپ در حضور حلقه J

شکل ۱۲- پخش جریان بتن خودتراکم در حلقه J

۳-۶- شاخص الک پایداری

شاخص الک پایداری نیز در تمامی نمونه‌های بتن خودتراکم محاسبه گردید و نتایج در جدول ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که از این شکل ملاحظه می گردد، کمترین میزان شاخص الک پایداری برای اختلاط C45W10 و به میزان ۲/۲۲ درصد و بیشترین میزان برای اختلاط C35W20 و به میزان ۷٪ بدست آمده است که این امر نشان دهنده مقاومت مطلوب در برابر جداشدگی است. از طرفی شاخص جداشدگی تمامی نمونه ها کمتر از ۱۵٪ است که بر اساس EFNARC [۱۱] می توان آن را در رده SR2 طبقه بندی نمود.

جدول ۳- شاخص جدا شدگی الک در نمونه های بتن خودتراکم (٪)

	نام اختلاط	GTM		نام اختلاط	GTM
گروه اول	C45W0	۳/۲	گروه دوم	C35W0	۵/۳
	C45W5	۲/۳۵		C35W5	۵/۱
	C45W10	۲/۲۲		C35W10	۶
	C45W15	۲/۸۹		C35W15	۶/۲۲
	C45W20	۳/۶		C35W20	۷
گروه سوم	C45W0SF10	۴/۲۵	گروه چهارم		
	C45W5SF10	۲/۸		C35SF10	۵
	C45W10SF10	۲/۷۵		C35ZE10	۴/۳۳
	C45W15SF10	۳/۵۶		C45ZE10	۴
	C45W20SF10	۵			

٤- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر استفاده از پودر ولاستونیت بر خواص بتن تازه خودتراکم در حضور ۰-۱۰٪ دوده سیلیس و همچنین نسبت‌های آب به چسباننده ارزیابی گردید. بر مبنای ارزیابی میزان جریان اسلامپ نمونه های بتن خودتراکم نتیجه‌گیری شد که تمامی آنها دارای جریان اسلامپ در محدوده ۵۸۰ تا ۶۵۵ میلیمتر بودند. این محدوده از جریان اسلامپ برای دال های ساختمانی، شمع ها و شالوده های عمیق مناسب می باشد. بعلاوه، هرچند افزودن ولاستونیت باعث کاهش میزان جریان اسلامپ در نمونه های بتن خودتراکم می گردد، ولاستونیت در مقایسه با زئولیت و دوده سیلیس به مراتب نیاز به کاهنده شدید آب کمتری در هر دو نسبت آب به چسباننده ۰/۳۵ و ۰/۴۵ دارد. همچنین شاخص پایداری چشمی در تمامی نمونه های به میزان صفر و یا یک ارزیابی گردید که نشان از پایداری مناسب اختلاط های بتن خودتراکم مورد مطالعه دارد. از طرفی افزودن ولاستونیت در بتن خودتراکم سبب افزایش لزجت پلاستیک که با استفاده از زمان های T_{50} و عبور از قیف V شکل اندازه گیری می شود، می گردد. از طرفی در نمونه هابی حاوی ولاستونیت نیاز به مصرف اصلاح کننده لزجت مرتفع شده است که معمولا قیمت بالایی دارند. تاثیر مثبت ولاستونیت در بهبود قابلیت عبورکنندگی نیز از نتایج حلقه J قابل مشاهده می باشد. جداشدگی بتن خودتراکم حاوی ۰-۲۰٪ ولاستونیت در حضور صفر و ۱۰ درصد دوده سیلیس مناسب ارزیابی شد. چنین وضعیتی در هر دو نسبت آب به چسباننده (۰/۳۵٪ و ۰/۴۵٪) نیز تخمین زده شد.

۵- مراجع

[1]. Yang, KH, Jung, Y.B., Cho, MS, Tae, SH. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO_2 emissions from concrete. Journal of Cleaner Production 103, 774-783, (2015).

[2]. Blankendaal, T, Schuur, P, Voordijk, H. Reducing the environmental impact o concrete and asphalt: a scenario approach. Journal of Cleaner Production 66, 27-36, (2014).

[3]. Jahim, H., "The use of Wollastonite to enhance fresh and mechanical properites of concrete" (2010)

[4]. kalla P, Rana A, Bahadur Chad Y, Misra A, Csetenyi L. Durability studies on concrete containing wollastonite. Journal of Cleaner Production 87, 726-734, (2014).

[5]. Mathur R, Misra AK, Goel P. Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete. Journal of Scientific & Industrial Research 66, 1029-1034, (2007).

[6]. Misra, A., Mathur CB, Kalla P, Meena GS. Strength and absorption studies on concrete containing wollastonite. Ind. Highw. 37 (3), 33-38, (2009).

[7]. Sato T, Beaudoin JJ. An A.C. impedance spectroscopy study of freezing phenomena in wollastonite micro-fibre reinforced cement paste. In: Proc. Int. Symp. Role Conc. Sust. Dev., Scotland, UK, pp. 379e388. (2003).

[8]. Kalla P, Misra A, Chandra Gupta R, Csetenyi L, Gahlot V, Arora A.Mechanical amd Durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination. Construction and Building Materials 40, 2013, 1142-1150.

[9]. Zhang LC. Durability of Concrete Containing Wollastonite and Fly Ash. Advanced Materials Research, 800, 361-364, (2013).

[10]. Ahmed, S. (2009). Fresh and Mechanical Properties of Self-Consolidating Concrete Incorporating Silica Fume and Metakaolin. MSc. Thesis, Ryerson University.

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

[12]. Ghernouti Y, Rabehi B, Bouziani T, Ghezraoui H, Makhloufi A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). Construction and Building Materials 82, 89–100, (2015).

[13]. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete," (ASTM C 1611) Annual Book of ASTM Standards, 36-41, (2005).

[14]. Diawara H. Parametric Study of Self-Consolidating Concrete. Ph.D. thesis. University of Nevada, Las Vegas. (2008)

[15]. Yakhlaf M, Safiuddin Md, Soudki KA. Properties of freshly mixed carbon fibre reinforced self-consolidating concrete. Construction and Building Materials. 46 ; 224–231, (2013)

[16]. Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E. Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network. Materials and Structures 42:469–84,(2009).

[17]. Felekoglu B, Turkel S, Baradan B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environment 42:1795–1802,(2007).

Effects of wollastonite powder on the fresh properties of self-compacted concrete

Alireza Abdolrasoul
M.Sc. Student of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.
S.Yasin Mousavi*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

Abstract

The use of mineral additions in self-compacting concrete (SCC) as a substitute for Portland cement can not only improve the engineering properties and durability of concrete, but also reduce the environmental impacts of cement production. Nonetheless, due to the high sensitivity of SCC to its constituent materials, an appropriate study on the performance of mineral additions in the production of SCC is absolutely essential. The purpose of this study was to evaluate the fresh properties of SCC containing wollastonite powder in comparison with silica fume and natural zeolite. In this respect, 18 SCC mixtures were designed in four groups with different water/binder ratio and additions contents. Immediately after mixing, the fresh properties of concrete mixtures were evaluated for slump flow, visual stability index, T_{50}, V-funnel time, J-ring and the sieve stability index. The results revealed that although, regardless of the water/binder ratio, the incorporation of wollastonite decreases the slump flow diameter, it can reduce the demand for high-range water reducer admixture usage in comparison with natural zeolite and silica fume. Also, the increase in viscosity and passing ability improvement were observed when wollastonite is used in SCC. Sieve stability index indicated a good segregation resistance in the presence of wollastonite.

Keywords: Self-compacted concrete, wollastonite, traditional additions, workability.

* Corresponding Author: s.yasinmousavi@yahoomail.com