



مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و افت خشک شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره ای تک جزئی

راضیه کدخدایی، کیاچهر پهنرنا*، مرجان شهیدی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

کلمات کلیدی:

بتن سبک
بتن قلیا فعال تک جزئی
متاسیلیکات سدیم
افت خشک شدگی
عمل آوری

خلاصه: در راستای کاهش اثرات زیست محیطی منفی تولید سیمان پرتلند، بتن سبک قلیا فعال سرباره ای می تواند به عنوان یک ماده نوین ساختمانی در صنعت ساخت و ساز مدنظر قرار گیرد. بر اساس بررسی های انجام شده توسط مولفین، اطلاعاتی راجع به میزان افت خشک شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره ای تک جزئی موجود نمی باشد. در این تحقیق تاثیر عیار سرباره، مقدار متاسیلیکات سدیم به عنوان فعال کننده قلیایی و تاثیر کاربرد سبکدانه بر مقاومت و افت خشک شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره ای مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر دو نوع عمل آوری، عمل آوری در آب و عمل آوری در پوشش پلاستیکی، بر خصوصیات این نوع بتن مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساخت بتن سبک از سبکدانه لیکا در ترکیب با سنگدانه های معمولی استفاده شد و دو ترکیب ریزدانه لیکا - شن و ریزدانه لیکا - درشتدانه لیکا بدین منظور استفاده گردید. یک نمونه بتن سبک با سیمان پرتلند و یک نمونه بتن قلیا فعال سرباره ای با سنگدانه های معمولی برای کنترل و مقایسه نیز ساخته شد. مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز و افت خشک شدگی تا سن ۱۸۰ روز اندازه گیری شد. طبق نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، با افزایش عیار سرباره و مقدار متاسیلیکات سدیم، اسلامپ و زمان گیرش کاهش و مقاومت فشاری و افت خشک شدگی این نمونه ها افزایش پیدا کرد. همچنین نتایج نشان می دهد که عمل آوری بتن حاوی سبکدانه در پوشش پلاستیک سبب افزایش افت خشک شدگی و کاهش مقاومت فشاری می شود.

۱- مقدمه

سازه ها، کاهش اثرات زیست محیطی منفی ناشی از تولید سیمان در صنعت ساخت و ساز و بهبود خواص بتن سبک سازه ای مدنظر قرار گیرد [۳]. به اعتقاد بسیاری از محققین چسباننده های قلیا فعال می توانند جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند باشند که علاوه بر خواص مکانیکی بالا [۴ و ۵]، شامل مزیت های مضاعفی چون مقاومت بالا در مقابل اسید [۶ و ۷]، آتش [۸]، یخ و ذوب [۹] و سایش [۱۰] نسبت به بتن های معمولی می باشد. در ساخت این نوع بتن از سرباره تولید آهن به روش ذوب در کوره بلند استفاده می شود و از این بابت حجم زیادی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. سرباره کوره بلند به دلیل داشتن درصد بالای کلسیم عملکردی شبیه به سیمان پرتلند معمولی دارد [۱۱]. در تولید بتن قلیا فعال، فعال کننده های متعارف، دو جزئی هستند که عموماً از ترکیب سدیم هیدروکسید (NaOH) و سدیم سیلیکات ($Na_2O \cdot nSiO_2$)، تهیه می شوند [۱۵-۱۲]. محلول های قلیایی دو جزئی چسبناک، شدیداً قلیایی و غیر کاربر پسند هستند و حمل آن ها نسبت به مواد خشک گران تر می باشد. برای حل مشکلات چسباننده های قلیا فعال دو جزئی، چسباننده های قلیا فعال تک جزئی مطرح شدند که از ترکیب

بتن به دلیل داشتن خصوصیات فنی و ارزنده ای همچون در دسترس بودن مصالح، پایداری در برابر عوامل جوی، تولید راحت و در نهایت ارزان بودن آن، یکی از بهترین و مناسب ترین فرآورده ها در صنعت ساختمان به حساب می آید [۱]. با توجه به پدیده زلزله، نیاز به سبک سازی و کاهش وزن سازه های بتنی امری ضروری بوده و همین امر لزوم استفاده از بتن های سبک را افزایش می دهد. روش های گوناگونی برای سبک کردن بتن و تولید بتن سبک به کار گرفته شده است. استفاده از سنگدانه های سبک در بتن یکی از راهکارهای مناسب جهت تولید بتن سبک می باشد. لیکا دانه رس سبک منبسط شده است که می تواند به عنوان سبکدانه در ساخت بتن سبک مورد استفاده قرار گیرد [۲]. علی رغم حل مشکل وزن بالای بتن توسط بتن های سبک، مقاومت فشاری نسبتاً کم و افت خشک شدگی زیاد بتن های سبک استفاده از این نوع بتن ها را محدود کرده است. بتن سبک قلیا فعال سرباره ای می تواند به عنوان یک راهکار جدید برای کاهش همزمان وزن

* نویسنده عهده دار مکاتبات: kia@iut.ac.ir



یک ماده جامد آلومینوسیلیکاتی و یک منبع قلیایی جامد در ترکیب با آب ساخته می‌شوند. از این رو توسعه چسباننده‌های قلیا فعال تک جزئی گامی مهم در جهت تجاری‌سازی و تولید انبوه این محصول است [۱۶]. بتن قلیا فعال سرباره‌ای تحت تاثیر شرایط عمل‌آوری مختلف و با توجه به مدت زمان عمل‌آوری می‌تواند خصوصیات و رفتار متفاوتی داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان عمل‌آوری در آب و همچنین عمل‌آوری در دمای افزایش یافته می‌تواند مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای را افزایش دهد [۱۷].

هر چند تولید چسباننده‌های قلیا فعال می‌تواند منجر به کاهش ۲۵ الی ۵۰ درصدی تولید گاز CO₂ شود [۱۹ و ۱۸]، اما نگرانی از عدم شناخت ویژگی‌های طولانی مدت این نوع بتن‌ها مانند، افت (جمع‌شدگی) و ترک‌های ناشی از آن و به طور کلی بی‌ثباتی در حجم از موانع اجرایی و استفاده گسترده از بتن‌های قلیا فعال است [۲۱ و ۲۰]. افت خشک‌شدگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای وابسته به زمان در بتن سبک است. نتایج و تحقیقات نشان می‌دهند که به طور کلی افت بتن سبک به دلیل کم بودن مدول الاستیسیته سبکدانه و بتن، بیشتر از بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های معمولی است. اما بتن‌های سبک مختلف، درصد افت خشک‌شدگی متفاوتی را از خود نشان داده‌اند [۳]. برای کاهش افت خشک‌شدگی و ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی می‌توان از روش‌هایی همچون عمل‌آوری داخلی به هنگام ساخت بتن استفاده نمود. هدف از عمل‌آوری داخلی تامین آب مورد نیاز بتن برای انجام واکنش هیدراسیون است که به دلیل تبخیر و یا افت خود به خودی از بتن خارج شده است. فرآیند عمل‌آوری داخلی را می‌توان توسط پیش‌اشباع کردن سبکدانه‌های متخلخل به منظور حفظ رطوبت نسبی بتن انجام داد. افت بتن قلیا فعال تحت تاثیر نوع و مقدار ماده آلومینوسیلیکاتی، نوع و دوز فعال‌کننده قلیایی و همچنین شرایط عمل‌آوری قرار دارد [۲۲].

بهرنیا و رستمی در تحقیقات خود نشان دادند که نسبت محلول قلیایی به سرباره تاثیر مستقیمی بر خصوصیات بتن قلیا فعال سرباره‌ای دو جزئی دارد [۲۲]. افزایش بیش از حد مدول سیلیکات و غلظت فعال‌کننده بر مقاومت فشاری تاثیر منفی خواهد داشت. تقوایی و همکاران در تحقیقات خود مقدار بهینه غلظت ۵/۵٪ و مدول سیلیکات ۰/۸۵ در فعال‌کننده دو جزئی را برای جلوگیری از گیرش سریع، کاهش مقاومت و افت خشک‌شدگی زیاد اعلام کردند [۲۳]. نتو و همکاران تاثیر فعال‌کننده‌های مختلف بر افت خشک‌شدگی و خود به خودی را بررسی کردند. در این تحقیق مدول سیلیکات (Na₂O/SiO₂) ثابت و برابر ۱/۷ و نسبت جرمی سرباره به Na₂O برابر ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ درصد در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج به

دست آمده، با افزایش مقادیر SiO₂ و Na₂O افت خشک‌شدگی در مقایسه با افت خود به خودی افزایش بیشتری داشته است اما به طور کلی افت بتن افزایش می‌یابد [۲۴]. خصوصیات بتن قلیا فعال سرباره‌ای تحت تاثیر شرایط عمل‌آوری از جمله دما و رطوبت نسبی می‌باشد [۲۴ و ۱۱]. طبق تحقیقات مینهو و همکاران، نمونه‌هایی که در طول تابستان در معرض هوای گرم و خشک قرار گرفتند، به دلیل افزایش تبخیر آب، مقاومت فشاری نمونه‌ها بسیار کاهش پیدا کرد و افت خشک‌شدگی افزایش یافت. با توجه به نتایج XRD این نمونه‌ها، ترک‌های ناشی از افت خشک‌شدگی دلیل اصلی کاهش مقاومت گزارش شده است [۲۵]. محبی و همکاران نیز در بررسی بتن قلیا فعال سرباره‌ای تحت عمل‌آوری‌های مختلف اعلام کردند که عمل‌آوری حرارتی باعث افزایش مقاومت و تسریع روند کسب مقاومت نهایی بتن قلیا فعال سرباره‌ای می‌شود. همچنین مطابق نتایج عمل‌آوری در دماهای بالاتر ۶۰ الی ۹۵ درجه سلسیوس سبب کاهش روند کسب مقاومت می‌شود [۱۰]. مدت زمان عمل‌آوری حرارتی نیز بر مقاومت فشاری تاثیرگذار است. افزایش مدت زمان عمل‌آوری حرارتی می‌تواند سبب کاهش عملکرد بتن قلیا فعال شود. نتایج آزمایش‌های کوماراول [۲۶]، نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده تحت حرارت نسب به عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه بیش‌تر است و مقدار بهینه مقاومت فشاری در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دست آمده است. اما نتایج دیگری نشان می‌دهد که عمل‌آوری حرارتی به دلیل کاهش آب آزاد در واکنش شیمیایی سرباره می‌تواند سبب بهبود افت در بتن قلیا فعال شود در حالی که عمل‌آوری در دمای محیط باعث از دست رفتن آب بیش‌تر و در نتیجه افت قابل توجه به خصوص در دو هفته اول می‌شود [۲۷]. برخلاف سیمان پرتلند، آب موجود در بتن ژئوپلیمری در ترکیب ژل قرار نمی‌گیرد و به همین دلیل با قرار گرفتن بتن در محیط با رطوبت نسبی کم به راحتی می‌تواند از بتن خارج گردد [۲۸]. زیجیان و همکاران به بررسی تاثیر رطوبت نسبی داخلی بر افت با استفاده از مواد منبسط‌کننده پرداختند. نتایج نشان داد که افت در ملات قلیا فعال سرباره‌ای رابطه‌ای خطی با رطوبت نسبی داخلی دارد [۲۹]. با توجه به استاندارد ACI ۲۰۹-۲۰۰۵ [۳۰] دوره عمل‌آوری می‌تواند ۱۰ تا ۲۰ درصد افت را کاهش دهد، اما این مقدار کاهش به نسبت آب به چسباننده بستگی دارد. بر اساس تحقیقات ولی‌پور و خیات، افت نهایی در تمامی نمونه‌ها با افزایش دوره عمل‌آوری از ۱ روز به ۳ و ۷ روز، کاهش پیدا می‌کند [۳۱]. حسینیان و همکاران نیز نشان دادند علاوه بر ترکیبات بتن، زمان قرارگیری بتن در محیط، تفاوت دمای بتن و محیط بر میزان تبخیر آب از سطح بتن و در نتیجه افت تاثیرگذار می‌باشد [۳۲].

جدول ۱. درصد ترکیبات شیمیایی سرباره و سیمان مصرفی (%)

Table 1. The chemical composition of the slag and cement (%)

L.O.I	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
n.a.	۰/۶۵	۰/۸۰	۰/۳۰	۷/۸۰	۳۸/۵۰	۱/۰۰	۱۱/۰۰	۳۶/۵	سرباره
۱/۱۰	n.a.	n.a.	۲/۰۰	۳/۱۰	۶۰/۰۰	۳/۱۰	۵/۸۰	۲۳/۵۰	سیمان

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی متاسیلیکات سدیم ۵ آبه

Table 2: The chemical composition of the sodium metasilicate.5H₂O (%)

H ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂
۴۱	۲۹/۵ ± ۰/۲	۲۹/۵ ± ۰/۲

از سبکدانه لیکا در ترکیب با سنگدانه‌های معمولی استفاده شده است و دو ترکیب ریزدانه لیکا - شن و ریزدانه لیکا - درشت‌دانه لیکا بدین منظور استفاده گردید. یک نمونه بتن سبک با سیمان پرتلند و یک نمونه بتن قلیا فعال سرباره‌ای با سنگدانه‌های معمولی (شن و ماسه) برای کنترل و مقایسه نیز ساخته شده است.

۲- مواد، مصالح مصرفی و روش آزمایش

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

سرباره، ماده اصلی چسباننده در ترکیب بتن قلیا فعال سرباره‌ای است. پودر سرباره استفاده شده در این تحقیق از شرکت سیمان سپاهان با چگالی ۲/۷۸۰ تهیه شد که مشخصات آن به همراه مشخصات سیمان پرتلند نوع I در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین برای فعال‌سازی سرباره از متاسیلیکات سدیم ۵ آبه به صورت دانه‌ای با فرمول شیمیایی Na_۲SiO_۳·nH_۲O، جرم حجمی ۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با نسبت مولار ۱ محصول شرکت سیلیکا گستر اصفهان استفاده شد. نتیجه تجزیه شیمیایی فعال کننده متاسیلیکات سدیم مورد استفاده در جدول ۲ ذکر گردیده است. قابل ذکر است که مقادیر جداول ۱ و ۲ از روش XRF اندازه‌گیری شده‌اند. ریزدانه مورد استفاده ماسه رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳/۱ و چگالی ۲/۷ است، و از سنگدانه‌های شکسته با حداکثر بعد ۱۲/۵ میلی‌متر با چگالی ۲/۶۵ به عنوان درشت‌دانه معمولی استفاده شده است. مشخصات ریزدانه و درشت‌دانه سبک (لیکا) در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

سبکدانه‌ها جذب آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی دارند، با پیش اشباع کردن سبکدانه‌ها قبل از اختلاط می‌توان آب اضافی برای هیدراسیون را از آب جذب شده در سنگدانه‌ها تامین کرد [۳۳ و ۳۴]. پیش اشباع کردن سبکدانه‌ها نوعی عمل‌آوری داخلی محسوب شده و باعث می‌شود افت خشک‌شدگی در بتن‌های سبک پیش اشباع بعد از پایان عمل‌آوری، کاهش یابد [۳۵]. یافته‌های مگ و خیات نشان می‌دهد که استفاده از ماسه سبک در بتن UHPC که حاوی ۴ درصد دوده سیلیس، ۳۴ درصد خاکستر بادی گروه C و با نسبت آب به چسباننده ۰/۲، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه افت شود [۳۶]. با مقایسه افت بتن‌های معمولی و بتن‌های سبک نتایج متفاوتی گزارش شده است، به طوری که در برخی از گزارش‌ها بتن سبک افت کمتری در مقایسه با بتن معمولی داشته است [۳۷-۳۹] و در برخی دیگر از تحقیقات افت نمونه‌های بتن سبک بیشتر از بتن معمولی گزارش شده است [۴۰-۴۲].

مطالعات اندکی بر روی بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی انجام شده است، در حالی که استفاده از این نوع بتن می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز داشته باشد. در این تحقیق دو نسبت ۱۸ و ۲۰ درصد متاسیلیکات سدیم و دو عیار ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای بررسی تاثیر عیار سرباره و دوز فعال کننده تک جزئی بر خصوصیات بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی (LAAS) مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی نوع عمل‌آوری بر خصوصیات این نوع بتن، دو نوع عمل‌آوری در آب و پوشش پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساخت بتن سبک

جدول ۳. خصوصیات ریزدانه سبک

Table 3: specifications of lightweight fine aggregate

وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	جذب آب (%)	مدول نرمی
۱۴۰۰	۸۰۰	۱۰	۲/۴۵

جدول ۴. خصوصیات درشت‌دانه سبک

Table 4. specifications of lightweight coarse aggregate

وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	جذب آب (%)	مدول نرمی
۱۴۰۰	۸۰۰	۱۰	۲/۴۵

۲-۲- روش آزمایش

در این قسمت، استانداردهای مورد استفاده در انجام تست‌ها شرح داده شده است. در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب مطابق با استاندارد BS 1881 [۴۳] در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. لازم به ذکر است که برای هر طرح و در هر سن، ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین آن‌ها در تجزیه و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C1۴۳ [۴۴] بر روی فاز تازه بتن انجام گرفت. تحت شرایط آزمایشگاهی و با کنترل شدید بر روی مصالح مخلوط بتن، اسلامپ بتن می‌تواند معیاری برای سنجش میزان آب و نسبت آب به مواد چسباننده بتن به حساب بیاید که رابطه‌ی معکوسی با مقاومت بتن خواهد داشت.

آزمایش تعیین زمان گیرش طبق استاندارد ASTM C1۹۱-۸۲ [۴۵] و به وسیله دستگاه ویکات بر روی خمیر چسباننده بتن انجام گرفت. استاندارد مربوط به اندازه‌گیری پایداری ابعادی مصالح سخت شده، ASTM C1۵۷ [۴۶] می‌باشد که از نمونه‌های منشوری 285 میلی‌متر در طول و سطح مقطع 75×75 برای بتن با بزرگ‌ترین سنگدانه کمتر از 25 میلی‌متر استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش از دستگاه Demec Guage به منظور

اندازه‌گیری تغییر طول سه عدد نمونه تکرار منشوری استفاده شد. طبق استاندارد نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت عمل‌آوری مرطوب شده و پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، دمک‌ها روی نمونه چسبانده می‌شوند و برای اولین بار طول آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سایر قرائت‌ها در هفته اول هر روز، بعد از آن هر هفته به مدت یک ماه و بعد از آن هر دو هفته یک بار این عمل تکرار گردید.

امروزه میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی به طور وسیعی در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس کار میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی مبتنی بر روبش سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی می‌باشد. میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی عموماً در خلاء کار می‌کنند. پس از ایجاد خلاء با انجام عملیات روبش توسط پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه، از سطح نمونه تصویری بر روی صفحه نمایشگر مشاهده می‌گردد. با تغییر ابزار ثبت پرتو می‌توان تصاویری با اطلاعات مختلف از سطح نمونه مثل تصاویری از پستی و بلندی سطح یا تصاویری از توزیع فازها در سطح روبش به دست آورد. در این تحقیق تجزیه و تحلیل SEM روی خمیرهای 180 روزه انجام شد. پس از شکست نمونه‌ها در سن 180 روز، از سطح نمونه‌های شکسته شده، نمونه‌هایی با ابعاد حدودی 5 میلی‌متر انتخاب و جهت آزمایش استفاده شده است.

جدول ۵. طرح اختلاط

Table 5. Mix composition

عمل آوری	چگالی (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)		ریزدانه (kg/m ³)		آب (kg/m ³)	فعال کننده (kg/m ³)	عیار سرباره (kg/m ³)	طرح
		معمولی	سبک	معمولی	سبک				
آب	۱۴۳۹	-	۳۰۹	-	۴۹۹	۱۵۶	۷۲	۴۰۰	A1
آب	۱۴۵۸	-	۲۷۲	-	۴۴۰	۱۸۶	۸۵/۵	۴۷۵	A2
آب	۱۴۳۳	-	۳۰۵	-	۴۹۳	۱۵۵	۸۰	۴۰۰	A3
پوشش پلاستیک	۱۴۳۶	-	۳۰۹	-	۴۹۹	۱۵۶	۷۲	۴۰۰	A4
آب	۱۴۵۵	-	۲۶۸	-	۴۳۳	۱۸۴	۹۵	۴۷۵	A5
آب	۱۷۳۳	۵۴۶	-	-	۴۳۳	۱۸۴	۹۵	۴۷۵	A6
آب	۲۱۳۴	۵۴۶	-	۸۳۴	-	۱۸۴	۹۵	۴۷۵	A7
آب	۱۴۳۶	-	۳۲۳	-	۴۸۵	۱۸۶	سیمان = ۴۴۲		OPC

۳- طرح اختلاط

که جزء آب بتن به حساب می‌آید. در تمامی طرح نسبت آب به چسباننده ثابت و برابر ۰/۴۲ در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی طبق استاندارد BS ۱۸۸۱ در سنین ۰/۷، ۲۸ و ۹۰ روز برای تمام طرح‌ها اندازه‌گیری شد [۴۳]. بعد از قالب‌گیری، نمونه‌ها در شرایط استاندارد (۲۳±۲ °C) به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند. دو نوع عمل‌آوری در آب و عمل‌آوری در پوشش پلاستیک در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. قالب‌های پر شده بعد از ۴۸ ساعت باز شدند. برای جلوگیری از افت رطوبت بتن طی ۴۸ ساعت، نمونه‌ها در زیر پوشش پلاستیکی نگهداری گردیدند. بعد از باز کردن قالب‌ها تعدادی از نمونه‌ها جهت عمل‌آوری تا سن آزمایش درون آب و تعدادی درون پوشش پلاستیکی قرار داده شدند. بعد از اتمام زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها از آب و یا پوشش پلاستیک خارج و در محیط آزمایشگاه جهت انجام آزمایش‌ها قرار گرفتند. شکل ۱ نحوه عمل‌آوری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در انجام آزمایش افت خشک‌شدگی از نمونه‌های منشوری ۲۸۵ میلی‌متری در طول و سطح مقطع ۷۵ × ۷۵ میلی‌متر مربع طبق استاندارد ASTM C ۱۵۷ استفاده شده است [۴۶]. در شکل ۲ مجموعه قالب‌های استفاده شده در آزمایشگاه نشان داده شده است.

طرح اختلاط‌های مورد استفاده برای ساخت بتن در جدول ۵ نشان داده شده است. به منظور بررسی تاثیر عیار سرباره بر خصوصیات بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای دو طرح A1 و A2 با نسبت ثابت فعال کننده ۰/۱۸ و دو طرح A3 و A4 با عیار سرباره ثابت ۴۰۰ kg/m³ و دو نسبت فعال کننده ۰/۱۸ و ۰/۲۰ انتخاب شده‌اند. برای بررسی تاثیر جایگزینی سبکدانه بر مقاومت فشاری و افت بتن سبک، ۲ طرح اختلاط ساخته شد. در طرح A5 کل سنگدانه مورد استفاده در ساخت، سبکدانه لیکا و در طرح A6 سبکدانه لیکا جایگزین فقط ریزدانه شده است. به منظور مقایسه، در طرح A7 کل سنگدانه مورد استفاده سنگدانه معمولی است. سبکدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق ۲۴ ساعت قبل از مخلوط شدن در آب غرقاب شده و به صورت پیش اشباع استفاده گردیده است. در طرح OPC مقدار سیمان پرتلند مورد استفاده برابر چسباننده مورد استفاده در طرح‌های A5، A6 و A7 می‌باشد. مجموع سرباره و قسمت خشک متاسیلیکات سدیم ۵ آبه، به عنوان چسباننده و مجموع آب اضافه شده به بتن و آب موجود در ساختار متاسیلیکات سدیم ۵ آبه، آب بتن در نظر گرفته شد. بر اساس آنالیز مشخصات متاسیلیکات سدیم ۵ آبه در ساختار آن ۵۹ درصد وزنی آن را ترکیبات خشک تشکیل می‌دهد که وارد فاز چسباننده بتن می‌شود و ۴۱ درصد وزنی آن از آب تشکیل شده است



شکل ۱. شرایط عمل‌آوری (الف) در پوشش پلاستیک، (ب) در آب

Fig. 1. Curing condition, a) plastic cover curing, b) water curing



شکل ۲. مجموعه قالب‌های مورد استفاده

Fig. 2. the set of used mold



شکل ۳. دستگاه کرنش سنج

Fig. 3. DEMEC gauge

طرح‌ها که حاوی سبکدانه لیکا می‌باشند اسلامپ کم‌تری در مقایسه با بتن ساخته شده با شن و ماسه معمولی دارند. سبکدانه‌ها بافت متخلخل دارند و وزن سبکدانه‌ها و بتن ساخته شده با این نوع سنگدانه‌ها در مقایسه با بتن ساخته شده با شن و ماسه کم‌تر می‌باشد و همچنین تمایل به جذب آب در این بتن‌ها نسبت به بتن ساخته شده با سنگدانه معمولی بیش‌تر است. این عوامل سبب می‌شود که بتن حاوی سبکدانه اسلامپ کم‌تری در مقایسه با بتن ساخته شده با شن و ماسه داشته باشد.

۴-۲- زمان گیرش

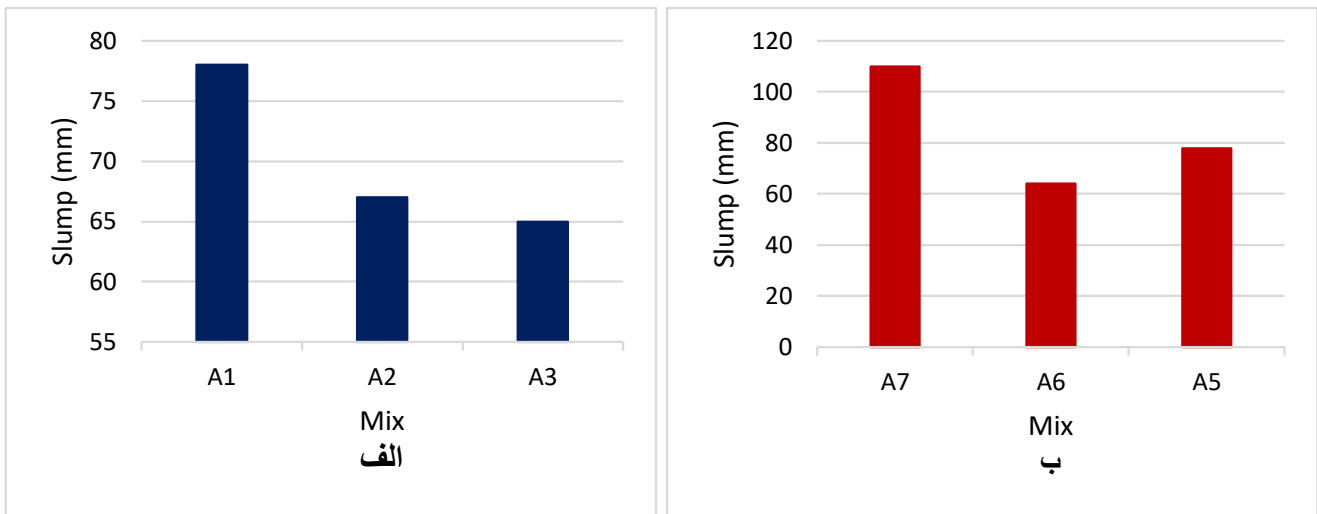
نتایج گیرش اولیه و نهایی در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، زمان گیرش در سرباره تحت تاثیر فعال کننده می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص است، افزایش درصد متاسیلیکات سدیم در مخلوط سبب کاهش زمان گیرش می‌شود. با افزایش مقدار متاسیلیکات سدیم از 72 kg/m^3 به 80 kg/m^3 ، زمان گیرش اولیه از ۹۰ به ۷۳ دقیقه، کاهش ۱۸ درصدی و زمان گیرش نهایی از ۲۱۲ به ۱۸۹ دقیقه، کاهش ۱۱ درصدی دارد. کاهش زمان گیرش با افزایش دوز فعال کننده قلیایی به دلیل رشد کریستال‌ها ناشی از هیدراسیون چسباننده است که سبب می‌گردد روانی

۴- بررسی نتایج

۴-۱- اسلامپ

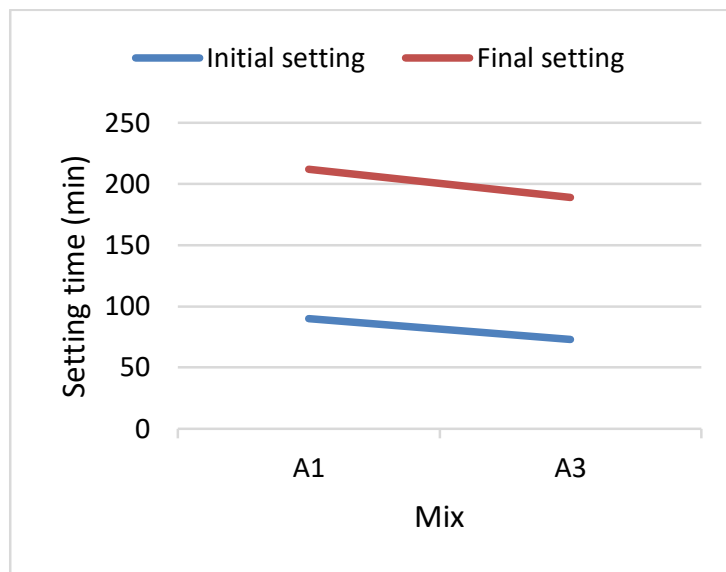
اسلامپ بتن نقش به‌سزایی در اجرایی شدن طرح‌های اختلاط دارد. نتایج اسلامپ در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-الف با افزایش مقدار فعال کننده از ۱۸ به ۲۰ درصد موجب کاهش اسلامپ از ۷۸ به ۶۷ میلی‌متر شده است. در توضیح این رفتار می‌توان گفت که در یک نسبت مشخص و ثابت آب به چسباننده، با افزایش مقدار ماده فعال کننده، حجم آب اضافه شده به مخلوط کاهش پیدا می‌کند. از طرفی افزایش مقدار فعال کننده سبب تسریع و تشدید واکنش شیمیایی بتن شده و کاهش مقدار آب طرح، کاهش اسلامپ را سبب می‌گردد. به طور کلی افزایش مقدار فعال کننده، در ترکیب بتن قلیا فعال، سبب کاهش اسلامپ می‌گردد. بهفرنیا و رستمی در تحقیقات خود از محلول سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات برای فعال کردن سرباره استفاده کردند و نشان دادند که افزایش نسبت محلول فعال کننده به سرباره سبب کاهش اسلامپ می‌شود [۲۲].

در شکل ۴-ب تاثیر ترکیب سنگدانه‌ها بر اسلامپ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-ب بیش‌ترین اسلامپ ۱۱۰ میلی‌متر و در بتن حاوی شن و ماسه معمولی به دست آمده است. همانطور که مشخص است، سایر



شکل ۴. تاثیر الف) عیار سرباره و متاسیلیکات سدیم ، ب) ترکیب سنگدانه‌ها

Fig.4. The effect of: a) slag content and sodium metasilicate, b) aggregate combination

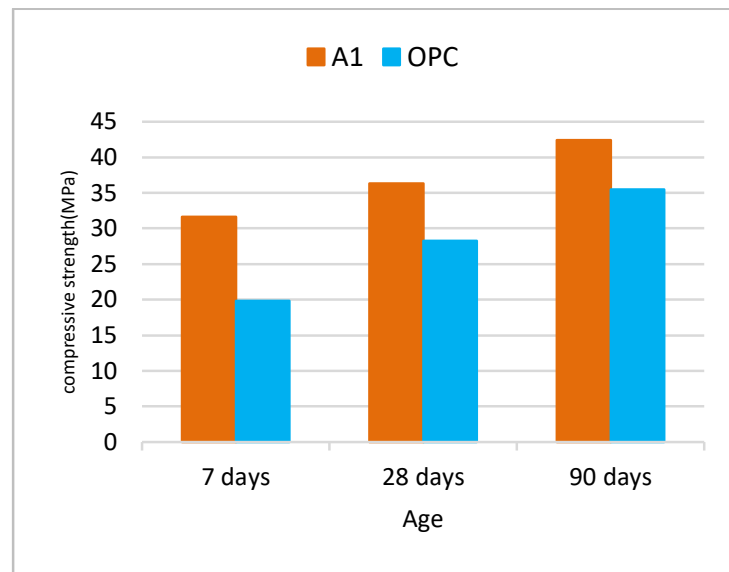


شکل ۵. تاثیر متاسیلیکات سدیم بر زمان گیرش

Fig. 5. The effect of sodium metasilicate on the setting time

سرباره فعال شده، زمان گیرش اولیه را در محدوده ۲-۳۲۶ دقیقه و زمان گیرش نهایی را ۲-۴۴۲ دقیقه اعلام کردند [۴۷].

خمیر رو به کاهش رود و عمل گیرش چسباننده سریع‌تر اتفاق افتد. زمان گیرش سرباره قلیا فعال بازه‌ی متفاوت دارد به طوری که آیدین و همکاران در بررسی تاثیر نوع و غلظت فعال کننده دو جزئی بر خصوصیات ملات



شکل ۶. مقایسه مقاومت فشاری نمونه A1 و OPC

Fig. 6. The comparison of compressive strength of A1 and OPC concrete.

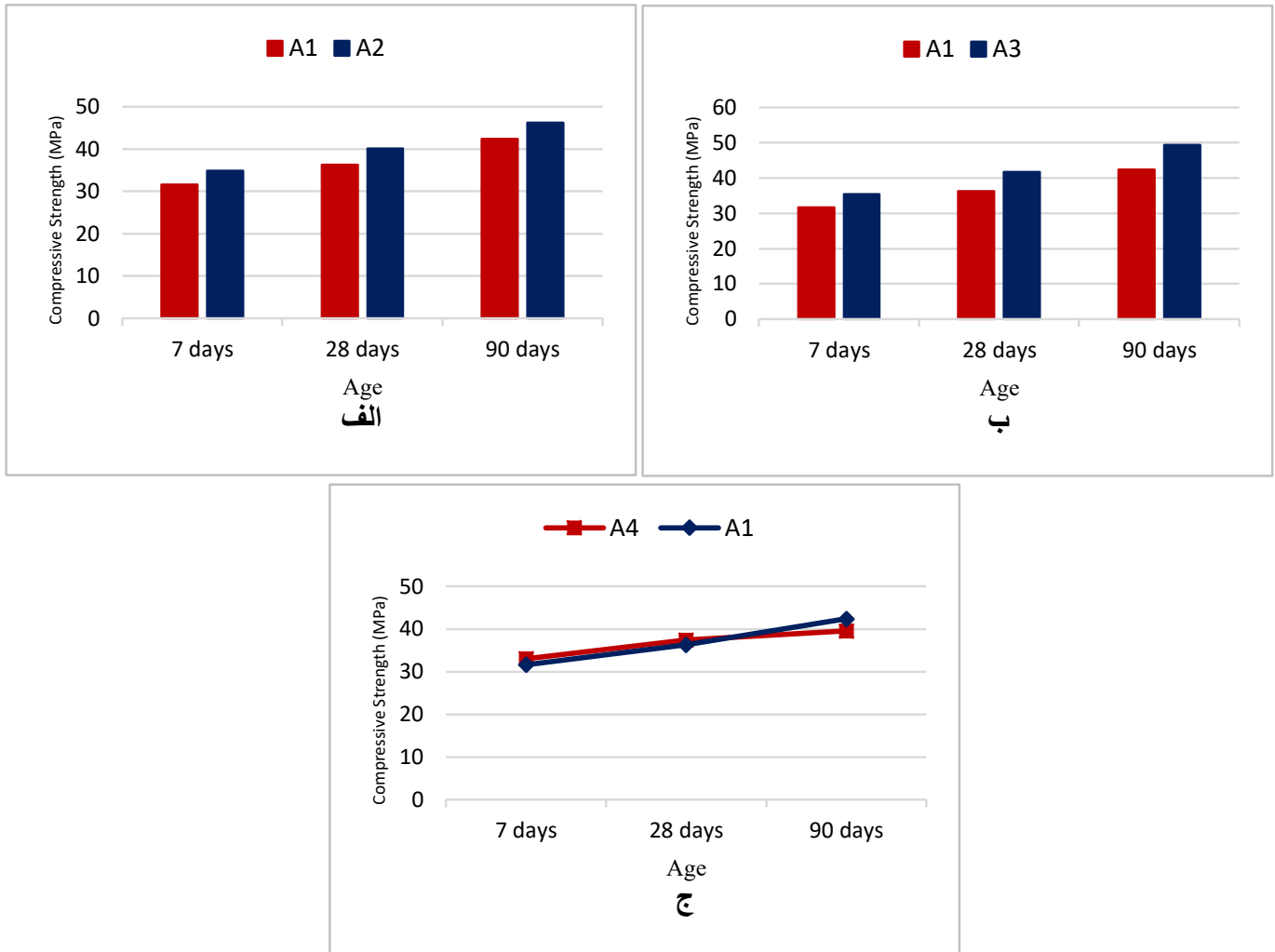
و ۹۰ روز می‌شود. مقدار مناسب سرباره در نسبت کم آب به چسباننده باعث می‌شود تا غلظت خمیر چسباننده بیش‌تر شود و با واکنش کامل ذرات سرباره، منافذ ریزی که در خمیر چسباننده بتن ایجاد می‌گردد، بر اثر ادامه‌ی واکنش سرباره این منافذ ریز هم مسدود گردد. از طرف دیگر مقدار مناسب سرباره در مخلوط سبب تراکم بهتر و عدم جدا شدگی دانه‌ها می‌گردد.

شکل ۷-ب مقاومت فشاری نمونه‌ها با مقادیر مختلف متاسیلیکات سدیم را نشان می‌دهد. افزایش در مقدار متاسیلیکات سدیم در ترکیب‌ها، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی می‌شود. افزایش حدوداً ۱۰ درصدی در مقدار فعال کننده (متاسیلیکات سدیم) به طور میانگین سبب افزایش ۱۲/۱، ۱۴/۸ و ۱۶/۴ درصدی به ترتیب در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز می‌شود. با اتم‌های مدول سیلیکات ($M_s = \frac{SiO_2}{Na_2O}$) و غلظت قلیایی ($n = \frac{Na_2O}{slag}$) فعال کننده در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بتن بسیار موثر هستند. در این تحقیق مدول سیلیکات فعال کننده برابر ۱ و غلظت قلیایی در طرح A1 برابر ۵/۲ و در طرح A2 برابر ۵/۸ درصد است. دلیل افزایش مقاومت طرح A2 افزایش میزان آنیون‌های قلیایی برای شکستن لایه محافظ در سطح سرباره و تشکیل ژل C-S-H می‌باشد.

۴-۳- مقاومت فشاری

در شکل ۶، مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن سبک سرباره‌ای فعال شده با متاسیلیکات سدیم و بتن سبک سیمانی مقایسه شده است. به طور کلی بتن ساخته شده با سرباره قلیا فعال تک جزئی مقاومتی بیش‌تر از بتن‌های معمولی دارد و همانطور که در شکل مشخص است روند کسب مقاومت در سنین پایین این نوع بتن بیش‌تر از بتن معمولی است. مقاومت ۷ روزه بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی تقریباً ۸۷٪ مقاومت ۲۸ روزه و ۷۵٪ مقاومت ۹۰ روزه آن است. این در حالی است که بتن ساخته شده با سیمان پرتلند تنها ۷۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود را در ۷ روز اول کسب نموده است. با مقایسه نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که استفاده از سرباره فعال شده با متاسیلیکات سدیم می‌تواند سبب افزایش ۶۰، ۳۰ و ۲۰ درصدی مقاومت فشاری به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز شود.

در شکل ۷-الف تاثیر عیار سرباره بر مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. افزایش عیار سرباره از 400 kg/m^3 به 475 kg/m^3 سبب افزایش ۱۰/۱، ۱۰/۵ و ۹ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب در سنین ۷، ۲۸

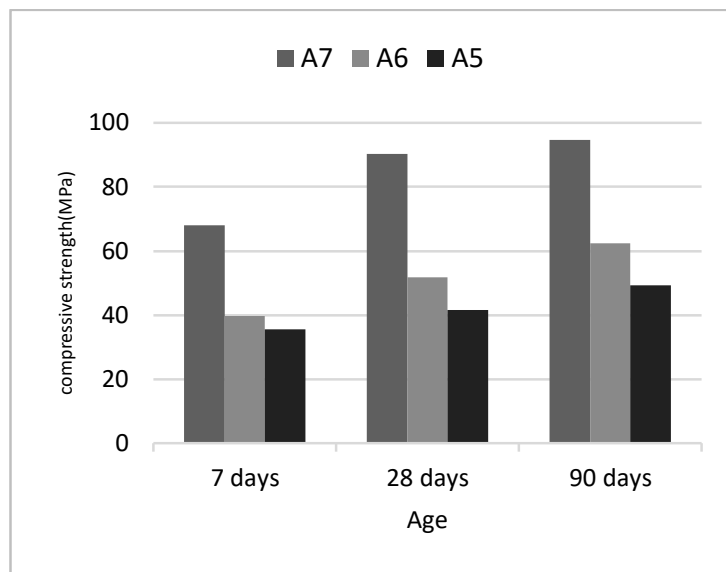


شکل ۷. تاثیر الف) عیار سرباره، ب) متاسیلیکات سدیم، ج) نوع عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن LAAS

Fig. 7. The effect of: a) slag content, b) sodium metasilicate, c) curing condition on compressive strength of LAAS concrete

همان سن می‌باشد. اما به نظر می‌رسد که عمل‌آوری در پوشش پلاستیک برای نمونه‌های بتن حاوی سبکدانه در طولانی مدت چندان مناسب نباشد، چرا که با وجود روند افزایش در سنین بالاتر، در سن ۹۰ روز مقاومت نمونه عمل‌آوری شده در پوشش پلاستیک ۶/۷٪ درصد کمتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این گونه توضیح داد که بتن عمل‌آوری شده در پوشش پلاستیک، در سنین اولیه کمبود آب مورد نیاز واکنش هیدراسیون را از آب موجود در سنگدانه‌های سبک تامین می‌کند و رشد مقاومت مطلوبی دارد ولی در سنین بالاتر و اتمام آب سنگدانه‌های سبک، روند رشد مقاومت آن دچار کاهش می‌گردد.

در این تحقیق تاثیر دو نوع عمل‌آوری در آب و عمل‌آوری در پوشش پلاستیک بر مقاومت فشاری در طرح اختلاط‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل ۷-ج نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷-ج مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب و همچنین عمل‌آوری شده در پوشش پلاستیک، در همه‌ی سنین روندی افزایشی دارد. در طی آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شد که عمل‌آوری در پوشش پلاستیک عملکرد بهتری در کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه نسبت به عمل‌آوری در آب دارد. مقاومت فشاری نمونه‌ها با عیار سرباره ۴۰۰، متاسیلیکات ۱۸٪ و عمل‌آوری شده در پوشش پلاستیک در سن ۷ روز ۴/۴٪ و در سن ۲۸ روز ۳٪ بیش‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب در



شکل ۸. تاثیر ترکیب سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری

Fig. 8. The effect of aggregate combination on the compressive strength

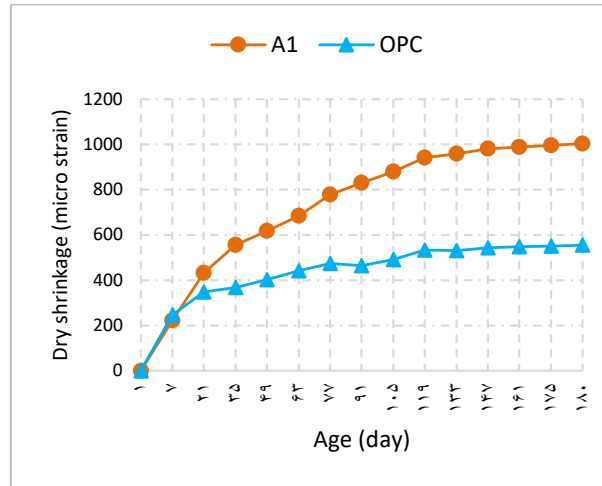
ملات سیمانی گزارش شده است [۴۸]. شکل ۹ نمودار افت خشک‌شدگی در بتن سبک سیمانی در مقایسه با بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، افت خشک‌شدگی نهایی در بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی تقریباً ۱/۸ برابر افت در بتن سبک سیمانی می‌باشد. افت خشک‌شدگی بالای قلیا فعال‌ها در مقایسه با ملات‌های سیمانی می‌تواند به این دلیل باشد که آب برخلاف آنچه که در سیمان عمل می‌کند به طور مستقیم در تولید ژل آلومینوسیلیکات ترکیب نمی‌شود، در نتیجه مقدار آب زیادی وجود دارد که از نظر شیمیایی محدود نیست و مستعد تبخیر شدن است.

شکل ۱۰-الف تغییرات افت خشک‌شدگی نمونه عمل‌آوری شده در آب و با نسبت متاسیلیکات ۱۸ درصد را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰-الف مشخص است، با افزایش عیار سرباره، افت خشک‌شدگی از مقدار ۱۰۰۴ به ۱۱۰۲ میکرواسترین افزایش می‌یابد. افت وابسته به جزء خمیری چسباننده می‌باشد. بنابراین هر چه حجم خمیر چسباننده بیشتر باشد، بتن بیشتر مستعد خشک شدن است. همچنین با افزایش عیار سرباره در نسبت آب به چسباننده ثابت، مقدار آب موجود در طرح افزایش می‌یابد و از طرفی حجم سنگدانه‌ها در بتن کم‌تر می‌شود، بنابراین آب بیش‌تری برای تبخیر در بتن وجود خواهد داشت.

در شکل ۸ تاثیر نوع سنگدانه بر مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود نمونه A7 که با استفاده از سنگدانه‌های معمولی ساخته شده است، بیش‌ترین مقاومت فشاری را کسب کرده است و بعد از آن طرح A5 و سپس A6 در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. داشتن نسبتی مناسب از سنگدانه‌های ریز و درشت برای به دست آوردن بتنی با مقاومت بالا بسیار مهم است. سنگدانه ریز منجر به ایجاد مخلوط متراکمی خواهد شد. علیرغم وجود ماتریس منسجم و سخت، مقاومت فشاری کم سبکدانه‌ها در مقایسه با سنگدانه‌های معمولی سبب کم شدن مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سبکدانه می‌شود.

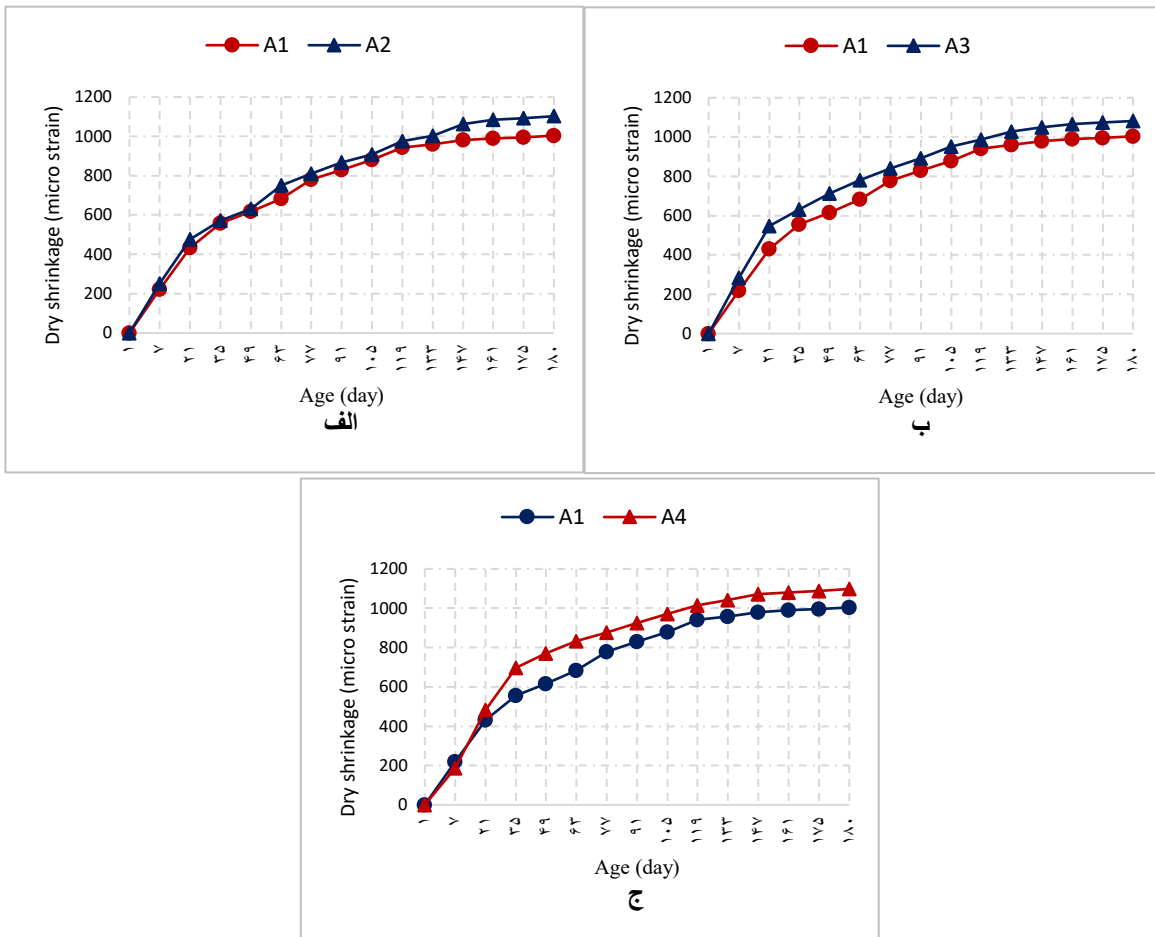
۴-۴- افت خشک‌شدگی

عوامل زیادی بر افت خشک‌شدگی بتن تاثیرگذار هستند، از جمله نسبت آب به چسباننده، شرایط عمل‌آوری، نوع سنگدانه‌ها و دانه‌بندی آن‌ها، تخلخل و رطوبت نسبی محیط. به طور کلی این پارامترها اگر با کاهش تبخیر آب موجود در بتن همراه باشند، افت خشک‌شدگی در بتن کاهش می‌یابد. بر اساس تحقیقات، چسباننده‌های قلیا فعال دو جزئی در مقایسه با ملات سیمانی افت خشک‌شدگی بیش‌تری دارند که در برخی موارد افت خشک‌شدگی قلیا فعال دو جزئی حدوداً ۲ تا ۳ برابر افت خشک‌شدگی در



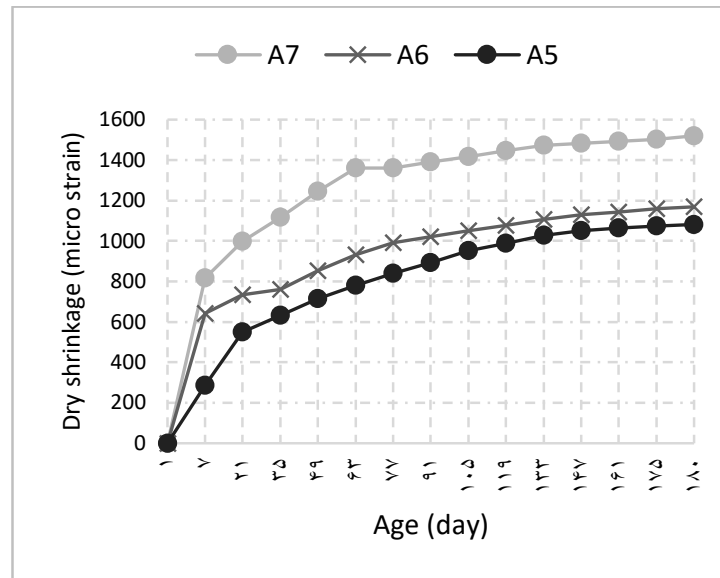
شکل ۹. مقایسه افت خشک شدگی بتن A1 و OPC

9. The comparison of drying shrinkage of A1 and OPC concrete



شکل ۱۰. تاثیر الف) عیار سرباره، ب) متاسیلیکات سدیم، ج) نوع عمل‌آوری بر افت خشک‌شدگی بتن LAAS

10. The effect of: a) slag content, b) sodium metasilicate, c) curing condition on drying shrinkage of LAAS concrete



شکل ۱۱. تاثیر ترکیب سنگدانه‌ها بر افت خشک‌شدگی بتن LAAS

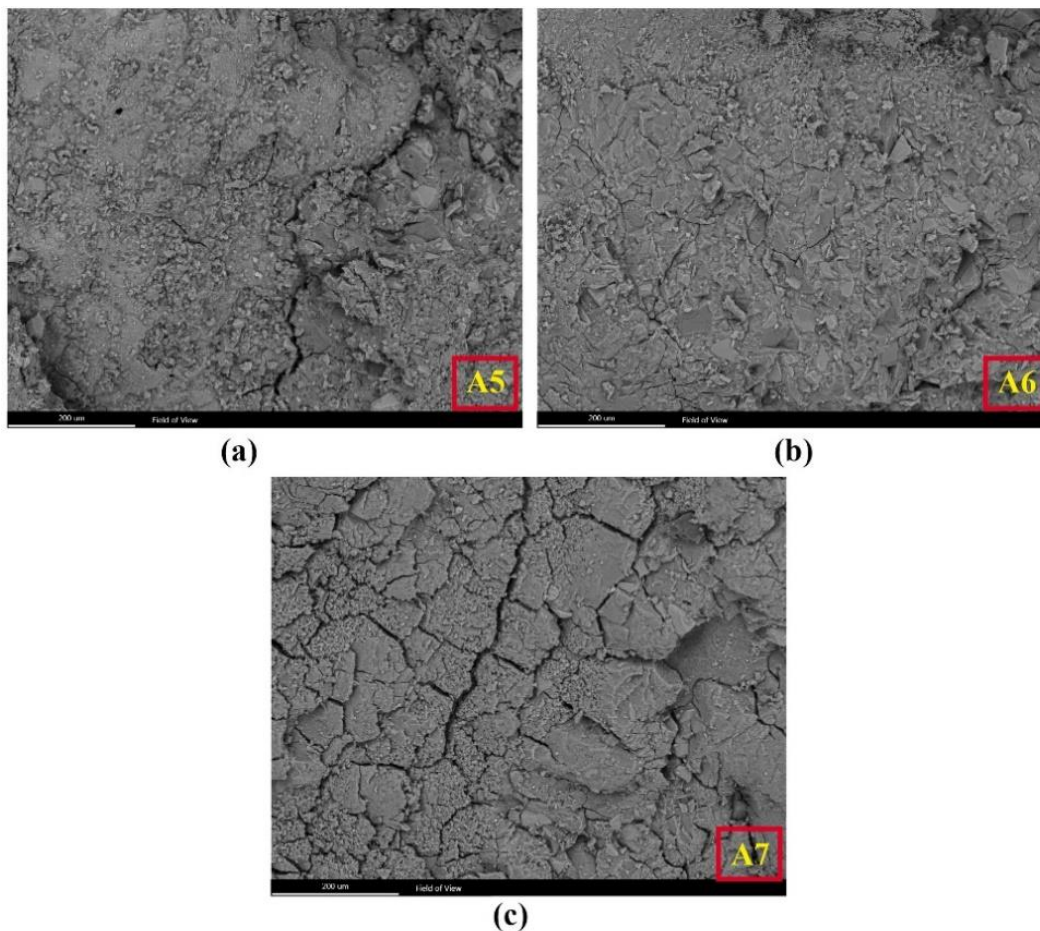
Fig. 11. The effect of aggregate combination on the drying shrinkage of LAAS concrete

در محیط، در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب واکنش سرباره با جذب آب موجود در سبکدانه‌ها توسط خمیر چسباننده ادامه پیدا می‌کند، اما بتن محبوس در پوشش پلاستیک آبی برای ادامه واکنش سرباره ندارد و فرآیند افت خشک‌شدگی آغاز می‌شود.

شکل ۱۱ افت خشک‌شدگی نمونه‌ها با ترکیبات مختلف سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. طبق نتایج افت نمونه‌های بتنی حاوی سبکدانه کم‌تر از نمونه ساخته شده با سنگدانه معمولی است. طرح A5 که ترکیبی از سبکدانه و سنگدانه معمولی می‌باشد کم‌ترین میزان افت (در حدود ۱۰۸۱ میکرواسترین) را دارد و طرح A7 ساخته شده با سنگدانه‌های معمولی بیش‌ترین افت (به مقدار ۱۵۲۰ میکرواسترین) را دارد. سبکدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق به صورت پیش اشباع مورد استفاده قرار گرفته است. پیش اشباع کردن سبکدانه‌ها نوعی عمل‌آوری داخلی محسوب شده و باعث می‌شود افت خشک‌شدگی در بتن‌های سبک پیش اشباع کاهش یابد. آب موجود در منافذ سبکدانه‌های متخلخل به جای خارج شدن از بتن به طرف خمیر چسباننده کشیده می‌شود. با افزایش واکنش در خمیر چسباننده، ژل بیش‌تری تولید شده، منافذ خالی خمیر چسباننده پر شده، بتن متراکم‌تر و تخلخل کاهش پیدا می‌کند. همین امر سبب کاهش افت خشک‌شدگی در بتن سبک پیش اشباع می‌گردد.

شکل ۱۰-ب نتایج آزمایشگاهی افت در نمونه‌های قلیا فعال سرباره‌ای با دوزهای مختلف متاسیلیکات سدیم را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، افزایش درصد متاسیلیکات سدیم در ترکیبات، افزایش افت خشک‌شدگی را نتیجه خواهد داد. افزایش تقریباً ۱۰٪ در مقدار متاسیلیکات سدیم سبب افزایش ۷ درصدی افت خشک‌شدگی در طرح‌های این تحقیق شده است. افزایش متاسیلیکات باعث افزایش واکنش قلیایی سرباره و افزایش تولید ژل C-A-S-H شده و مقدار آب آزاد در ژل سیلیکاتی بیش‌تر می‌شود. در نتیجه پس از قرارگیری نمونه در محیط، افت خشک‌شدگی نمونه‌ها با افزایش متاسیلیکات، بیش‌تر می‌شود.

نوع عمل‌آوری بر میزان افت خشک‌شدگی قلیا فعال‌ها تاثیرگذار است. شکل ۱۰-ج تاثیر نوع عمل‌آوری بر افت خشک‌شدگی را نشان می‌دهد. مقدار افت خشک‌شدگی طرح A4 که تحت عمل‌آوری در پوشش پلاستیک قرار گرفته است برابر ۱۰۹۷ میکرواسترین گزارش شده است. در حالی افت خشک‌شدگی طرح A1 برای نمونه عمل‌آوری شده در آب ۱۰۰۴ میکرواسترین و حدود ۹/۲ درصد کم‌تر می‌باشد. بتن عمل‌آوری شده در آب برای ادامه واکنش سرباره در طول مدت عمل‌آوری آب لازم را از محیط دریافت می‌کند در حالی که در همان مدت زمان مشابه و برای عمل‌آوری در پوشش پلاستیک، آب موجود در سبکدانه‌های پیش اشباع شده برای ادامه واکنش سرباره جذب خمیر چسباننده می‌شوند. پس از قرارگیری نمونه‌ها



شکل ۱۲. ریز ساختار خمیر AAS : (a) طرح A5، (b) طرح A6، (c) طرح A7

Fig.12. Microstructure of AAS binder :a) Mix A5, b) Mix A6, c) Mix A7

۴-۵- میکرو ساختار

در این تحقیق برای مقایسه ریز ساختار خمیر نمونه‌های A5، A6 و A7 از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. تصاویر SEM، ساختار نمونه‌های A5، A6 و A7 را در سن ۱۸۰ روز نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار عیار سرباره و مقدار فعال کننده در هر سه نمونه شرایط یکسانی دارد، تراکم ساختاری هر سه نمونه به یکدیگر نزدیک هستند. اما با توجه به ترک‌های موجود در تصاویر مشاهده می‌شود که پیش اشباع کردن سبکدانه قبل از اختلاط موجب شده است که ترک خوردگی ناشی از افت خشک‌شدگی در بتن سبک نسبت به بتن ساخته شده با سنگدانه معمولی کم‌تر شود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به این که اطلاعاتی در مورد میزان افت خشک‌شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای در مقایسه با بتن سبک معمولی موجود نمی‌باشد، در این تحقیق، تاثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت فشاری و افت خشک‌شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی بررسی شد. نتایج این مطالعه را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش عیار سرباره از ۴۰۰ به ۴۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب، اسلامپ کاهش پیدا می‌کند، در حالی که مقاومت فشاری و افت خشک‌شدگی افزایش را تجربه می‌کنند.

- H.C. Kühne, Sulfuric acid resistance of one-part alkali-activated mortars, *Cement and Concrete Research*, 109 (2018) 54-63.
- [7] J. Temuujin, A. Minjigmaa, M. Lee, N. Chen-Tan, A. van Riessen, Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions, *Cement and Concrete Composites*, 33(10) (2011) 1086-1091.
- [8] H.Y. Zhang, V. Kodur, S.L. Qi, L. Cao, B. Wu, Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications, *Construction and Building Materials*, 55 (2014) 38-45.
- [9] F. Shahrajabian, K. Behfarnia, The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 176 (2018) 172-178.
- [10] R. Mohebi, K. Behfarnia, M. Shojaei, Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 792-798.
- [11] F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasit, *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, Elsevier, 2014.
- [12] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of materials science*, 42(9) (2007) 2917-2933.
- [13] J.L. Provis, Activating solution chemistry for geopolymers, in: *Geopolymers*, Elsevier, 2009, pp. 50-71.
- [14] J.L. Provis, Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?, *Materials and structures*, 47(1-2) (2014) 11-25.
- [15] J.L. Provis, J.S. Van Deventer, *Alkali activated materials: state-of-the-art report*, RILEM TC 224-AAM, Springer Science & Business Media, 2013.
- [16] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, M. Illikainen, One-part alkali-activated materials: A review, *Cement and Concrete Research*, 103 (2018) 21-34.
- [17] Z. Abdollahnejad, T. Luukkonen, M. Mastali, P. ۲- افزایش متاسیلیکات سدیم در حدود ۱۰ درصد، سبب کاهش ۱۶ درصدی اسلامپ شده و همچنین زمان گیرش اولیه و نهایی را کاهش می‌دهد. با افزایش دوز فعال کننده مقاومت فشاری و افت خشک‌شدگی افزایش می‌یابند.
- ۳- در بررسی تاثیر نوع عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نتایج نشان داده است که در سنین پایین عمل‌آوری در پوشش پلاستیک عملکرد بهتری نسبت به عمل‌آوری در آب دارد. اما در سنین بالاتر عمل‌آوری در پوشش پلاستیک نسبت به عمل‌آوری در آب سبب کاهش مقاومت می‌گردد. عمل‌آوری بتن‌های حاوی سبکدانه در پوشش پلاستیک نسبت به عمل‌آوری در آب، منجر به افزایش میزان افت خشک‌شدگی در بتن سبک می‌گردد.
- ۴- بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی افت کم‌تری در مقایسه با بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی ساخته شده با سنگدانه‌های معمولی را نشان می‌دهد.
- ۵- پیش اشباع کردن سبکدانه‌ها به عنوان یک نوع عمل‌آوری داخلی سبب کاهش افت خشک‌شدگی بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی گردید. اما با این حال افت بتن سبک قلیا فعال سرباره‌ای در مقایسه با نمونه ساخته شده با سیمان پرتلند بیش‌تر است.

منابع

- [1] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, *Concrete microstructure, properties and materials*, 2017.
- [2] A.M. Neville, J.J. Brooks, *Concrete technology*, Longman Scientific & Technical England, 1987.
- [3] Y. Theiner, G. Hofstetter, Evaluation of the effects of drying shrinkage on the behavior of concrete structures strengthened by overlays, *Cement and Concrete Research*, 42(9) (2012) 1286-1297.
- [4] K. Behfarnia, M. Rostami, Mechanical Properties and Durability of Fiber Reinforced Alkali Activated Slag Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12) (2017) 04017231.
- [5] R.J. Thomas, B.S. Gebregziabihier, A. Giffin, S. Peethamparan, Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders, *Cement and Concrete Composites*, 90 (2018) 241-256.
- [6] P. Sturm, G.J.G. Gluth, C. Jäger, H.J.H. Brouwers,

- Building Materials, 40 (2013) 291-298.
- [28] D.S. Perera, O. Uchida, E.R. Vance, K.S. Finnie, Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers, *Journal of Materials Science*, 42(9) (2007) 3099-3106.
- [29] Z. Jia, Y. Yang, L. Yang, Y. Zhang, Z. Sun, Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 198-207.
- [30] A. 209.1R-05, Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, American Concrete Institute, (2005).
- [31] M. Valipour, K.H. Khayat, Coupled effect of shrinkage-mitigating admixtures and saturated lightweight sand on shrinkage of UHPC for overlay applications, *Construction and Building Materials*, 184 (2018) 320-329.
- [32] G.S. Hasanain, T.A. Khallaf, K. Mahmood, Water evaporation from freshly placed concrete surfaces in hot weather, *Cement and Concrete Research*, 19(3) (1989) 465-475.
- [33] D. Cusson, T. Hoogeveen, Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking, *Cement and Concrete Research*, 38(6) (2008) 757-765.
- [34] A. Bentur, S.-i. Igarashi, K. Kovler, Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, 31(11) (2001) 1587-1591.
- [35] M. Balapour, W. Zhao, E.J. Garboczi, N.Y. Oo, S. Spatari, Y.G. Hsuan, P. Billen, Y. Farnam, Potential use of lightweight aggregate (LWA) produced from bottom coal ash for internal curing of concrete systems, *Cement and Concrete Composites*, 105 (2020) 103428.
- [36] W. Meng, K. Khayat, Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 101 (2017) 46-54.
- [37] P. Lura, K. Van Breugel, I. Maruyama, Autogenous and Kinnunen, M. Illikainen, Development of one-part alkali-activated ceramic/slag binders containing recycled ceramic aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2) (2019) 04018386.
- [18] P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, J.S.J. van Deventer, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', *Cement and Concrete Research*, 37(12) (2007) 1590-1597.
- [19] R.J. Thomas, H. Ye, A. Radlinska, S. Peethamparan, Alkali-activated slag cement concrete, *Concr. Int.*, 38(1) (2016) 33-38.
- [20] A.A.M. Neto, M.A. Cincotto, W. Repette, Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, 38(4) (2008) 565-574.
- [21] H. Ye, A. Radlińska, Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag, *Cement and Concrete Research*, 88 (2016) 126-135.
- [22] K. Behfarnia, M. Rostami, The Effect of Alkaline Solution-to-Slag Ratio on Permeability of Alkali Activated Slag Concrete, *International Journal of Civil Engineering*, 16(8) (2018) 897-904.
- [23] H. Taghvayi, K. Behfarnia, M. Khalili, The Effect of Alkali Concentration and Sodium Silicate Modulus on the Properties of Alkali-Activated Slag Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(7) (2018) 293-305.
- [24] M. Komljenović, Z. Baščarević, V. Bradić, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 181(1) (2010) 35-42.
- [25] M. Dong, M. Elchalakani, A. Karrech, Curing conditions of alkali-activated fly ash and slag mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6) (2020) 04020122.
- [26] S. Kumaravel, Development of various curing effect of nominal strength Geopolymer concrete, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 7(1) (2014) 116-119.
- [27] M. Chi, R. Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, *Construction and*

- [43] BS, 1881, Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes, British Standard Institution, (1983).
- [44] ASTM, C143/C143M-12-Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, USA: ASTM International, (2012).
- [45] ASTM, C191-82, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, USA: ASTM International, (2008).
- [46] ASTM, C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, USA: ASTM International, (2014).
- [47] S. Aydın, B. Baradan, Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, Composites Part B: Engineering, 57 (2014) 166-172.
- [48] F. Collins, J.G. Sanjayan, Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete, Cement and Concrete Research, 30(9) (2000) 1401-1406.
- drying shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete at early ages–The effect of specimen size, PRO, 23 (2002) 335-342.
- [38] S. LIN, Early age deformation characteristics of high performance concrete, 2004.
- [39] T. Fujiwara, Effect of Aggregate on Drying Shrinkage of Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 6(1) (2008) 31-44.
- [40] T.S. Al-Attar, Effect of coarse aggregate characteristics on drying shrinkage of concrete, Engineering and Technology Journal, 26(2) (2008) 146-153.
- [41] S. Asamoto, T. Ishida, K. Maekawa, Investigations into Volumetric Stability of Aggregates and Shrinkage of Concrete as a Composite, Journal of Advanced Concrete Technology, 6(1) (2008) 77-90.
- [42] M.H. Zhang, L. Li, P. Paramasivam, Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment, ACI Materials Journal, 102(2) (2005) 86-92.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Kadkhodaei, K. Behfarnia, M. Shahidi, *The effect of one-part activator on drying shrinkage and mechanical properties of lightweight alkali-activated slag concrete*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(1) (2023) 145162.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20053.7330



