

تعیین میزان بهینه افزودنی‌های اصلاح‌کننده لزجت جهت حفظ پایداری مخلوط‌های خود تحکیم با مقادیر مختلف فوق روان‌کننده

فرشاد جعفری^۱، علیرضا قاری قرآن^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، مسئول آموزش و پژوهش، معاونت عمران شهری شهرداری اصفهان

۲- دکترای مهندسی سازه، معاون عمران شهری شهرداری اصفهان

jafari.farshad@gmail.com

خلاصه

بتن خود تحکیم (SCC) از سال ۱۹۸۸ در کشور ژاپن، بعنوان بتنی با قابلیت روانی بالا، که بدون نیاز به ویبراتور، اجرا می‌شود، تعریف شده است. چندین روش برای حصول خود تحکیمی رواج یافته است. اولین روش، استفاده از مواد پودری (مواد افزودنی معدنی)، بدون هرگونه تغییر در میزان آب مخلوط نسبت به بتن‌های معمولی است. روش دیگر استفاده از مواد افزودنی اصلاح‌کننده لزجت (VMA) می‌باشد که پایداری یا مقاومت در برابر جداسازی مخلوط را تامین می‌نماید. در این تحقیق، ترکیب بهینه مقادیر VMA و HRWR به همراه بقیه مصالح جهت بهبود قابلیت روان‌شدگی، مقاومت جداسازی و آب‌انداختگی مخلوط SCC مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: بتن خود تحکیم، جداسازی، مواد اصلاح‌کننده لزجت، فوق روان‌کننده، شاخص جداسازی چشمی.

۱. مقدمه

دوام بتن به عنوان یکی از مهمترین مسائل روز در صنعت ساختمان، منوط به عوامل متعددی از جمله تراکم مناسب آن است. اینک بتن خود تحکیم (SCC) به عنوان یک رویداد بزرگ در صنعت سازه‌های بتنی، علاوه بر تامین تراکم کافی بتن، مواردی از قبیل سرعت اجرای عملیات ساختمانی، کاهش آلودگی‌های صوتی ناشی از ویبراتورها، کیفیت سطح بتن، سهولت در اجرا، دوام بتن و روانی آن را بهبود می‌بخشد. [۱ و ۲]

تکنولوژی ساخت مخلوط‌های SCC فقط با استفاده از مواد افزودنی فوق روان‌کننده ممکن خواهد بود و معمولاً از مواد پودری و مواد افزودنی اصلاح‌کننده لزجت (VMA) نیز استفاده می‌شود. فوق روان‌کننده‌ها جهت تولید بتن SCC با روانی زیاد مورد نیاز است، در حالی که مواد پودری و یا مواد افزودنی اصلاح‌کننده لزجت، جهت تامین پایداری و قوام مخلوط مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از جداسازی و آب‌انداختگی جلوگیری نماید. [۳ و ۴]

۲. مصالح مورد استفاده

الف- سیمان؛ سیمان مصرفی در این تحقیق از نوع تیپ II کارخانه سیمان تهران می‌باشد که وزن مخصوص آن $3/15 \text{ gr/cm}^3$ و سطح مخصوص (Blain) آن، $3033 \text{ cm}^2/\text{kg}$ می‌باشد.

ب- ماسه؛ در این تحقیق از دو نوع ماسه S1 و S2 استفاده شده که از نوع رودخانه‌ای بوده و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک آنها به ترتیب $2/49 \text{ gr/cm}^3$ و $2/48 \text{ gr/cm}^3$ و نیز میزان جذب آب آنها به ترتیب ۳ و ۲ درصد می‌باشد.

پ- درشت دانه (شن)؛ مصالح درشت دانه با حداکثر اندازه 12 mm و از نوع شکسته کوهی با وزن مخصوص اشباع با سطح خشک $2/55 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۱/۵ درصد می‌باشد.

ت- مواد افزودنی شیمیایی؛ از یک ماده فوق روان کننده (HRWR) بر پایه پلی کربکسیلات، با نام تجاری ۳۳۵ structuro و همچنین از یک ماده اصلاح کننده لزجت (VMA) با نام تجاری ۴۸۰ structuro استفاده شده است.

ث- مواد افزودنی معدنی؛ در این تحقیق از پودر سنگ با وزن مخصوص 2.7 gr/cm^3 و سطح مخصوص $4800 \text{ cm}^2/\text{kg}$ به عنوان عنصر پرکننده (فیلر) استفاده شده است.

۳. طرح اختلاط

در مورد طرح اختلاط بتن های خود تحکیم آئین نامه ها و محققان، روش های مختلفی را پیشنهاد کرده اند که می توان به محدودیت های آئین نامه اروپایی (EFNARC) [۲] و روش طرح اختلاط اوکامارا [۱] و یا روش طرح مخلوط ساده [۵] اشاره نمود. در این تحقیق از روش طرح مخلوط ساده، جهت طراحی نسبت های اختلاط استفاده شده است. نسبت های طرح اختلاط در این تحقیق، به صورت جدول ۱ می باشد. با توجه به موضوع تحقیق، جهت تعیین میزان بهینه VMA، لازم است مقادیر HRWR، VMA و پودر سنگ تغییر نماید. لذا طرح مخلوط ها با حفظ مقادیر جدول ۱ به سه گروه A، B و C مطابق مقادیر موجود در جداول ۳ تا ۵ تقسیم بندی می شوند (این مقادیر بر حسب درصد وزنی از سیمان می باشند). شایان ذکر است، مراحل اختلاط مواد در این تحقیق مطابق ASTM C1۰۹ می باشد.

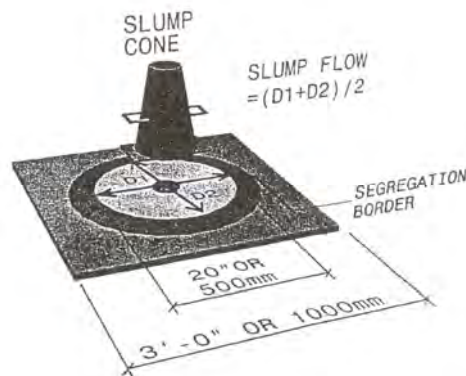
جدول ۱- طرح مخلوط با شرایط خشک مصالح سنگی

مصالح مصرفی	شن (Kg/m^3)	ماسه (S_1) (Kg/m^3)	ماسه (S_2) (Kg/m^3)	سیمان (Kg/m^3)	آب (Lit/m^3)
مقدار مصالح	۷۳۱	۶۵۰	۲۴۶	۴۳۰	۲۰۸

۴. آزمایش ها بر روی بتن تازه

۱.۴. آزمایش اسلامپ جاری

آزمایش اسلامپ جاری برای ارزیابی جریان افقی بتن خود تحکیم، تحت اثر وزن خود در غیاب هر گونه مانع (آرماتور) انجام می گیرد. با توجه به شکل ۱، میزان اسلامپ جاری بصورت میانگین دو قطر عمود بر هم بتن توزیع شده است. بر همین اساس می توان یک شاخص پایداری ظاهری (VSI) را ایجاد نمود که جزئیات آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- آزمایش اسلامپ جاری

جدول ۲- شاخص پایداری ظاهری (VSI)

عدد VSI	معیار
۰	هیچ نشانه‌ای از جدایش و یا فرغون مخلوط کن و یا فرغون مشاهده نمی‌شود.
۱	هیچ نشانه‌ای از تمرکز سنگدانه‌ها یا ملات مشاهده نمی‌شود، ولی مقداری آب انداختگی و حباب هوا بر سطح بتن در آزمایش، مخلوط کن و یا فرغون مشاهده می‌شود.
۲	اندکی تمرکز سنگدانه و یا ملات مشاهده می‌شود و آب انداختگی قابل توجه در فرغون و مخلوط کن وجود دارد. همچنین در آزمایش، میزان آب انداختگی پیرامون دایره بتن کمتر از ۲۰mm است.
۳	جدایش و سنگدانه کاملاً مشهود است و تمرکز سنگدانه در مرکز دایره بتن دیده می‌شود. میزان آب انداختگی پیرامون دایره بتن بیشتر از ۲۰mm است.

۲.۴. آزمایش حلقه J

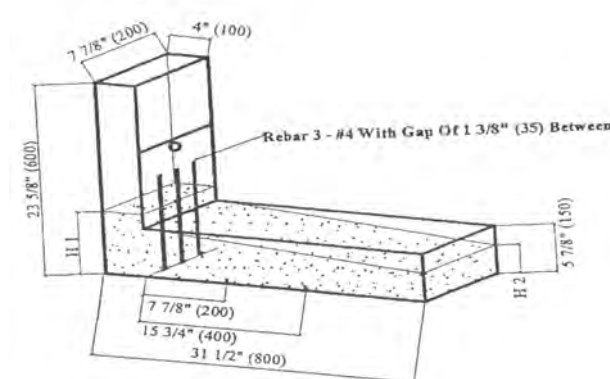
این آزمایش جهت مشخص کردن قابلیت عبور بتن خود تحکیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط دو رابطه مختلف قابل ارزیابی می‌باشد. رابطه اول توسط آیین‌نامه اروپا [۲] پیشنهاد گردیده که هرچه عدد بدست آمده بزرگتر باشد، نشان دهنده قابلیت عبور کمتر است و رابطه دوم نیز توسط انستیتو بتن پیش ساخته و پیش تنیده امریکا [۶] پیشنهاد شده که بزرگتر بودن مقدار عددی آن نشان دهنده افزایش تمایل جدایش در مخلوط است.

۳.۴. آزمایش قیف V

این آزمایش جهت ارزیابی قابلیت پرکنندگی یا روانی SCC با حداکثر اندازه سنگدانه ۲۰mm انجام می‌گیرد که بر اساس مقدار زمان عبور SCC از قیف اندازه‌گیری می‌شود. هرچه زمان اندازه‌گیری شده کمتر باشد، قابلیت عبور و روانی SCC بیشتر خواهد بود و زمان طولانی‌تر به مفهوم بلوکه شدن یا انسداد بتن می‌باشد.

۴.۴. آزمایش جعبه L

این آزمایش می‌تواند به عنوان یک شاخص قابلیت عبور و یا میزان عبور بتن از میان آرماتورها (بعنوان یک مانع) مورد استفاده قرار گیرد و نسبت $H2/H1$ بعنوان شاخص قابلیت عبور از میان آرماتورها معرفی می‌گردد (شکل ۲). اگر SCC مانند آب جاری شود آنگاه نسبت $H2/H1$ برابر ۱ خواهد شد. از طرفی هرچه نسبت $H2/H1$ کمتر باشد، روانی بتن کمتر است و یا به دلیل جدایش، این نسبت کاهش یافته است.



شکل ۲- آزمایش جعبه L

۵. نتایج آزمایش‌ها

جدول ۳- مشخصات و نتایج آزمایشات مخلوط‌های گروه A

مشخصه	VMA (%)	HRWR (%)	VSI	اسلامپ جاری (cm)	حلقه J با EFNARC (mm)	حلقه J با PCI (mm)	زمان قیف V (ثانیه)	نسبت جعبه L	F_c (Kg/cm ^۲)
D _۱	۱.۶۳	۰.۴۶۵	۰.۵	۷۳	۴.۵	۴.۵	۶.۵	۰.۸۴	۴۷۹
H _۱	۲.۱	۰.۵۸۱	۱	۷۴.۵	۶.۷۵	۶.۷۵	۱۱	۰.۸۲	۴۳۱
L _۱	۴.۲	۰.۶۹۷	۱	۷۶	۹.۷۵	۹.۷۵	۱۲.۳	۰.۷۹	۳۷۲
P _۱	۶.۲۸	۰.۸۱۴	۱.۵	۷۹.۵	۱۲.۷۵	۱۲.۷۵	۱۵.۴	۰.۷۷	۳۱۵

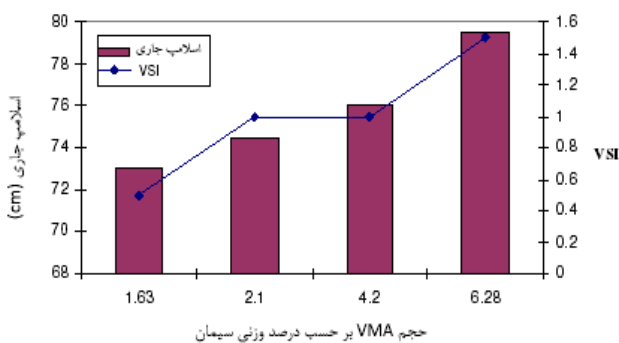
جدول ۴- مشخصات و نتایج آزمایشات مخلوط‌های گروه B

مشخصه	پودر سنگ (%)	HRWR (%)	VSI	اسلامپ جاری (cm)	حلقه J با EFNARC (mm)	حلقه J با PCI (mm)	زمان قیف V (ثانیه)	نسبت جعبه L	F_c (Kg/cm ^۲)
D _۲	۰	۰.۴۶۵	۲	۷۳	۱۱.۷۵	۱۱.۷۵	۳.۶	۰.۷۹	۵۰۱
H _۲	۵	۰.۴۶۵	۱	۷۵.۵	۸	۸	۱۱.۳	۰.۸۱	۵۱۲
L _۲	۱۰	۰.۴۶۵	۰	۶۵	۱۲.۲۵	۱۲.۲۵	۱۷.۷	۰.۵۴	۵۳۳
P _۲	۱۵	۰.۴۶۵	۰	۵۳.۵	۱۷	۱۷	۲۵.۲	۰.۱۲	۵۸۱

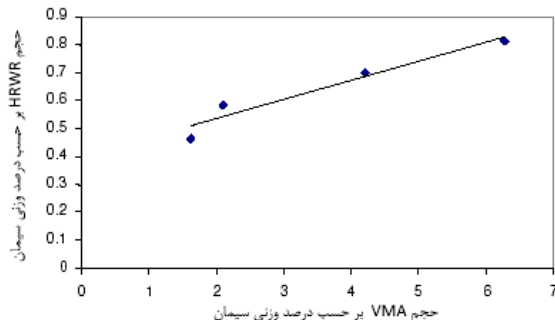
جدول ۵- مشخصات و نتایج آزمایشات مخلوط‌های گروه C

مشخصه	پودر سنگ (%)	VMA (%)	HRWR (%)	VSI	اسلامپ جاری (cm)	حلقه J با EFNARC (mm)	حلقه J با PCI (mm)	زمان قیف V (ثانیه)	نسبت جعبه L	F_c (Kg/cm ^۲)
D _۳	۰.۱۵	۰	۰.۴۶۵	۰	۵۳.۵	۱۷	۲۳.۷۵	۲۵.۲	۰.۱۲	۵۸۱
H _۳	۰.۱۵	۰.۶۹۷	۰.۵۸۱	۰	۷۴	۴.۷۵	۵	۵.۳	۰.۸	۴۶۳
L _۳	۰.۱۵	۱.۳۹	۰.۶۹۷	۰.۵	۷۵	۹.۵	۱۱.۵	۹.۷	۰.۷۸	۳۴۷
P _۳	۰.۱۵	۴.۶۵	۰.۸۱۴	۱	۷۷	۱۱.۷۵	۱۴.۲۵	۱۰.۴	۰.۷۴	۳۱۸

افزایش میزان HRWR و VMA، بطور همزمان تا مرز مشخصی در پایداری مخلوط‌ها موثر خواهد بود و خارج از آن مرز، حتی با افزایش میزان VMA، مخلوط دارای پایداری نبوده و در نتیجه، روانی آن نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴- تاثیر افزایش همزمان VMA و HRWR بر VSI و اسلامپ جاری در مخلوط‌های گروه A



شکل ۳- رابطه VMA و HRWR در مخلوط‌های پایدار گروه A

با توجه به شکل ۴، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان VMA و HRWR به طور همزمان، میزان روان‌شدگی افزایش می‌یابد ولی عدد VSI یا شاخص جدایش‌دگی نیز بیشتر می‌شود. لذا، میزان بهینه VMA را باید در مقادیر کم HRWR جستجو نمود. یعنی در میان مخلوط‌های گروه A، مخلوط D۱ بهترین خصوصیات رئولوژی را دارا می‌باشد.

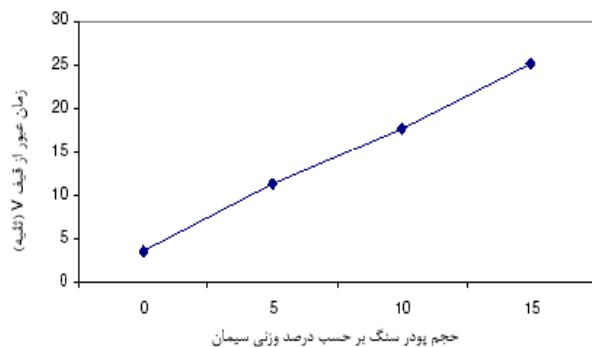
همان‌طور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود افزایش میزان پودر سنگ در مخلوط‌های گروه B روان‌شدگی مخلوط را کاهش می‌دهد. مقدار پودر سنگ برای تامین حالت بهینه روانی، برابر ۵ درصد وزن سیمان می‌باشد. لذا در بین مخلوط‌های گروه B، مخلوط H۲ بهترین خصوصیات رئولوژی را دارا می‌باشد. همانگونه که در مخلوط‌های گروه C مشاهده می‌شود، با افزایش میزان VMA و HRWR، اسلامپ جاری و نیز جدایش‌دگی افزایش می‌یابد، البته در مقایسه با مخلوط‌های گروه A میزان این جدایش‌دگی کمتر است و این به دلیل وجود پودر سنگ در مخلوط است که قوام و لزجت خمیر سیمان را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. از میان مخلوط‌های گروه C، مخلوط H۳ بعنوان بهترین مخلوط شناخته می‌شود. از دیدگاه رئولوژی، بتن تازه براساس روش بینقام توسط دو عامل تنش جاری شدن و لزجت تعریف می‌شود. بنابراین برای تعیین طرح مخلوط با مقادیر بهینه HRWR و VMA، آزمایش‌های دیگری از قبیل حلقه L، جعبه L و قیف V نیز جهت بررسی دیگر ملزومات SCC انجام شده است که در ادامه ارائه می‌گردد.

با توجه به جدول ۳، با افزایش میزان HRWR و VMA به طور همزمان در مخلوط‌های گروه A، زمان عبور از قیف افزایش می‌یابد. این افزایش زمان می‌تواند از دو دیدگاه مورد تفسیر قرار گیرد که تماماً در زمان عبور موثر خواهند بود. این دو دیدگاه عبارتند از: الف- افزایش میزان جدایش‌دگی، ب- افزایش میزان لزجت خمیر سیمان. در پدیده جدایش‌دگی، مصالح درشت دانه تحت اثر وزن خود ته‌نشین می‌شوند و با توجه به فضای محدود انتهایی قیف، باعث انسداد شده و در برابر عبور مخلوط از دریچه تحتانی قیف مانع ایجاد می‌کنند و در نتیجه زمان عبور افزایش می‌یابد. محدوده عددی توصیه شده برای آزمایش اسلامپ جاری در حدود ۷۵ سانتی‌متر و برای آزمایش قیف V حدود ۶ ثانیه می‌باشد.

با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مخلوط‌های گروه B، نمودار افزایش میزان پودر سنگ با HRWR ثابت در مقابل زمان عبور از قیف V در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش میزان پودر سنگ، لزجت مخلوط به مقدار زیاد افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که مخلوط P۲ ملزومات SCC را برآورده نمی‌سازد و بعنوان SCC شناخته نمی‌شود. لازم به توضیح است که با توجه به تصاویر الکترونی مربوط به پودر سنگ (شکل ۶)، این ماده معدنی دارای ذرات گوشه‌دار و تیز می‌باشد که افزایش مقدار آن باعث کاهش کارایی مخلوط‌های SCC می‌گردد. با این توصیف، مخلوط H۲ با زمان عبور ۱۱/۳ ثانیه در بین مخلوط‌های گروه B، دارای زمان بهینه می‌باشد.



شکل ۶- تصویر الکترونی از پودر سنگ

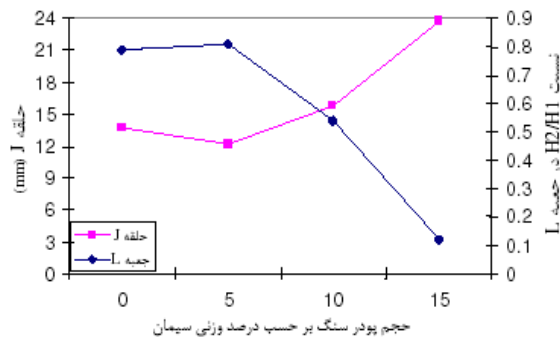


شکل ۵- رابطه میزان پودر سنگ با زمان عبور از قیف V در مخلوط‌های گروه B

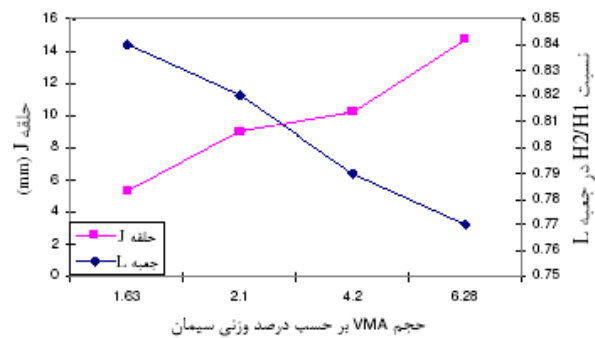
با انجام آزمایش قیف V در مخلوط‌های گروه C با توجه به افزایش همزمان VMA و HRWR با مقدار ثابت پودر سنگ به میزان ۱۵ درصد، زمان عبور از قیف V نسبت به مخلوط‌های گروه‌های A و B کاهش می‌یابد. اگر چه مخلوط D۳ دارای ملزومات SCC نمی‌باشد ولی بقیه مخلوط‌ها نسبت به گروه‌های A و B زمان عبور کمتری دارند و مخلوط H۳ دارای بهترین زمان عبور به میزان ۵/۳ ثانیه می‌باشد. همچنین شاخص جدایش‌دگی نسبت به بقیه مخلوط‌های گروه‌های A و B بهبود می‌یابد.

آزمایش‌های جعبه L و حلقه J نیز برای بررسی و ارزیابی قابلیت پرمکنندگی و عبور SCC از بین آرماتورها کاربرد زیادی دارند. با توجه به اینکه قابلیت عبور یکی از ملزومات بتن‌های خود تحکیم می‌باشد، لذا کنترل مخلوط‌ها در این تحقیق، از نظر قابلیت عبور، الزامی است. اگر نسبت جعبه L کمتر از ۰/۸ باشد احتمال انسداد مخلوط، افزایش می‌یابد. همانطور که از نتایج آزمایش‌های بخش ۴ استنباط می‌شود، هرچه میزان جدایش‌دگی افزایش

یابد، قطعاً قابلیت عبور کاهش می‌یابد. در شکل ۷ نمودار مربوط به قابلیت عبور به وسیله آزمایش‌های حلقه J و جعبه L نسبت به افزایش همزمان HRWR و VMA در مخلوط‌های گروه A نشان داده شده است.



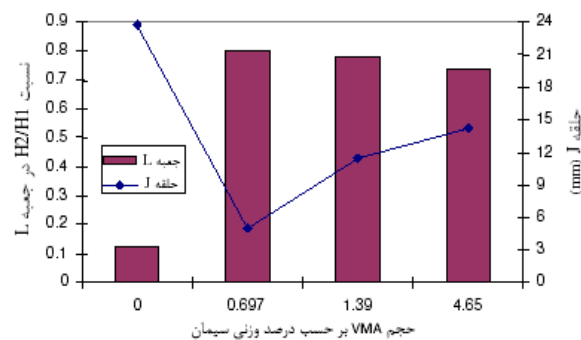
شکل ۸- رابطه مقدار پودر سنگ با حلقه J و نسبت جعبه L در مخلوط‌های گروه B



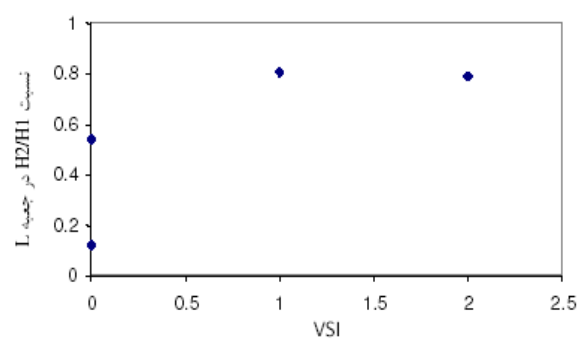
شکل ۷- رابطه VMA با نسبت جعبه L و حلقه J در مخلوط‌های گروه A

همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش همزمان HRWR و VMA در مخلوط‌ها، قابلیت عبور کاهش می‌یابد. زیرا اگرچه با افزایش میزان HRWR و VMA روانی بتن بدون وجود مانع افزایش می‌یابد، لیکن تاثیر VMA در جلوگیری از جداسازی مخلوط به حدی نیست که با وجود افزایش میزان HRWR، همچنان قادر به کنترل پایداری مخلوط باشد.

با توجه به شکل ۸، در مخلوط‌های گروه B، طرح‌های P2 و L2 دارای ملزومات SCC نمی‌باشند و مخلوط H2 دارای بیشترین مقدار $H2/H1$ است. همچنین با توجه به نمودار جعبه L در برابر VSI می‌توان به تاثیر مهم جداسازی و انسداد، بر قابلیت عبور پی برد (شکل ۹). از طرفی با افزایش میزان پودر سنگ، لزجت مخلوط افزایش می‌یابد، به نحوی که مخلوط‌های گروه B، ملزومات SCC را برآورده نمی‌سازند و افزایش بیش از حد لزجت مخلوط، منجر به انسداد در آزمایش جعبه L می‌گردد.



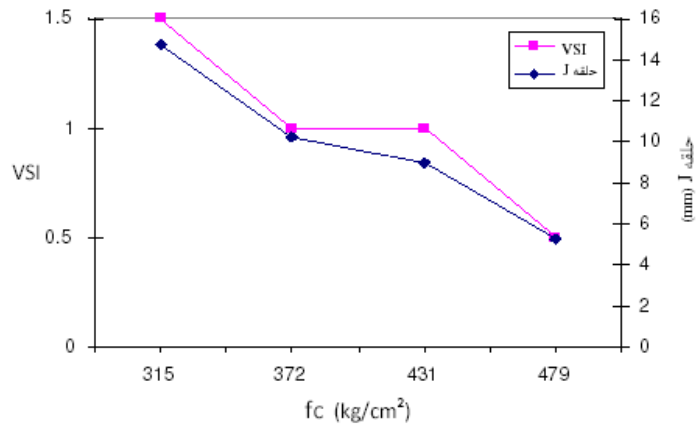
شکل ۱۰- رابطه VMA با حلقه J و نسبت جعبه L در مخلوط‌های گروه C



شکل ۹- رابطه VSI و نسبت جعبه L در مخلوط‌های گروه B

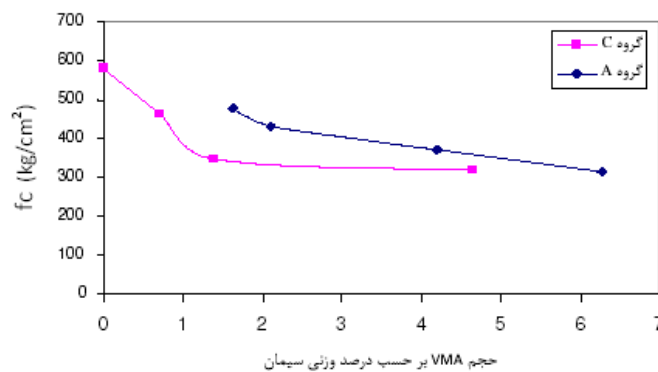
با توجه به نمودار شکل ۱۰ می‌توان چنین ارزیابی کرد که با کاهش میزان VMA و جایگزینی پودر سنگ با نسبت ثابت در مخلوط‌های گروه C، قوام و لزجت آنها نسبت به مخلوط‌های گروه A افزایش یافته و در نهایت ملزومات مربوط به SCC کاملاً بهبود می‌یابد. همچنین جایگزینی مقدار ثابتی پودر سنگ در این مخلوط‌ها، به دلیل کاهش مقدار سیمان منجر به کاهش هزینه‌ها در ساخت بتن‌های خود تحکیم می‌گردد.

در شکل ۱۱، نمودار مقاومت فشاری براساس شاخص حلقه J و VSI برای طرح‌های مختلف گروه A نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود می‌توان به اثر مستقیم جداسازی بر مقاومت فشاری پی برد. مطابق این نمودار با کاهش مقاومت جدا شدگی، مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومت ناشی از ناهمگن بودن مخلوط در اثر پدیده جداسازی می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های مربوط به مخلوط‌های گروه B، با افزایش مقدار پودر سنگ، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- رابطه مقاومت فشاری ۲۸ روزه با VSI و حلقه J در مخلوط‌های گروه A

با توجه به شکل ۱۲ مقاومت فشاری مخلوط‌های گروه C نسبت به گروه A افزایش یافته و این ناشی از کاهش میزان VMA و افزایش مقدار ثابت پودر سنگ (۱۵ درصد) به مخلوط می‌باشد که افزایش مقاومت فشاری بتن را به همراه کنترل جداسازی در پی دارد.



شکل ۱۲- رابطه مقاومت فشاری با میزان VMA در مخلوط‌های گروه A و C

همچنین لازم به ذکر است که با توجه به مقاومت فشاری بدست آمده از طرح اختلاط‌های مختلف و نیز با توجه به مقادیر بهینه VMA و HRWR می‌توان میزان سیمان را جهت اقتصادی نمودن طرح کاهش داد. زیرا با توجه به مقدار سیمان مصرفی (430 kg/m^3)، مقاومت فشاری در مخلوط H₃ که دارای مقدار بهینه VMA (۰/۷ درصد) می‌باشد، تقریباً به میزان ۳۳ درصد افزایش یافته است. لذا بتن‌های خود تحکیم از جمله بتن‌های توانمند با مقاومت بالا می‌باشند. [۷]

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱- افزایش میزان HRWR و VMA، بطور همزمان تا مرز مشخصی در پایداری مخلوط‌ها موثر خواهد بود و خارج از آن مرز، حتی با افزایش میزان VMA، مخلوط دارای پایداری نبوده و در نتیجه، روانی آن نیز کاهش می‌یابد. بنابراین حوزه تاثیر VMA در محدوده مشخصی قرار دارد.

- ۲- با افزایش میزان VMA و HRWR به طور همزمان، میزان روانی در آزمایش اسلامپ جاری افزایش می‌یابد ولی عدد VSI یا شاخص جداشدگی نیز بیشتر می‌شود. لذا میزان بهینه VMA را باید در مقادیر کم HRWR جستجو نمود.
- ۳- در مخلوط‌های گروه C، وجود پودر سنگ به میزان ۱۵ درصد وزن سیمان، باعث کاهش میزان VMA در حدود ۵۵ درصد نسبت به مخلوط‌های گروه A شده که در نهایت منجر به کاهش میزان جداشدگی و روان‌شدگی بهتر و کاهش هزینه‌ها می‌شود.
- ۴- مطابق روش بینقام، خصوصیات رئولوژی بتن تازه توسط دو عامل تنش جاری شدن و لزجت (ویسکوزیته) تعریف می‌شود.
- ۵- در مخلوط‌های گروه A و C با افزایش میزان جداشدگی، زمان عبور از قیف V نیز افزایش می‌یابد، ولی به دلیل وجود میزان ۱۵ درصد پودر سنگ در مخلوط‌های گروه C، میزان جداشدگی و در نهایت زمان عبور از قیف V، نسبت به مخلوط‌های گروه A کاهش یافته است.
- ۶- خصوصیات روان‌شدگی مخلوط‌های گروه C نسبت به مخلوط‌های گروه A و مخلوط‌های گروه A نسبت به مخلوط‌های گروه B بهبود یافته است و در مجموع مخلوط H^۳ از گروه C دارای بهترین خصوصیات رئولوژی می‌باشد، لذا بهینه‌ترین میزان VMA در حدود ۰/۷ درصد می‌باشد.
- ۷- بتن‌های خود تحکیم از جمله بتن‌های توانمند با مقاومت بالا هستند، لذا با توجه به اینکه مقاومت فشاری نمونه معکبی ۲۸ روزه مخلوط با بهینه‌ترین میزان VMA (۰/۷ درصد در مخلوط H^۳)، در حدود ۳۳ درصد از مقاومت فشاری مشخصه طرح بیشتر است، می‌توان مقدار سیمان را کاهش داد.
- ۸- با توجه به مقایسه نتایج آزمایش حلقه J براساس راهنمای PCI و شاخص جداشدگی چشمی، محدوده پیشنهادی آزمایش حلقه J برای راهنمای PCI در مخلوط‌های پایدار، در حدود ۵ الی ۱۵ میلی‌متر می‌باشد.
- ۹- در این تحقیق بهینه‌ترین میزان VMA در حدود ۰/۷ درصد با میزان ۱۵ درصد پودر سنگ و در حدود ۰/۶ درصد مواد فوق روان‌کننده می‌باشد. با بررسی مخلوط‌های مختلف در گروه‌های A، B و C می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که برای تولید بتنی با خصوصیات رئولوژی و مکانیکی مورد نظر، مقدار بهینه VMA جهت کنترل پایداری مخلوط با مقادیر کم HRWR قابل حصول می‌باشد و این مقدار را می‌توان با سعی و خطا در هر طرح اختلاط بدست آورد.

۷. مراجع

۱. Okamura, H. and Ovchi, M., (۲۰۰۳), "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. ۱, No. ۱, pp ۵-۱۵.
۲. EFNARC, (۲۰۰۲), Specification and Guiding lines for Self-compacting Concrete, UK.
۳. Lochemi, M., Hossain, K., Lambros, V., Nkinamubanzi, P. and Bouzoubaa, N., (۲۰۰۴), "Performance of New Viscosity Modifying Admixtures in Enhancing the Rheological Properties of Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol. ۳۴, pp ۱۸۵-۱۹۳.
۴. Lochemi, M., Hossain, K., Lamberts, V., kinamubanzi, P. and Bouzoubaa, N., (۲۰۰۴), "Self-consolidating Concrete Incorporating New Viscosity Modifying Admixtures", Cement and Concrete Research, Vol. ۳۴, pp ۹۱۷-۹۲۶.
۵. Su, N., Hsu, K. and Chai, H., (۲۰۰۱), "A simple mix design method for self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, Vol. ۳۱, pp ۱۷۹۹-۱۸۰۷.
۶. Precast / Prestressed Concrete Institute (PCI), (۲۰۰۳), "Interim Guidelines for the use of Self - Consolidating Concrete", Chicago, USA.
- ۷- امیر مسعود پدیدار فرد، (۱۳۸۴)، "تعیین میزان بهینه افزودنی‌ها جهت حفظ پایداری مخلوط‌های خود تحکیم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.