جمع‌شدگی خودزا و عمل‌آوری داخلی بتن خود متراکم پرمقاومت

هرمز فامیلی [۱]، مهدی خداداد سریزدی *[۲] و طیبه پرهیزکار [۳]

[۱] استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲] مربی دانشکده عمران، دانشگاه یزد و دانشجوی دکتری دانشگاه علم وصنعت ایران

[۳] استادیار مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

چکیده

دراین تحقیق جمع‌شدگی و مقاومت فشاری بتن خود متراکم حاوی دوده سیلیس با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/ ۳ (آب به سیمان ۰/۳۶) بررسی می‌شود. سپس بخشی ازحجم سنگدانه معمولی با سبکدانه لیکای اشباع جایگزین گردید تا تأثیر رطوبت موجود در سبکدانه برروی جمع‌شدگی بررسی گردد. چنانچه عمل آبرسانی از خارج به منافذ موئین خمیر سیمان میسر نباشد، رشد فزاینده جمع‌شدگی خودزای ناشی از خود خشک شدگی، دوام این نوع بتن را تهدید می‌کند. پایش جمع‌شدگی خودزا بلافاصله پس از اینکه بتن در یک قالب مخروطی شکل ریخته شد، با استفاده از اشعه لیزر انجام گردید و تا ۲۴ ساعت به طور اتوماتیک درهر ده دقیقه به ثبت رسید. ضمناً جمع‌شدگی خودزا و ناشی از خشک شدن بعد از ۲۴ ساعت، مطابق روش پیشنهاد شده در استاندارد ASTM C157 اندازه‌گیری شد. برای این منظور از هر مخلوط، چهار نمونه منشوری ساخته شد و پس از ۲۴ ساعت که قالب‌ها باز شدند از مخلوط‌ها، دو نمونه با نوار چسب آلومینیومی پوشانده شدند و دو نمونه دیگر بدون پوشش باقی ماندند. ثبت تغییر طول نمونه‌ها از زمان باز کردن قالب‌ها تا ۲۰ روز ادامه داشت. نتایج (نمونه مخروطی) نشان می‌دهند که در ۲۴ ساعت اول، جمع‌شدگی خودزا در بتن کنترل قابل ملاحظه است و استفاده از سبکدانه اشباع در حذف این جمع‌شدگی و حتی ایجاد تورم بسیار موثر می‌باشد. عملکرد دانه‌های ریز بهتر از دانه‌های درشت بوده و با افزایش مقدار سبکدانه، کاهش جمع‌شدگی بیشتر می‌شود. بعد از ۲۴ساعت جمع‌شدگی خودزای (نمونه‌های منشوری) مخلوط کنترل تا یک هفته بعد از باز کردن قالب رشد کرد و سپس رشد آن متوقف شد بطوری که تا دو هفته بعد از آن تغییر محسوسی مشاهده نگردید. جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن مخلوط کنترل چندین برابر جمع‌شدگی خودزای آن مخلوط بدست آمد و برخلاف جمع‌شدگی خودزا رشد آن متوقف نشد و سبکدانه اشباع نتوانست از آن جلوگیری کند. مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی سبکدانه کاهش یافت و با افزایش مقدار جایگزینی، کاهش مقاومت نیز بیشتر شد.

واژگان کلیدی: بتن خود متراکم، جمع‌شدگی خودزا، عمل‌آوری داخلی، سبکدانه لیکای اشباع.

۱- مقدمه

در اواخر قرن بیستم امکان ساخت مخلوط بتن توانمند با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۴ و روانی مناسب فراهم شد. مزیت بتن توانمند که به طور مناسب متراکم و عمل آوری شده باشد، از هر نظر شامل مقاومت و دوام توسط محققین به اثبات رسیده و در برخی از کشورها بطور وسیع جهت ساخت سازه‌های بتنی مستحکم، مقاوم و با دوام مورد بهره‌برداری قرارگرفته است [۱]. اما بررسی برخی از این سازه‌ها نشان می‌دهد که ممکن است به دلیل فشرده‌تر بودن میلگرد گذاری‌ها، محدودیت دسترسی به محل بتن‌ریزی شده و احیانا بی‌توجهی کارگران، تراکم مناسب حاصل نشود [۲]. در ضمن با توجه به تغییرات ایجاد شده در طرح اختلاط (آب کمتر و مواد سیمانی بیشتر)، رشد جمع‌شدگی خودزا ناشی از خود خشک‌شدگی باعث ترک خوردن زود هنگام و کاهش دوام این بتن می‌شود [۳،۴].

تحقیقات گسترده در راستای حل این دو مسئله در دهه ۱۹۹۰ با مطرح شدن بتن خود متراکم [۵-۷] و ایده عمل‌آوری داخلی [۸-۱۱] به بار نشست. در اوایل قرن بیست و یکم، بتنی مطرح شده است که قادر است فقط با اتکا به اجزاء تشکیل دهنده آن به طور خود کار متراکم و عمل‌آوری شود. با طرح بتن خود متراکم عمل‌آوری شده داخلی و حذف عامل نیروی انسانی در فرآیند متراکم کردن و مرطوب نگه‌داشتن بتن گامی بلند در راستای ساخت و اجرای سازه‌های بتنی نفوذناپذیر، مقاوم و با دوام برداشته شده است.

در این تحقیق بتن خود متراکم حاوی دوده سیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۶ (آب به مواد سیمانی ۰/۳) طراحی و ساخته شد (به‌عنوان بتن کنترل). پس از انجام آزمایش‌های کارائی بتن تازه، شامل قطر جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L که حدود نیم ساعت طول کشید، اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزا

* نویسنده مسئول

دریافت ۸۸/۱۰/۲ پذیرش ۸۹/۳/۵

www.SID.ir
Archive of SID

با استفاده از تکنیک لیزر بلافاصله پس از ریختن بتن در یک قالب مخروطی شکل شروع شد و به مدت ۲۴ ساعت هر ده دقیقه به طور خودکار به ثبت رسید. جهت جلوگیری از تبخیر رطوبت از سطح قاعده نمونه مخروطی شکل، از مواد عمل‌آوری غشاء ساز استفاده شد. سپس بخشی از حجم سنگدانه معمولی با سبکدانه اشباع هم‌اندازه آن جایگزین شد تا تأثیر رطوبت موجود در سبکدانه بر جمع‌شدگی خودزا بررسی شود. با توجه به پارامترهای مورد مطالعه یعنی اندازه (ریز و درشت) و مقدار (۳۰ و۴۰ درصد حجمی) سنگدانه جایگزین شده، چهار مخلوط ساخته شد و آزمایش فوق‌الذکر تکرار گردید. ضمناً جمع‌شدگی خودزا و خشک شدن بعد از ۲۴ ساعت، مطابق روش پیشنهاد شده در استاندارد ASTM C157 اندازه‌گیری شد. برای این منظور چهار نمونه منشور از هر یک از مخلوط‌های بدون سبکدانه (36LWA00)، ۳۰ درصد جایگزینی ماسه (36LWS30) و۳۰ درصد جایگزینی شن (36LWG30) ساخته شد (۳۶ بیانگر نسبت آب به سیمان برحسب درصد می‌باشد) و پس از ۲۴ ساعت که قالب‌ها باز شدند دو نمونه جهت اندازه‌گیری جمع شدگی خودزا با نوار چسب آلومینیومی پوشانده شدند و دو نمونه دیگر برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی ناشی ازخشک‌شدن بدون پوشش باقی‌ماندند. ثبت تغییر طول نمونه‌ها پس از بازکردن قالب‌ها تا ۲۰ روز در اتاقی که رطوبت و دمای آن تحت کنترل بود (به ترتیب برابر 48±3% و 23±1°C) ادامه داشت، در این روش از جمع‌شدگی خودزا در ۲۴ ساعت اول که بتن در قالب قراردارد صرف نظر می‌شود. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰۰ میلی‌متر جهت بررسی تأثیر این جایگزینی در مقاومت فشاری اندازه‌گیری شد. نتایج مطالعه در ۲۴ ساعت اول (نمونه مخروطی) حاکی از مؤثر بودن لیکای اشباع در حذف جمع‌شدگی خودزا می‌باشد و با افزایش مقدار جایگزینی تورم مشاهده گردید. بعد از ۲۴ ساعت جمع‌شدگی خودزای مخلوط کنترل (نمونه‌های منشوری) تا یک هفته بعد از باز کردن قالب رشد کرد و سپس رشد آن متوقف شد به طوری که تا دو هفته بعد از آن تغییر محسوسی نکرد. جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن مخلوط کنترل چندین برابر جمع‌شدگی خودزای آن مخلوط به دست آمد و برخلاف جمع‌شدگی خودزا رشد آن متوقف نگردید و سبکدانه اشباع نتوانست از رشد آن جلوگیری کند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن کنترل ۱۰۲ مگا پاسکال و مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سبکدانه بین ۶۲ تا ۸۷ درصد مقاومت بتن کنترل به دست آمد.

۲- اهمیت موضوع

طرح بتن خود متراکم توانمند (با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴) انقلابی در کاربرد بتن درانواع سازه‌های بتنی پیش‌ساخته و درجا، با مقاطع نازک و تراکم میلگردهای طولی و عرضی، ایجاد کرده است. عمل‌آوری این نوع بتن حساس‌تر از انواع دیگر بتن‌ها می‌باشد و اگر فرآیند عمل‌آوری با آب از همان لحظات اولیه گیرش بتن آغاز نشود رشد ترک‌های موئین در ناحیه انتقالی و خمیر سیمان در سنین اولیه بتن که مقاومت کششی ناچیزی دارد حتمی خواهد بود و علیرغم تمام مزایای این نوع بتن، مقاومت و دوام آن به شدت خدشه‌دار خواهد شد. استفاده از سبکدانه اشباع به عنوان یک منبع رطوبت داخلی باعث می‌شود که کاهش رطوبت در منافذ موئین بر اثر فرآیند هیدراتاسیون بلافاصله جبران شده و رشد جمع‌شدگی خودزا و تبعات منفی آن (ترک خوردگی در سنین اولیه) متوقف گردد.

۳- مرور ادبیات فنی

در سال ۱۹۹۱ Philleo [۸] پیشنهاد جایگزینی بخشی از سنگدانه معمولی با سبکدانه ریز اشباع را مطرح کرد و نشان داد که سبکدانه اشباع می‌تواند به عنوان مخزن رطوبت در بتن با نسبت آب به سیمان (W/C) کم توزیع شده و کاهش رطوبت در منافذ موئین خمیر سیمان در فرآیند واکنش شیمیائی هیدراتاسیون را جبران نماید و از رشد کشش موئین در منافذ و جمع‌شدگی خودزا جلوگیری کند. با گذشت چندین سال و گسترش استفاده از بتن توانمند با نسبت (W/C) کمتر از ۰/۴، ترک‌های زودرس در این سازه‌ها مشکل‌آفرین شد. در برخی موارد از جمله درباند فرودگاه دنورمرکزایالت کلرادو- امریکا، حتی علیرغم عمل‌آوری خارجی با آب، پس از ۷ روز ترک مشاهده شد [۱۲]. بالاخره در نیمه دوم دهه ۱۹۹۰ ایده عمل‌آوری داخلی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت و نتایج تحقیقات گسترده‌ای که تاکنون انجام شده است همگی حاکی از مؤثر بودن این روش می‌باشند. مکانیزم عمل‌آوری داخلی توسط Weber و Reinhardt [۱۳] به شرح زیر ارائه شده است:

درطی فرآیند هیدراتاسیون سیمان، یک سیستم منافذ موئین (capillary pores) در خمیر سیمان تشکیل می‌شود. اندازه این منافذ از منافذ سبکدانه کوچک‌تر است و به محض اینکه رطوبت نسبی براثر هیدراتاسیون کاهش یابد یک گرادیان رطوبت به وجود می‌آید. سبکدانه اشباع به عنوان منبع رطوبت عمل کرده و منافذ موئین خمیر سیمان، آب موجود در آن را توسط مکش

Archive of SID

www.SID.ir

موئین (capillary suction) به خود جذب می‌کند. آب مورد نیاز برای هیدراته شدن ذرات سیمان هیدراته نشده فراهم شده و محصولات هیدراتاسیون، منافذ را پر می‌کنند. بدین ترتیب منافذ موئین ریزتر شده و مکش موئین که با مربع شعاع منافذ نسبت معکوس دارد با کاهش اندازه منافذ بیشتر می‌شود، لذا مکش آب از سبکدانه ادامه یافته و خمیر سیمان کمبود رطوبت خود را بدین‌وسیله جبران می‌نماید. هرچه اندازه سبکدانه کوچک‌تر باشد، برای یک حجم معین، توزیع آن در خمیر سیمان با فراوانی بیشتری همراه بوده و دسترسی منافذ موئین به آب مورد نیاز آسان‌تر می‌گردد. بنابراین سبکدانه ریز برای این منظور مناسب‌تر است. Hoff [۹] در سال ۲۰۰۲ گزارشی از نتایج طرح‌هائی که در کشورهای مختلف اروپائی، ژاپن، خاورمیانه و آمریکا پیرامون عمل‌آوری داخلی توسط سبکدانه اشباع انجام شده است را ارائه کرد. درسال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲، Jensen و Hansen [۱۱،۱۰] و در سال ۲۰۰۶، Lura و همکاران [۱۴] روش‌های آزمایش و مواد مختلف قابل استفاده در عمل‌آوری داخلی را مورد بحث و بررسی قرار دادند. علاوه برسبکدانه اشباع، مواد پلیمری با قابلیت جذب آب زیاد به نام SAP (Super Absorbent Polymer) توسط این محققین مورد آزمایش قرارگرفته است. کاربرد این نوع مواد که تا چندین برابر وزن خود آب جذب می‌کنند، در کشاورزی و برخی امور بهداشتی مثل پوشک بچه‌ها رایج می‌باشند. این مواد در بتن با کاربری عمل آوری داخلی مورد استفاده قرارگرفته و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است [۱۱]. گزارش کاملی ازمرزهای دانش روش‌های عمل‌آوری داخلی توسط کمیته فنی TC196-ICC RILEM منتشر شده است.

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات مواد و مصالح

از سیمان پرتلند نوع I-۴۲۵ با چگالی ۳/۱۵ و میکروسیلیس با چگالی ۱/۹ به عنوان مواد سیمانی و از پودر کوارتز میکرونیزه با چگالی ۲/۶۵ و اندازه ذرات ریزتر از سیمان به عنوان فیلر استفاده شد. مشخصات شیمیائی و فیزیکی سیمان در جدول (۱) و چگالی و ظرفیت جذب آب سنگدانه‌های ریز و درشت معمولی و سبک در جدول (۲) نشان داده شده است. سبکدانه اشباع با سطح خشک از طریق خیس کردن مقدار مورد نیازآن در آب به مدت زمان ۲۴ ساعت و سپس قراردادن آنها در مجاورت هوا و در محیط آزمایشگاه به مدت زمان ۲ ساعت تهیه شد. نمودار شکل (۱) منحنی توزیع اندازه سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلیک با۴۰ درصد مواد جامد و چگالی ۱/۰۷ استفاده گردید.

جدول ۱- خواص شیمیائی، فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند نوع I -۴۲۵

اجزاء	C_3A	C_2S	C_3S	SO_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد	۴/۰۱	۱۶/۴۱	۵۴/۰۲	۲/۰۳	۶۰/۱۵	۴/۲۵	۴/۰۸	۴/۱۲	۱۹/۹۴

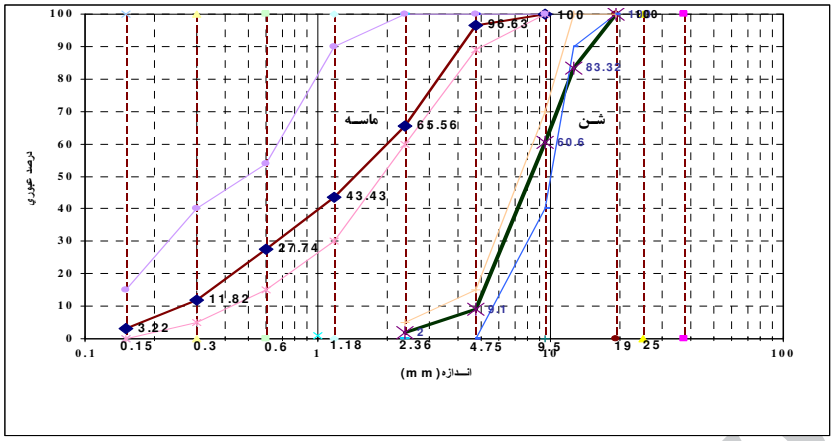
سطح مخصوص (cm^2/g)	L.O.I. (٪)	انبساط در اتوکلاو (٪)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش نهائی (ساعت)	مقاومت فشاری ۲۸روزه (Kg/cm^2)
۳۱۰۴	۴/۱۰	۰/۲۸	۸۵	۳:۳۹	۴۲۵

جدول ۲- ظرفیت جذب آب و چگالی سنگدانه‌های معمولی و سبک

نوع سنگدانه و اندازه آن	چگالی اشباع با سطح خشک	ظرفیت جذب آب (درصد)
ماسه معمولی، ۴/۷۵-۰ میلیمتر، مدول نرمی ۳/۱۷	۲/۵۹	۳/۲۴
شن معمولی، ۱۲/۵-۴/۷۵ میلیمتر	۲/۵۸	۱/۹۷
ماسه سبک (لیکای ۶۵۰)، ۴/۷۵-۲/۳۶ میلیمتر	۱/۳	۱۴/۳
شن سبک (لیکای ۶۵۰)، ۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر	۱/۰۴	۱۱/۷

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- نمودار توزیع اندازه ریزدانه و درشت دانه معمولی با محدوده استاندارد ۳۰۲ ایران

۴-۲- طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های بتن تازه

جدول (۳) نسبت‌های طرح اختلاط بتن خود متراکم کنترل (بدون سبکدانه) و بتن خود متراکم عمل‌آوری شده داخلی را نشان می‌دهد. آزمایش‌های کارائی شامل قطر جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L انجام شد. پس از اطمینان از رضایت‌بخش بودن شرایط خود تراکمی و عدم جداشدگی دانه‌ها در بتن تازه، نمونه‌های آزمایشگاهی جهت تعیین جمع‌شدگی خودزا در ۲۴ ساعت اول و جمع‌شدگی خودزا و ناشی ازخشک‌شدن پس از آن و مقاومت فشاری قالب‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های کارآئی بتن تازه در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۳- طرح اختلاط بتن خود متراکم و خود متراکم عمل آوری شده داخلی با w/c= 0.36

شناسه طرح / مصالح Kg/cm^3	36LWA00 ٪۰۰ دانه سبک	36LWG30 ٪۳۰ شن سبک	36LWG40 ٪۴۰ شن سبک	36LWS30 ٪۳۰ ماسه سبک	36LWS40 ٪۴۰ ماسه سبک
سیمان	۴۵۱/۷۱	۴۵۲/۴۱	۴۵۲/۴۱	۴۵۳/۱۲	۴۵۳/۱۲
دوده سیلیس	۶۴/۵۳	۶۴/۶۳	۶۴/۶۳	۶۴/۷۳	۶۴/۷۳
پودر سنگ کوارتز	۱۲۹/۰۶	۱۲۹/۰۶	۱۲۹/۰۶	۱۲۹/۴۶	۱۲۹/۴۶
آب	۱۵۲/۶۱	۱۵۳/۸۲	۱۵۳/۸۲	۱۵۵/۰۳	۱۵۵/۰۳
فوق روان کننده	۹/۶۸	۸/۰۸	۸/۰۸	۶/۴۷	۶/۴۷
ماسه معمولی	۸۳۹/۱۶	۸۳۹/۱۶	۸۳۹/۱۶	۵۸۷/۴۱	۵۰۳/۵
شن معمولی	۷۲۲/۴	۵۰۵/۶۸	۴۳۳/۴۴	۷۲۲/۴	۷۲۲/۴
ماسه لیکای اشباع	۰	۰	۰	۱۲۶/۳۶	۱۶۸/۴۸
شن لیکای اشباع	۰	۸۷/۳۶	۱۱۶/۴۸	۰	۰

جدول ۴- خصوصیات کارآئی بتن خود متراکم تازه

شناسه طرح / آزمایش	36LWA00	36LWG30	36LWG40	36LWS30	36LWS40
وزن مخصوص (Kg/m^3)	۲۳۸۲	۲۲۳۸	۲۲۱۲	۲۲۰۷	۲۱۵۲
قطر جریان اسلامپ (mm)	۷۷۵	۷۲۰	۶۵۰	۶۶۵	۶۳۰
زمان قطر جریان اسلامپ 50cm (Sec)	۲/۵	۱/۵	۲	۳/۵	۲/۸
زمان قیف V (Sec)	۵	۵/۲	۶/۵	۶	۴
زمان قیف V پس از ۵ دقیقه (Sec)	۱۰	۷	۸	۱۱	۵
جعبه L (نسبت H_2/H_1)	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷

Archive of SID
www.SID.ir

۴-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مطابق استاندارد EN12390 با استفاده از نمونه‌ای مکعبی به ضلع ۱۰۰ میلی‌تر بدست آمد. بعد از باز کردن قالب‌ها در سن یک روزه، نمونه‌ها در آب ۲۳ درجه سانتیگراد تا زمان آزمایش عمل‌وری شدند. نتایج (میانگین ۳ نمونه) در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

۴-۴- جمع‌شدگی خودزا در ۲۴ ساعت اول

باتوجه به این که جمع‌شدگی خودزا در بتن توانمند خود متراکم همزمان با شروع فرآیند هیدراتاسیون آغاز می‌شود و بیشترین مقدار آن در ۲۴ ساعت اول عمر بتن رخ می‌دهد، اندازه‌گیری آن باید بلافاصله پس از قالب‌گیری یا حداکثر پس از زمان گیرش اولیه شروع شود. برای این منظور از تکنیک لیزر استفاده شد. قالب مورد استفاده به شکل مخروط با ارتفاع ۱۲۹ میلی‌متر و قطر قاعده ۱۴۹ میلی‌متر می‌باشد. یک صفحه مربع کوچک و سبک با پوشش فلز براق در مرکز قاعده مخروط روی بتن قرارگرفت و با کمی فشار در بتن جای داده شد. اشعه لیزر که در راستای قائم و از بالا به آن تابانده می‌شود توسط سطح براق صفحه منعکس شده و هرگونه تغییر ارتفاع در نمونه بتن به صورت تغییر طول لیزر در فواصل زمانی مشخص توسط دستگاه به‌ثبت می‌رسد. شکل مخروطی نمونه آزمایشگاهی این خصوصیت منحصر به فرد را دارد که هرگونه تغییر در حجم نمونه، رابطه مستقیم با تغییر ارتفاع آن دارد به طوری که همواره رابطه $v'/v = (h'/h)^3$ برقرار بوده و v و h به ترتیب حجم و ارتفاع نمونه قبل ازجمع شدن و'v و 'h مقادیر مربوطه بعداز جمع شدن می‌باشند در حالی که این رابطه برای نمونه‌های استوانه‌ای یا منشوری صادق نمی‌باشد. جهت کاهش اصطکاک ناشی از چسبندگی بتن و جداره قالب، یک لایه پلاستیک نازک به شکل مخروط که با بریدن گوشه مثلثی یک پاکت فریزر تهیه شده بود به راحتی در داخل قالب قرار داده شد و سپس قالب با بتن پرگردید. تصویر دستگاه و نمونه مخروطی در شکل (۲) نشان داده شده است. باتوجه به این که هیچگونه اتصال مکانیکی بین بتن و ابزار اندازه‌گیری تغییر طول نمونه وجود ندارد، می‌توان آزمایش را بلافاصله پس از ریختن بتن در قالب شروع کرد. آزمایش‌ها در اتاقی انجام شدند که دمای آن در حدود ۲۳ درجه سانتیگراد (با نوسان ۱ درجه) تحت کنترل بود و رطوبت نسبی آن حدود ۴۸ درصد (با نوسان ۳ درصد) ثبت شده است. نمودار دما و رطوبت نسبی اتاق هنگام آزمایش بتن خود متراکم کنترل به عنوان نمونه به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.

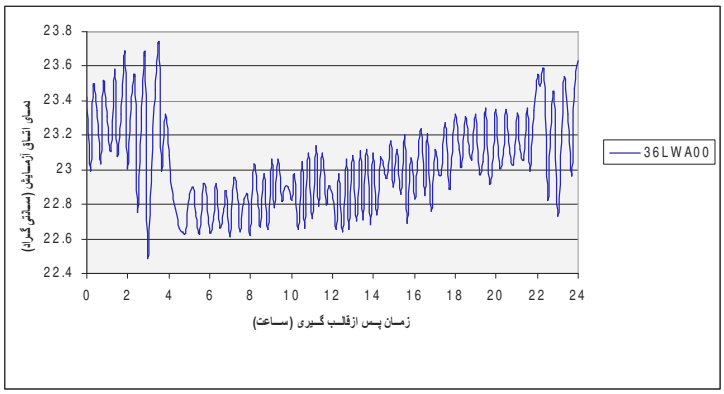
جدول ۵- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰۰ میلی‌متر (میانگین ۳ نمونه عمل‌آوری شده در آب)

شناسه / مقاومت	36LWA00	36LWG30	36LWG40	36LWS30	36LWS40
۷ روزه (MPa)	۶۳ (کنترل)	۶۱/۷ (۲٪ کاهش)	۵۲/۵ (۱۶٪ کاهش)	۵۴ (۱۴٪ کاهش)	۴۸/۲ (۲۳٪ کاهش)
۲۸ روزه (MPa)	۱۰۲ (کنترل)	۸۸/۳ (۱۳٪ کاهش)	۷۳/۳ (۲۸٪ کاهش)	۶۳/۴ (۳۸٪ کاهش)	۶۴/۲ (۳۷٪ کاهش)

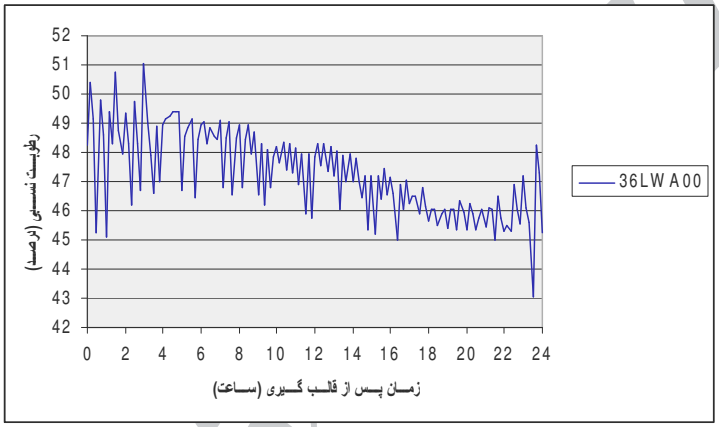
شکل ۲- تصویر دستگاه اندازه‌گیری جمع‌شدگی توسط لیزر و نمونه مخروطی شکل

Archive of SID

www.SID.ir

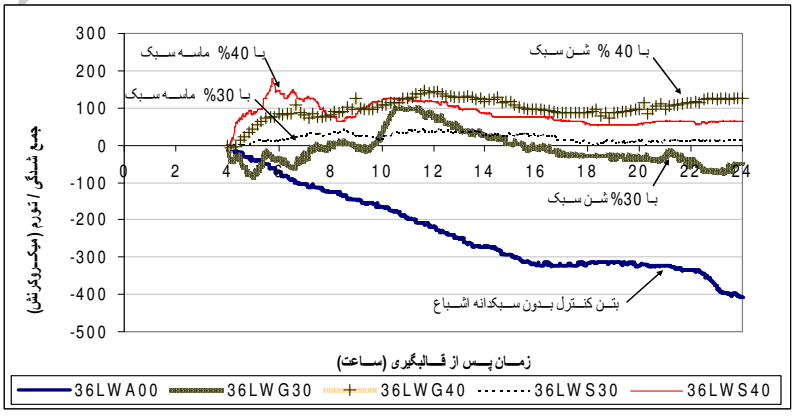


شکل ۳- نمودار دمای اتاق در زمان آزمایش جمع‌شدگی بتن خود متراکم (کنترل)



شکل ۴- نمودار رطوبت نسبی اتاق در زمان آزمایش جمع شدگی بتن خود متراکم (کنترل)

باتوجه به کوچک بودن اندازه قالب، افزایش دمای بتن بر اثر فرآیند هیدراتاسیون ناچیز بود لذا از تأثیر آن در اصلاح نمودار جمع‌شدگی صرف‌نظر شد. جهت جلوگیری ازتبادل رطوبت بتن و محیط آزمایش از ترکیبات عمل‌آوری غشائی که روی سطح نمایان بتن پاشیده می‌شد استفاده گردید. نتایج آزمایش در نمودار شکل (۵) نشان داده شده است. برای حذف تأثیر آب انداختن و نشست پلاستیک در ساعات اولیه برروی جمع‌شدگی بتن، مقادیر ثبت شده در ۴ ساعت اول، از منحنی مربوطه حذف گردیدند.

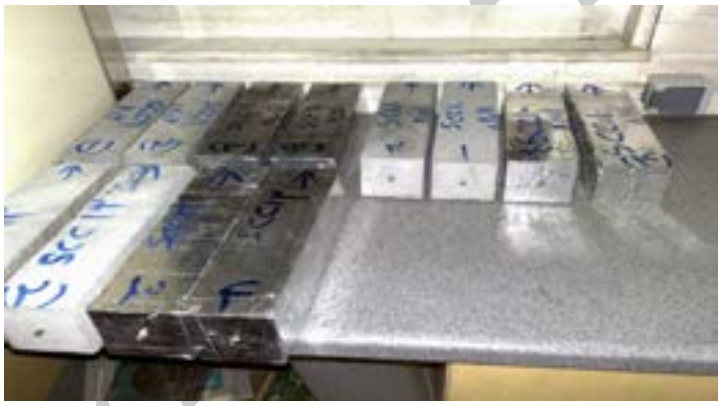


شکل ۵- نمودار جمع شدگی/تورم خودزا در ۲۴ ساعت اول عمر بتن خود متراکم و خودمتراکم عمل‌آوری شده داخلی

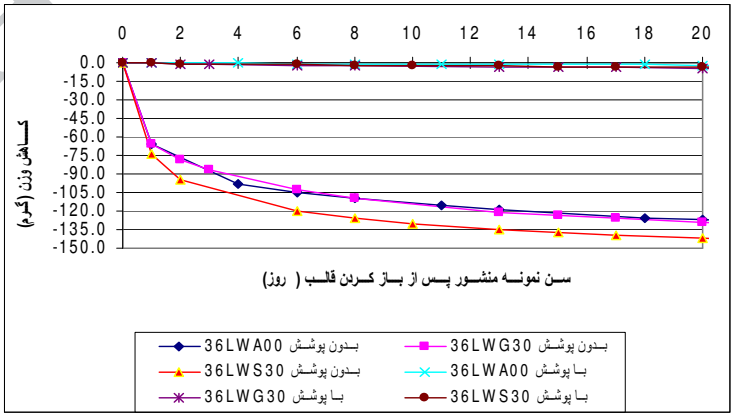
Archive of SID
www.SID.ir

۴-۵- جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن پس از ۲۴ ساعت اول

جهت بررسی جمع‌شدگی خودزا و جمشدگی ناشی از خشک شدن پس ازیک روز، ازنمونه‌های منشوری به ابعاد ۲۸/۵× ۷/۵ × ۷/۵ سانتیمتر (مطابق استاندارد ASTM C157) استفاده شد. فقط مخلوط کنترل،۳۰ درصد جایگزینی سبکدانه ریز و۳۰ درصد جایگزینی سبکدانه درشت مورد بررسی قرار گرفتند. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها (۴ نمونه برای هر مخلوط) به مدت ۲۴ ساعت در درون قالب‌ها و با پوشش گونی خیس و پلاستیک در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب‌ها، دو نمونه از آنها جهت اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزا با نوار آلومینیوم چسب‌دار کاملاً پوشانده شدند به طوری که امکان تبادل رطوبت بتن با محیط اطراف وجود نداشته باشد و دو نمونه دیگر جهت اندازه‌گیری جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بدون پوشش باقی ماندند. تصویر نمونه‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. سپس نمونه‌ها به اتاق آزمایش با دما و رطوبت نسبی تحت کنترل منتقل شده و تغییرات وزن و طول آنها به مدت ۲۰ روز ثبت گردید. هریک ازمخلوطها به فاصله یک هفته ساخته شد. متأسفانه سه هفته پس‌از ساخت مخلوطها، کنترل دستگاه تنظیم کننده دمای اتاق آزمایش با مشکل مواجه شد و از آن به بعد تغییرات دما و رطوبت اتاق قابل ملاحظه بود در نتیجه یک نوسان در نمودارهای جمع‌شدگی نمونه‌های منشوری مشاهده می‌شود که قابل استناد نیستند. با توجه به اینکه مشخص شد آزمایش جمع‌شدگی نسبت به دما و رطوبت اتاق بسیار حساس است لذا فقط مقادیر اندازه‌گیری شده در دمای تحت کنترل نشان داده شده است. شکل (۷) تغییر رطوبت نمونه‌ها و شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب نمودار جمع‌شدگی خودزا و ناشی از خشک شدن از سن یک روزه تا ۲۱ روزه را نشان می‌دهند.

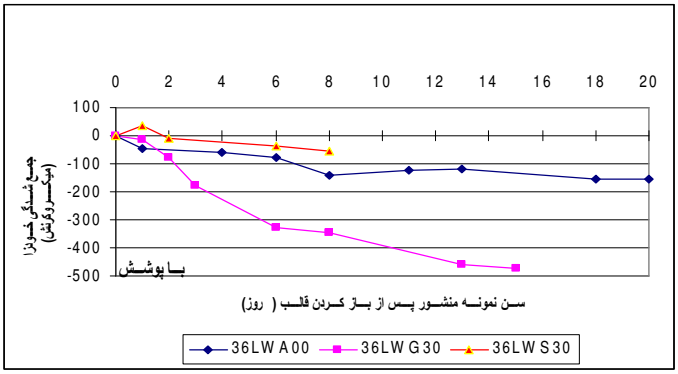


شکل ۶- تصویر نمونه‌های منشوری جمع شدگی با پوشش آلومینیوم و بدون پوشش

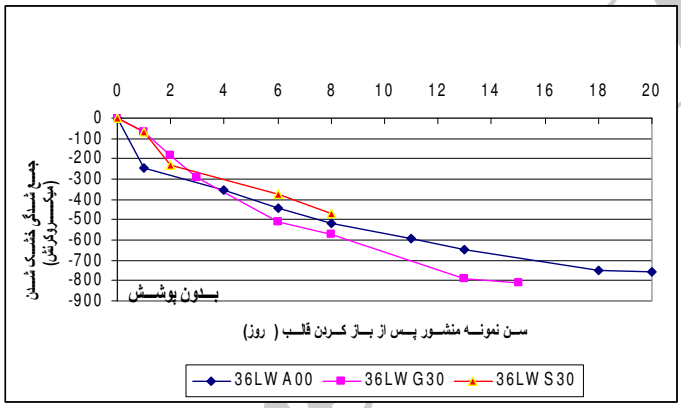


شکل ۷- نمودار کاهش وزن نمونه‌های منشوری جمع‌شدگی بر اثر تبخیر از زمان بازکردن قالب‌ها تا ۲۰ روز بعد

www.SID.ir



شکل ۸– نمودار جمع‌شدگی خودزای نمونه‌های منشوری با پوشش آلومینیوم از زمان باز کردن قالب‌ها تا ۲۰ روز بعد



شکل ۹– نمودار جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن نمونه‌های منشوری بدون پوشش از زمان باز کردن قالب‌ها تا ۲۰ روز بعد

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- خصوصیات بتن تازه

باتوجه به نتایج آزمایش بتن تازه، نشان داده شده در جدول (۴)، می‌توان گفت که شرایط خود تراکمی برای کلیه مخلوط‌ها برقرار بوده است. البته مقادیر قطر جریان اسلامپ و نسبت ارتفاع بتن در انتها و ابتدای بخش افقی جعبه L در بتن حاوی سبکدانه، کمتراز بتن کنترل می‌باشد. ممکن است این مقادیر به وزن مخصوص بتن وابسته باشند چون هرچه بتن سبک‌تر شود نیروی رانش کمتر و در نتیجه حرکت بتن تحت تأثیر نیروی وزن خود کمتر خواهد بود.

۵-۲- مقاومت فشاری

هرچند که ازنظر تئوریکی، وجود رطوبت در سبکدانه‌های جایگزین شده و انتشار آن به خمیر سیمان امکان افزایش درجه هیدراتاسیون را فراهم می‌کند و باید مقاومت فشاری با عمل‌آوری داخلی بهبود یابد ولیکن در بتن مقاومت بالا، استحکام سبکدانه‌ها، کنترل کننده مقاومت است. هرچند دراین تحقیق از سبکدانه لیکای سازه‌ای (Leca 650) استفاده شده ولی برای بتن رده ۱۰۰ مگاپاسکال، دانه‌های جاذب آب مقاوم‌تر لازم است. Suzuki و همکاران [۱۵] جهت عمل‌آوری داخلی بتن توانمند مقاومت بالا با نسبت آب به پودر ۰/۱۵ از دانه‌های سرامیکی دارای ظرفیت جذب آب ۳۱٪ استفاده کردند و موفق شدند با افزایش ۲۰ درصدی مقاومت فشاری بتن کنترل، به مقاومت ۲۸ روزه ۱۵۸ مگاپاسکال دست یابند. دراین تحقیق مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خود متراکم با ۳۰ درصد حجمی جایگزینی درشت دانه معمولی با لیکای اشباع هم‌اندازه آن فقط ۲٪ نسبت به بتن کنترل کاهش نشان می‌دهد (از ۶۳ به ۶۱/۷ مگاپاسکال). در حالی که مقدار کاهش مقاومت ۲۸ روزه همین بتن نسبت به بتن کنترل ۱۳/۴٪ می‌باشد (از ۱۰۲ به ۸۸/۳ مگاپاسکال). با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه از ۳۰ به ۴۰ درصد حجمی، مقدار کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به بتن کنترل به ترتیب ۱۶/۷ و ۲۸ درصد می‌باشد. لذا هرچه مقدار سبکدانه بیشتر باشد کاهش مقاومت بیشتر می‌شود ولیکن برای حذف

Archive of SID

www.SID.ir

جمع‌شدگی خودزا باید به‌حد کافی مخزن آب درونی وجود داشته باشد. اکثر محققین مقدار مناسب جایگزینی را بین ۲۵ تا ۳۰ درصد پیشنهاد نموده‌اند [۱۰، ۱۸ و ۱۹]. کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ماسه لیکا چشمگیرتر بود.

۵-۳- جمع‌شدگی خودزا در ۲۴ ساعت اول

نمودار شکل (۵) بیانگرآن است که جمع‌شدگی خودزا در بتن کنترل در ساعات اولیه پس از گیرش به سرعت رشد می‌کند و مقدار آن در ۲۴ ساعت اول که هنوز نمونه بتنی در قالب قرار دارد قابل ملاحظه می‌باشد. لذا در صورتی که اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزای بتن خود متراکم مقاومت بالا پس از بازکردن قالب در سن یک روزه شروع شود می‌توان گفت که مقدار قابل توجهی ازآن درنظر گرفته نشده و نتایج به دست آمده گمراه کننده خواهند بود. این موضوع بیانگر اهمیت و لزوم انجام عمل‌آوری مناسب بتن خود متراکم پرمقاومت بلافاصله پس‌از بتن‌ریزی است، درغیر این صورت ممکن است ترک‌های جمع‌شدگی در بتن جوان ظاهر شوند. جلوگیری از تبخیر رطوبت که ممکن است در بتن معمولی روش مناسبی باشد، در بتن مقاومت بالا مناسب نیست مگر این‌که با عمل‌آوری داخلی همراه باشد. همان طوری که در شکل (۵) مشخص است، تعویض۳۰ درصد حجمی سنگدانه معمولی با سبکدانه لیکای اشباع می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای جمع‌شدگی خودزا را کاهش دهد و تقریباً به صفر برساند. با افزایش این جایگزینی به ۴۰ درصد نه‌تنها جمع‌شدگی وجود نخواهد داشت بلکه شاهد تورم نیز خواهیم بود. برخلاف نتایج مقاومت فشاری، نتایج آزمایش جمع‌شدگی نشان می‌دهد که ماسه سبک در مقایسه با شن سبک، بهتر عمل می‌کند. این اختلاف عملکرد در۳۰ درصد جایگزینی، بیشتر از ۴۰ درصد جایگزینی نمایان است. در ۴۰ درصد جایگزینی، رفتار (تغییر حجم) نمونه‌های حاوی شن و ماسه سبک، مشابه است و در پایان ۲۴ ساعت اول تورم هر دو حدود ۱۰۰ میکروکرنش است. درحالی که برای ۳۰ درصد جایگزینی، نمونه حاوی شن سبک تا ۱۱ ساعت اول، تورم ۱۰۰ میکروکرنش را نشان می‌دهد و سپس جمع‌شدگی آن شروع شده و درپایان ۲۴ ساعت، مقدار جمع‌شدگی آن به ۵۰ میکروکرنش می‌رسد. اما نمونه حاوی ۳۰ درصد ماسه‌ی لیکا از ابتدا تا پایان ۲۴ ساعت اول کمی تورم (حدود ۲۰ تا ۵۰ میکروکرنش) نشان می‌دهد. درهر صورت نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در بتن خود متراکم پرمقاومت، مواد عمل‌آوری غشاساز نباید به تنهائی مورد استفاده قرارگیرد اما چنانچه منابع داخلی تأمین رطوبت مورد نیاز (مانند سبکدانه اشباع) جهت جبران خود خشک شدگی فراهم باشد، استفاده از مواد غشاساز در جلوگیری از رشد جمع‌شدگی بسیار مؤثرخواهد بود.

۵-۴- کاهش وزن، جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن پس از ۲۴ ساعت اول

برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزا، باید از تبادل رطوبت نمونه‌ها با محیط اطراف جلوگیری شود. با توجه به این که نمونه‌های جمع‌شدگی خودزا دارای پوشش آلومینیوم بودند، تبخیر رطوبت آنها ناچیز بود. پس از ۲۰ روز نمونه حاوی شن لیکا ۴/۳ گرم، نمونه حاوی ماسه لیکا ۳/۵ گرم و نمونه بدون سبکدانه ۱/۸ گرم کاهش وزن داشتند، در حالی که این مقادیر در نمونه‌های بدون پوشش به ترتیب برابر ۱۲۹، ۱۴۲ و ۱۲۷/۴ گرم مشاهده شد. مقادیر فوق برحسب درصد وزن نمونه پس از باز کردن قالب‌ها به ترتیب برابر ۰/۱۱٪ ، ۰/۰۹٪ و ۰/۰۴٪ برای نمونه‌های پوشش‌دار و ۳/۴٪، ۳/۹٪ و ۳/۲٪ برای نمونه‌های بدون پوشش می‌باشند. همانطوری که در شکل (۷) نشان داده شده است بخش قابل ملاحظه کاهش وزن در همان روزهای اول خشک شدن اتفاق می‌افتد به طوری که ۸۵ درصد کاهش وزن در مدت ۲۰ روز مربوط به تبخیر در هفته اول است لذا عمل‌آوری مناسب و جلوگیری از تبخیر رطوبت بتن در سنین اولیه حائز اهمیت می‌باشد. نتایج نشان داده شده در نمودار شکل (۸) حاکی ازآن است که جمع‌شدگی خودزا در نمونه کنترل (بدون سبکدانه و با پوشش آلومینیوم) از زمان باز کردن قالب تا روز هشتم به میزان ۱۴۵ میکرو کرنش رشد می‌کند و سپس تا روز بیستم تغییر محسوسی در آن مشاهده نمی‌شود. جایگزینی ۳۰ درصد حجمی ماسه معمولی با ماسه سبک اشباع باعث کاهش ۶۵ درصدی این مقدار شد. در حقیقت یک روز بعد از بازکردن قالب مقداری تورم مشاهده می‌شود و سپس تا ۸ روز، جمع‌شدگی آن به ۵۰ میکرو کرنش می‌رسد. اما جمع‌شدگی خودزا در نمونه حاوی ۳۰ درصد شن سبک اشباع، پس از بازکردن قالب رشد می‌کند و در روز هشتم جمع‌شدگی آن برابر۳۵۰ میکروکرنش است که حدود ۲۰۰ میکرو کرنش بیشتر از جمع‌شدگی بتن کنترل است. البته با درنظر گرفتن جمع‌شدگی ۲۴ ساعت اول، مقدار جمع‌شدگی بتن کنترل بیشتر می‌شود. در این تحقیق چگالی ماسه سبک از چگالی شن سبک بیشتر است لذا وزن ریزدانه سبک جایگزین شده از وزن درشت دانه سبک هم حجم آن بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه ظرفیت

Archive of SID

www.SID.ir

جذب آب ریزدانه ازدرشت دانه سبک مورد استفاده بیشتر است و برحسب درصدی از وزن و نه حجم سبکدانه بیان می‌شود، مقدار آب عمل‌آوری موجود در نمونه‌های حاوی ریزدانه سبک بیشتر از نمونه‌های حاوی همان حجم درشت‌دانه سبک می‌باشد. همچنین در نمونه‌های حاوی ریزدانه سبک، خمیر سیمان با تعداد بیشتری ازدانه‌های ریز اشباع همجوار است. بنابراین عملکرد سبک‌دانه ریز در کاهش جمع‌شدگی بهتر از سبک‌دانه درشت می‌باشد. با توجه به اینکه جمع‌شدگی خودزا در بتن کنترل قابل ملاحظه است، پوشش‌های عایق رطوبتی مثل مواد عمل‌آوری غشائی که در بتن معمولی مجاز می‌باشد برای عمل‌آوری این نوع بتن مناسب نیست مگر این که با عمل‌آوری داخلی همراه باشد. جمع‌شدگی درنمونه‌هائی که بدون پوشش در معرض خشک شدن قرار گرفتند با روندی مشابه و به طور قابل ملاحظه رشد کرد. پس از ۸ روز، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بتن کنترل حدود ۵۰۰ میکروکرنش شد (۳/۴ برابر جمع‌شدگی خودزا) در حالی که جمع‌شدگی نمونه حاوی ماسه سبک اشباع، ۵۰ میکروکرنش کمتر و جمع‌شدگی نمونه حاوی شن سبک اشباع ۵۰ میکروکرنش بیشتر از این مقدارگردید. برخلاف جمع‌شدگی خودزا که پس از ۸ روز، رشد قابل ملاحظه‌ای نداشت جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن درروزهای بعد نیزرشد نمود و پس از۲۰ روز مقدارآن دربتن کنترل به ۷۵۰ میکروکرنش رسید.

۶- جمع‌بندی

در این تحقیق تأثیر عمل‌آوری داخلی توسط سبکدانه لیکای اشباع برمقاومت فشاری، جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن خود متراکم حاوی دوده سیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۶ (آب به مواد سیمانی ۰/۳) بررسی شد. با استفاده از تکنیک لیزر و یک قالب مخروطی شکل امکان اندازه‌گیری جمع‌شدگی با حداقل اصطکاک بین بتن و قالب بلافاصله بعد از این که بتن در قالب ریخته شد (نیم ساعت پس از تماس آب و سیمان) فراهم گردید. جمع‌شدگی خودزا در ۲۴ ساعت اول عمر این نوع بتن قابل ملاحظه بود. بنابراین استفاده از مواد عمل‌آوری غشاساز که ممکن است برای بتن معمولی مناسب باشد برای این نوع بتن مناسب نیست مگر اینکه با عمل‌آوری داخلی همراه باشد. با جایگزین کردن بخشی از سنگدانه معمولی با سبکدانه لیکای اشباع، این جمع‌شدگی حذف شد. با توجه به قابل ملاحظه بودن جمع‌شدگی خودزا در۲۴ ساعت اول عمر این نوع بتن، نمی‌توان ازآن صرف نظرکرد و جمع‌شدگی کل در هر زمان باید شامل این مقدار نیز بشود. توصیه می‌شود اندازه و شکل قالب و روش و ابزار اندازه‌گیری جمع‌شدگی قبل و بعد از ۲۴ ساعت اول یکسان باشند. در یک حجم مساوی، دانه‌های ریز مورد استفاده در این تحقیق، آب بیشتری را نسبت به دانه‌های درشت‌تر به داخل بتن حمل کردند (به علت ظرفیت جذب آب بیشتر). درضمن همجواری دانه‌های ریز با خمیر سیمان بیشتراست (در مقایسه با دانه‌های درشت)، لذا عملکرد ریزدانه‌ها درکاهش جمع‌شدگی خودزا بهتر از دانه‌های درشت بود. جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن چندین برابر جمع‌شدگی خودزا بود و دانه های سبک اشباع قادر به جلوگیری ازجمع‌شدگی ناشی از خشک شدن نبودند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن کنترل برابر ۱۰۲ مگا پاسکال به دست آمد و با جایگزینی بخشی از سنگدانه معمولی با سبکدانه اشباع، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مقاومت بتن کنترل، بین ۱۳ تا ۳۸ درصد کاهش یافت. برای جلوگیری از تأثیر منفی سبکدانه در مقاومت فشاری، دانه‌های جاذب آب با مقاومت بالاتر مورد نیاز می‌باشد.

۷- قدردانی

از پرسنل محترم بخش بتن مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که در فراهم نمودن امکانات مورد نیاز برای انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

[1] Aitcin, P.C., "High Performance Concrete", E&FN Spon, London, 1998, 683p.
[2] Neville, A.M., "Concrete past and present", CONCRETE, April 2005.
[3] Morin, Haddad, Aitcin, "Crack-free High Performance Concrete Structures", Concrete International, 2002, 43-48.
[4] Shah, S.P., Weiss, W.J., Yang, W., "Shrinkage Cracking- Can it be prevented?", Concrete International, 1998, 20(4), 31-37.
[5] Okamura, H., "Self Compacting High Performance Concrete", Concrete International, 1997, 19(7), 50-54.
[6] Khayat, K.H., "Testing and Performance of Self-Compacting Concrete" ACI Material Journal, 1999, 96(3), 346-353.
[7] Ouchi, M., Nakamura, S., Osterson, T., Hallberg, S., Lwin, M., "Applications of Self Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States", ISHPC, 2003, 2-5.
[8] Philleo, R., "Concrete Science and Reality", Materials Science of Concrete II, Eds: J.P.

Archive of SID
www.SID.ir

Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, 1991, pp 1-8.

[9] Hoff, G.C., "The use of Lightweight Fines for the Internal Curing of Concrete", A report prepared for Northeast Solite Corporation, Aug 20, 2002, pp1-42.

[10] Jensen, O.M., Hansen, F., "Water-entrained Cement-based Materials part I: Principles and Theoretical Background", Cement and Concrete Research, 2001, 31, 647-654.

[11] Jensen, O.M., Hansen, F., "Water-entrained Cement-based Materials part II: Experimental Observations", Cement and Concrete Research, 2002, 32, 973-978.

[12] Holt, E.E., "Early age autogenous shrinkage of concrete", Technical Research Center of Finland (VTT) publication, 2001, P466, http://www.vtt.fi/inf/pdf/

[13] Weber, S., Reinhardt, H.W., "A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing", Advanced Cement Based Materials, 1997, 6(2), 59-68.

[14] Lura, P., Jensen, O.M., Igarashi, S. "Experimental Observation of Internal Water Curing of Concrete", RILEM, Materials and Structures, Jan 2000, pp1-10.

[15] Suzuki, M., Meddah, M.S., Sato, R., "Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 2009, 39, 373–381.

Archive of SID

www.SID.ir